

構造力学と設計を学ぶ方々へ

(最終講義録，論説，工学倫理など)

はしがき

昭和36年に大阪大学工学部構築工学科(土木・建築の前身)に入学して以来44年、昭和40年学部卒業してすぐに教官として採用されて40年間、大阪大学土木教室には大変お世話になりました。本年3月31日をもって定年という区切りを向かえ、退職致すことになりました。今期、工学研究科では11名の仲間が定年を向かえましたが、学卒で教官になったのは私だけで、教官歴40年は最長でありました。

永い期間の様々な出来事、一緒に研究しまた遊んだ卒業生一人ひとりを懐かしむと同時に、今後は単純に社会貢献に対する尺度で向き方を選択できる新しい環境への期待に胸を膨らませています。当面、63歳では引退と認めてもらえない学会・協会の仕事(委員会活動)を続けることと、橋梁製作会社や建設コンサルタントの技術相談にあたりますが、ゆくゆくは予てからの持論である建設業界の透明性を確保するための建設NPO法人の立ち上げに挑戦したいと思っています。

2月21日に最終講義を銀杏会館三和ホールで行いました。当初は在学生を対象として附属図書館吹田分館視聴覚ホールでこじんまりと行う予定でしたが、出席希望の方が多く、急遽広い会場に替えました。学内外から200人近い方々に参集頂き、恐縮いたしました。また多くの方から最終講義の開催日が他の行事と重なり参加できなかったとお聞きしましたので、最終講義の際にお配りしたレジメに、日頃、専門雑誌や会社技報の論説として書かせて頂いた拙文、最後の2年間で新しく興した工学倫理教育で使用する資料等を加えた西村語録を編纂することに致しました。

この編集作業に際しては駒井鉄工㈱の玉田和也さんに大変お世話になりました。深く感謝申し上げます。

平成17年3月

直 筆

西 村 宣 男
2005年3月

目 次

はしがき

最終講義

- ・コンピュータ時代の構造力学教育 1
- ・略歴 35

論文目録

- ・テーマ別研究業績 36

構造力学教育

- ・橋の設計と力学教育（橋梁新聞，「私の橋歴書」） 49
- ・公共工事における品質保証と設計照査について（コンサルタント講演会） .. 51
- ・橋梁技術者・研究者を育む術（橋梁と基礎，巻頭言） 56
- ・橋梁工学に役立つ構造力学教育のあり方（横河ブリッジ技報，巻頭論説） .. 58

技術雑感

- ・鋼橋の合理化と技術革新（川田技報） 64
- ・鋼橋と性能照査型設計（日本橋梁建設協会，近畿地区鋼橋技術講習会） 71
- ・都市機能再生への橋梁技術の活用（橋梁と基礎，巻頭言） 73
- ・道路構造物の建設と新技術の活用（橋梁メーカー講習会） 75
- ・土木分野における技術者教育・資格支援の動き（日本造船学会誌） 83
- ・活路を拓く（虹橋，巻頭言） 86

技術者倫理

- ・技術者資格と倫理教育（生産と技術） 89
- ・大規模土木構造物の建設と倫理（日本機械学会誌） 93
- ・構造設計と技術者倫理（土木学会構造工学委員会，有限要素法講習会） 97

工学倫理講義（平成15～16年度）

- ・一般論 106
- ・橋梁架設中の事故例 110
- ・都市再生の名の下に第2のバブル到来 128
- ・工学（技術者）倫理が求められる社会的背景 131

最 終 講 義

最終講義

コンピュータ時代の構造力学教育

2005年2月21日

大阪大学大学院工学研究科
土木工学専攻 西村宣男

1. 大学における構造力学教育の変遷
2. 教科書に書いていない構造力学
3. 拡張はり理論
4. 拡張はり理論と有限要素法の融合
5. 進化する構造力学

1. 大学における構造力学教育の変遷

1965年、大阪大学を卒業と同時に教官として大学に残り、爾来40年間構造力学の教育と研究に明け暮れた。この40年間はコンピュータの発達の歴史と合致しており、実務に用いられる構造解析法は手計算向きの解法からコンピュータ使用を前提とした解法に変わるのとは必然であった。しかし教育用のコンピュータ環境が整備されたのは1980年代の中頃であり、一時期において構造力学教育に混乱があったのは事実である。この40年間で3つの時代に分けて振り返りコンピュータ時代における構造力学教育の有り様を述べてみる。

(1) プレコンピュータ時代

全国主要大学に大型計算機センターが設置され研究用の数的処理サービスが始まった1960年代後半までを、プレコンピュータ時代と称する。当時、手元にある数値計算用の道具は計算尺、手廻し計算機であり裕福な研究室にのみ卓上計算機が導入されていたが、記憶容量は小さく連立方程式の計算は専ら紙と鉛筆に頼っていた。差分法やマトリックス法で多元連立方程式を導いた後の数値計算は、なけなしの研究費を叩いて巷間の計算会社に頼む状態であった。

この時代の構造解析は可能な限り変数の少ない解法が望まれ、連立方程式を解くことなく高次の不静定骨組構造を解析できるモーメント分配法のような漸化型の解法や、離散的構造物を連続体に置換して骨組や板の理論を適用して近似的に解く方法が多用された。逆説的に言えば、このような方法の長所は解法の定式化および数値計算の過程において構造特性を把握するのに十分な時間を要したことであろう。逆に欠点は境界条件や断面変化に十分対応できない適用範囲の制約であった。

構造力学教育は未だコンピュータを意識したものではなく、表-1に示すごとく古典的構造力学を数多くの講義時間を使って教授していた。

(2) 初期コンピュータ時代

1960年代後半、大学に大型計算機センターが設置され、世の中は初期コンピュータ時代に突入した。しかし導入された計算機は主として研究用であり、教育用の専用計算機が導入されたのは1980年代の中頃であった。研究で使用するマトリックス変位法や有限要素法は大学における研究と実社会とで同一歩調で広がってゆくと、学生に電子計算機による構造解析に適したマトリックス構造解析法や有限要素法の基礎を教育することが求められた。剛性マトリックスの誘導や座標変換は講義できても、実構造物を解いて変位や断面力の分布を描く体験をさせるコンピュータを使えないことが最大の悩みであった。

はしりのパーソナルコンピュータが私の部屋に入ったとき、マトリックス変位法による平面骨組構造解析用のソフトをBasic言語で作成し、学生一人一人を呼んで、データの入出力の体験をさせた。記憶容量は多くなかったが、斜張橋程度は容易に取り扱うこと

ができた。

(3) 後期コンピュータ時代

パーソナルコンピュータの普及により、学生一人ひとりの机の上に大型計算機センターとリンクされたコンピュータが与えられ、当然家庭でもそれに準ずるコンピュータ環境が整えられた1980年代後半から今日までを後期コンピュータ時代と称することにする。

汎用有限要素解析ソフトがパソコン上で起動するようになると、構造解析の原理を知らなくてもマニュアル通りにデータを入力できれば、構造解析が可能であり、ポストプロセッサの機能をマスターすれば構造解析の結果の図化も容易に行える時代になってきている。大学はブラックボックスエンジニア（力学の原理を理解せずソフトの使い方のみ長じた技術者）を大量に排出する機関に成り下がって良いのかとの疑問を持ち、私の研究室では汎用解析ソフトは御法度とし、学生達は手造りの専用ソフトの開発に苦勞している。ソフト開発の段階で学生の力学的な素養を育むことができると信じている。

手造りの専用ソフトを開発する意義は教育とは別の側面がある。汎用ソフトで全ての力学現象が解析できると思うのは大変な間違いである。また汎用ソフトで解決できる力学問題は構造力学を専門とする大学の研究室における研究テーマとしては相応しくない。汎用ソフトで解析できない問題を解決することが大学における構造力学屋の仕事であると考えている。しかし土木工学専攻を卒業する学生全てにこのような体験を積ませるわけにはいかない。

また最近若い設計技術者の力学能力が低下してきていると企業の指導的立場の方々からの意見を聞く。もっと重要なことは設計照査の信頼性である。このことに対する回答は最後に申し上げる。

表－1 構造力学系授業科目の変遷（学部）

	静定構造	不静定構造		弾性学	構造振動
～1967	構造力学Ⅰ 2	構造力学Ⅱ 4	構造力学Ⅲ 2	応用弾性学 2	振動工学 2
1968 ～1985	構造解析学Ⅰ 2	構造解析学Ⅱ 4		応用弾性学 2	構造動力学 2
1986～	構造力学Ⅰ 2	構造力学Ⅱ 2	マトリックス構造解析 2	連続体力学 2	土木動力学 2

数字は単位数を表す

2. 教科書に書いていない構造力学

初等構造力学は、初めて構造力学を学ぶ人が理解しやすいようにモデルの理想化が行われており、当然適用限界が存在している。この適用限界を忘れて実構造の解析を行うと、しばしば失敗に陥ることがある。従って構造力学の教育において、その進捗度に合わせて初等構造力学の適用限界を認識させると同時に、適用限界を開放する拡張理論の存在を示唆することが重要である。ここでは、一般の構造力学の教科書に書かれていないか詳しくは説明されていない2、3の例を紹介する。これらの問題を理解するために新しい知見は不要で、慣れだけが問題である。

(1) 分布モーメント荷重

図－1に示すように分布モーメント荷重が左支点から距離 $l/2$ の範囲に作用するとき、曲げモーメントおよびせん断力の分布は図－2に示ようになる。初等構造力学で教えている曲げモーメントの勾配がせん断力になると言う断面力の関係が成り立っていない。

図－3に示すように分布荷重と分布モーメント荷重が作用する微小区間 dx における偶力の釣り合いを考える。

$$M - M - dM + mdx + Qdx = 0 \quad (1)$$

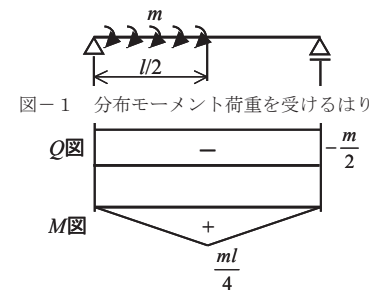
両辺を dx で除して

$$\frac{dM}{dx} = Q + m \quad (2)$$

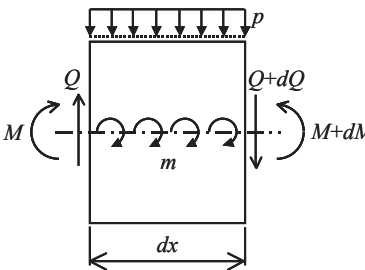
このように曲げモーメントの勾配はせん断力と分布モーメント荷重の和として与えられる。なお、分布モーメント荷重の載荷範囲がスパン全長に亘る場合、曲げモーメントは0になる。

以下のような力学問題において、上記の分布モーメント荷重が現れる。

- ・ 列車の制動荷重作用における制動力の偏心によるモーメント。
- ・ 斜めハンガー吊橋におけるハンガー力水平成分の補剛桁に対する偏心作用。



図－2 断面力分布



図－3 微小区間におけるつり合い

(2) はりのせん断変形

曲げに伴うせん断変形を考慮したはりの変位や断面力を計算する方法は初等構造力学ではあまり詳しく説明されていない。

せん断変形を考慮する場合、たわみ角は部材軸に直交な面の回転角 θ と断面の平均せん断ひずみ γ の和として

$$\frac{dv}{dx} = \theta + \gamma \quad (3)$$

と表される。曲げモーメント M は θ の変化に関係し

$$M = -EI \frac{d\theta}{dx} \quad (4)$$

式 (3) の関係を用いると

$$M = -EI \left\{ \frac{d^2v}{dx^2} - \frac{d\gamma}{dx} \right\} \quad (5)$$

せん断ひずみ γ は

$$\gamma = \frac{\kappa Q}{GA}$$

と与えられると

$$\frac{d\gamma}{dx} = \frac{\kappa}{GA} \frac{dQ}{dx} = -\frac{\kappa}{GA} p \quad (6)$$

断面力と外力の関係

$$\frac{d^2M}{dx^2} = -p$$

に代入すると、せん断変形を考慮したはりの曲げ弾性方程式が与えられる。

$$EI \frac{d^4v}{dx^4} = p - \kappa \frac{EI}{GA} \frac{d^2p}{dx^2} \quad (7)$$

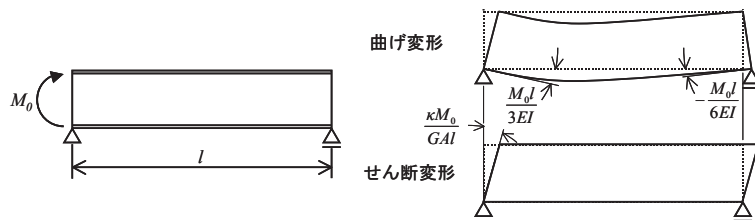


図-4 支点モーメントを受けるはり

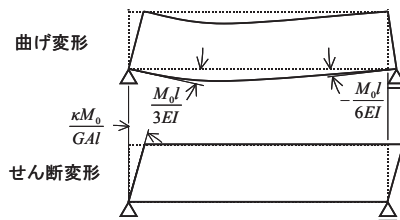


図-5 支点モーメントによる変形

(例題1 一 船)

図-4の荷重状態について弾性方程式の解を求める。中間荷重がないので右辺は0となる。

$$v = C_1 + C_2x + C_3x^2 + C_4x^3$$

境界条件として

$$x=0: v=0, \quad M_0 = -EI \frac{d^2v}{dx^2}$$

$$x=l: v=0, \quad \frac{d^2v}{dx^2} = 0$$

積分定数 $C_1 \sim C_4$ を求めると

$$v = \frac{M_0 l^2}{6EI} \left(\frac{x}{l} \right) \left(1 - \frac{x}{l} \right) \left(1 - \frac{2x}{l} \right) \quad (8)$$

となり、これは曲げ変形のみを考慮したたわみ曲線と同一となる。せん断変形は何処へ行ったのか。

$$\theta = \frac{dv}{dx} - \gamma$$

と表される回転角 θ にせん断変形の影響が含まれている。この荷重状態でははりの全長にわたり一様なせん断変形が生じており、図-5に示すようにはりは右側にスウェイする。この例題はせん断変形を考慮した3連モーメント公式の誘導において必要となる。

(例題2 せん断パラメータ)

図-6に示す1端固定他端単純支持のはりは不静定ばりであり、せん断変形の影響は変位のみならず、断面力にも影響を与える。

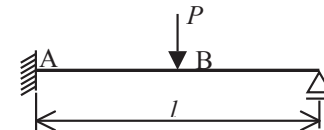


図-6 集中荷重を受ける1端固定他端単純支持のはり

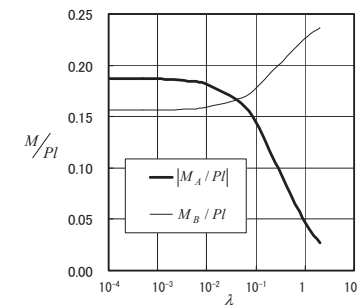


図-7 端モーメント・支間モーメントとせん断パラメータの関係

静定基本系として単純ばりを考え、左支点における回転角の適合条件

$$\left(\frac{l}{3EI} + \frac{\kappa}{GAJ}\right)M_A + \frac{Pl^2}{16EI} = 0$$

より固定端曲げモーメントは以下のように与えられる．

$$\frac{M_A}{Pl} = -\frac{3}{16(1+3\lambda)} \quad (10)$$

ここに、 $\lambda = \frac{\kappa EI}{GAJ^2}$

式に含まれているはりの曲げ剛性とせん断剛性の比に関係する力学パラメータ λ はせん断パラメータと称され、曲げに伴うせん断変形の影響の尺度として有効である． λ に対して固定端モーメント M_A および支間曲げモーメント M_B は図－7 のように変化する．

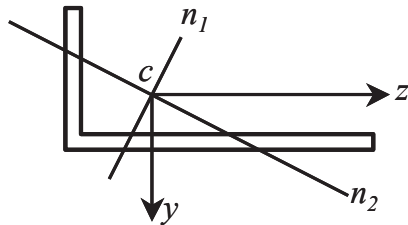
(3) 非対称断面の曲げ応力

図－8 に示す非対称断面ばりの曲げ応力については学生が十分理解できているとは思えない．断面諸量の計算が簡単な y z 座標に関する断面 2 次モーメントなどを用いて軸力と曲げモーメントによる応力を計算する際には、以下の式を用いることになる．

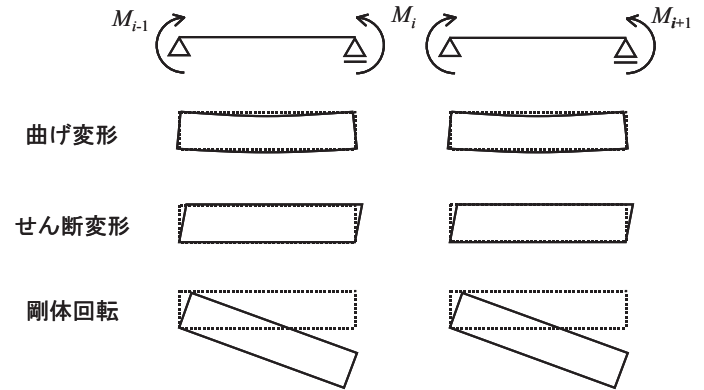
$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{(I_z M_y - I_{zy} M_z) y}{I_z I_y - I_{zy}^2} + \frac{(I_y M_z - I_{zy} M_y) z}{I_z I_y - I_{zy}^2} \quad (11)$$

y z 座標は断面の主軸ではないので断面相乗モーメント I_{zy} は 0 ではないことに留意しなければならない．

曲げモーメントを断面の主軸回りのモーメントで評価する場合、 I_{zy} を 0 としてお馴染みの応力式を用いることができるが、耐荷力解析で断面内に塑性領域が進展するような現象を追跡する場合、参照軸は断面に固定しておき、断面相乗モーメントを含む全ての連成剛性項を考慮した解析法が有利となる．



図－8 不等辺山形断面



図－9 3連モーメント公式の誘導における静定基本系

3. 拡張はり理論

(1) 総括

初等構造力学の内容を越えたはり構造の理論を拡張はり理論と名付ける．表－2はこの範疇に属する理論を総括したものである．基本的なはりの変位はたわみと回転角（せん断変形が省略できる場合はたわみ角に等しい）の 2 自由度であり、はりの曲げに関する基礎方程式は 4 階の微分方程式となる．軸力が作用したはりの曲げや弾性床上的のはりの曲げ問題も変位はたわみと回転角の 2 自由度であり、基礎方程式は 4 階の微分方程式である．

曲げに伴うせん断変形を考慮することは変位の自由度の増加とはならず、前出のように基礎方程式は 4 階の微分方程式である．

考慮する変位の自由度が増すと微分方程式はより高階となる．箱桁の断面変形の問題においてねじり変形との連成を考慮すると、変位はねじれ角、断面変形角とその 3 自由度となり基礎方程式は 6 階の微分方程式となる．積層はりの曲げ問題においても変位はたわみとフェーシング材およびコア材の回転角の 3 自由度であり、基礎方程式は 6 階の微分方程式となる．表－3 は各微分方程式の一般解を示している．

(2) 曲げに伴うせん断変形を考慮した 3 連モーメント公式

図－9 に示すように隣り合う 3 支点上曲げモーメント M_{i-1} 、 M_i 、 M_{i+1} を考え、支点 i における変位（回転角）の適合条件から 3 連モーメント公式が誘導される．支間 i および $i+1$ の部材回転角を β_i 、 β_{i+1} と表す．支点 i の左近傍における回転角 θ_{i-1} は

$$\theta_{i-1} = -\frac{M_i l_i}{3EI_i} - \frac{M_{i-1} l_i}{6EI_i} - \frac{M_i - M_{i-1}}{l_i} \frac{\kappa_i}{GA_i} + \theta_{i0} + \beta_i \quad (1)$$

表－２ 拡張はり理論一覧

拡張はり理論	一般化変位
(1) せん断変形を考慮したはりの曲げ	v (たわみ), θ (回転角)
(2) 引張を受けるはりの曲げ	v (たわみ), θ (回転角)
(3) 圧縮を受けるはりの曲げ	v (たわみ), θ (回転角)
(4) 弾性床上的はりの曲げ	v (たわみ), θ (回転角)
(5) 積層ばりの曲げ	v (たわみ), θ (回転角), $\frac{dv}{dx}$ (たわみ角)
(6) 開断面ばりのそりねじり理論	ϕ (ねじれ角), ω (そり)
(7) 2次せん断変形を考慮したそりねじり理論	ϕ (ねじれ角), ω (そり)
(8) 閉断面ばりの断面変形理論	χ (断面変形角)

右近傍における回転角 θ_{i+1}^r は

$$\theta_{i+1}^r = \frac{M_i l_{i+1}}{3EI_{i+1}} + \frac{M_{i+1} l_{i+1}}{6EI_{i+1}} - \frac{M_{i+1} - M_i}{l_{i+1}} \frac{\kappa_{i+1}}{GA_{i+1}} + \theta_{i0}^r + \beta_{i+1} \quad (2)$$

と書くことができる．両式を等置して整理すると

$$\begin{aligned} & \frac{(1-6\lambda_i)\gamma_i}{I_i} M_{i-1} + \frac{2(1+3\lambda_i)\gamma_i}{I_i} M_i + \frac{2(1+3\lambda_{i+1})\gamma_{i+1}}{I_{i+1}} M_i + \frac{(1-6\lambda_{i+1})\gamma_{i+1}}{I_{i+1}} M_{i+1} \\ & = 6E(\theta_{i0}^l - \theta_{i0}^r) + 6E(\beta_i - \beta_{i+1}) \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 λ_i および λ_{i+1} は各径間におけるせん断パラメータで

$$\lambda_i = \frac{\kappa_i EI_i}{GA_i l_i^2}, \lambda_{i+1} = \frac{\kappa_{i+1} EI_{i+1}}{GA_{i+1} l_{i+1}^2}$$

(3) 積層ばりの曲げ理論

相対的に固いフェーシング材と軟らかいコア材とからなる図－１０のような積層ばりの曲げ理論を考える．コア材については曲げに伴うせん断変形を考慮する．

フェーシング材には軸力 N_1 , N_2 , せん断力 Q_1 , Q_2 および曲げモーメント M_1 , M_2 が作用し、コア材にはせん断力 Q_w のみが作用する．はり断面としての断面力 M_g , Q_g は

$$M_g = M_1 + M_2 - N_1 \eta_1 + N_2 \eta_2 \quad (4)$$

$$Q_g = Q_1 + Q_2 + Q_w \quad (5)$$

ところでフェーシングのたわみ角 $\frac{dv}{dx}$, コアの回転角 θ およびせん断ひずみ γ の間には

$$\gamma = \frac{dv}{dx} - \theta \quad (6)$$

の関係がある．この θ と上下フェーシングの図心を結ぶ直線の回転角 ϕ の間には

表－３ 拡張はり理論に用いる微分方程式の一般解

(1) はりの曲げ	$y^{IV} = 0$ $y = C_1 + C_2 x + C_3 x^2 + C_4 x^3$
(2) 引張を受けるはり、開断面ばりのそりねじり	$y^{IV} - \alpha^2 y'' = 0$ $y = C_1 + C_2 x + C_3 \cosh(\alpha x) + C_4 \sinh(\alpha x)$
(3) 圧縮を受けるはり	$y^{IV} + \alpha^2 y'' = 0$ $y = C_1 + C_2 x + C_3 \cos(\alpha x) + C_4 \sin(\alpha x)$
(4) 弾性床上的はりの曲げ	$y^{IV} + k^4 y = 0$ $y = C_1 \cos(kx) \cosh(kx) + C_2 \sin(kx) \cosh(kx) + C_3 \cos(kx) \sinh(kx) + C_4 \sin(kx) \sinh(kx)$
(5) 積層ばりの曲げ	$y^{VI} - \alpha^2 y^{IV} = 0$ $y = C_1 + C_2 x + C_3 x^2 + C_4 x^3 + C_5 \cosh(\alpha x) + C_6 \sinh(\alpha x)$
(6) 閉断面ばりの断面変形	$y^{VI} - 2r^2 y^{IV} + s^4 y'' = 0$ $r > s$ の場合 $y = C_1 + C_2 x + C_3 \cosh(\alpha x) + C_4 \sinh(\alpha x) + C_5 \cosh(\beta x) + C_6 \sinh(\beta x)$ $r = s$ の場合 $y = C_1 + C_2 x + C_3 \cosh(\alpha x) + C_4 \sinh(\alpha x) + C_5 x \cosh(\alpha x) + C_6 x \sinh(\alpha x)$ $r < s$ の場合 $y = C_1 + C_2 x + C_3 \cosh(\alpha x) \sin(\beta x) + C_4 \cosh(\alpha x) \cos(\beta x) + C_5 \sinh(\alpha x) \cos(\beta x) + C_6 \sinh(\alpha x) \sin(\beta x)$

$$h_d \phi = (e_1 + e_2) v + h \theta \quad (7)$$

の関係があることに留意して個々の断面力を変形 v , v' , ϕ , およびそれらの導関数で表す．

$$N_1 = EA_1 \eta_1 \phi', \quad M_1 = -EI_1 v'', \quad Q_1 = -EI_1 v'''$$

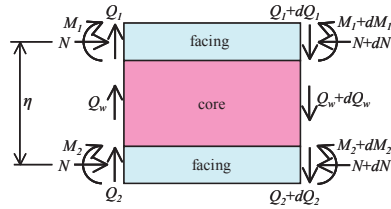
$$N_2 = EA_2 \eta_2 \phi', \quad M_2 = -EI_2 v'', \quad Q_2 = -EI_2 v'''$$

コアのせん断力は

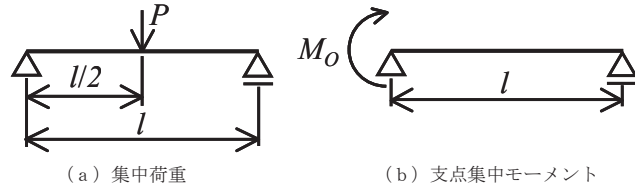
$$Q_w = GA_w \gamma$$

はり断面の曲げモーメントは

$$\begin{aligned} M_g &= -E(I_1 + I_2) v'' - (EA_1 \eta_1^2 - EA_2 \eta_2^2) \phi' = -EI_f v'' - EI_n \phi' = -EI_g v'' + EI_n \frac{h}{h_d} \gamma' \\ &= -EI_g v'' - \frac{EI_n}{GA_w} \frac{h}{h_d} \kappa q + \frac{\kappa EI_f}{GA_w} \frac{EI_n h}{h_d} v^{IV} \end{aligned} \quad (8)$$



図－１０ 積層ばりの曲げ



図－１１ 代表的荷重状態

曲げモーメントと分布荷重 q との関係

$$M_g'' = -q$$

に代入すると、以下の６階の微分方程式が与えられる。

$$v^{VI} - \alpha^2 v^{IV} = -\frac{1}{EI_n} \frac{h_d}{h} \frac{GA_w}{EI_f} q + \frac{1}{EI_f} q'' \quad (9)$$

$$\text{ここに, } \alpha^2 = \frac{I_g}{I_n} \frac{h_d}{h} \frac{GA_w}{EI_f}$$

この基礎方程式の誘導過程は前に述べた曲げに伴うせん断変形を考慮したはりの曲げに関する基礎式とほとんど同じである。微分方程式の閉じた解は代表的な荷重状態について以下のように与えられている。

【支間中央に集中荷重が作用する単純ばりの解】図－１１（ａ）

$$\frac{vEI_g}{Pl^3} = \frac{1}{16} \left\{ 1 + \frac{I_n}{I_f} \frac{8}{(\alpha l)^2} \right\} \frac{x}{l} - \frac{1}{12} \left(\frac{x}{l} \right)^3 - \frac{I_n}{I_f} \frac{1}{(\alpha l)^3} \frac{\sinh(\alpha x)}{2 \cosh\left(\frac{\alpha l}{2}\right)} \quad (10)$$

【支点集中モーメントを受ける単純ばりの解】図－１１（ｂ）

$$\frac{vEI_g}{M_0 l^2} = \left\{ \frac{1}{6} - \left(1 - \rho \frac{I_g}{I_f} \right) \frac{1}{(\alpha l)^2} \right\} \frac{x}{l} - \frac{1}{6} \left(\frac{x}{l} \right)^3 + \left(1 - \rho \frac{I_g}{I_f} \right) \frac{1}{(\alpha l)^2} \frac{\sinh(\alpha x)}{\cosh(\alpha l)} \quad (11)$$

$$\text{ここに, } \frac{I_g}{I_f} = 1 + \frac{I_n}{I_f}$$

どちらの式も無次元パラメータ αl , $\frac{I_n}{I_f}$, $\frac{x}{l}$ の組み合わせで表現されており、積層ばりの曲

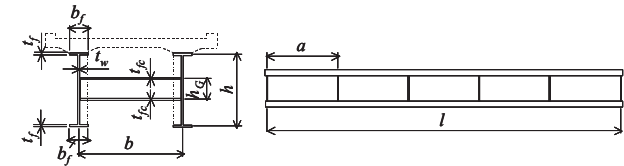
げ問題を支配する力学パラメータは αl と $\frac{I_n}{I_f}$ である。因みに $\frac{x}{l}$ は位置のパラメータである。

なお、支点集中モーメントの式に含まれる ρ は断面に作用する曲げモーメント M_0 の内、フェーシング材が分担する曲げモーメント $M_f = \rho M_0$ を表している。このことは断面に独立な曲げモーメントが２つ存在することを意味している。

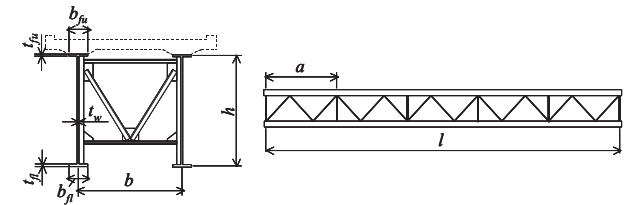
（４）２主桁橋の全体横ねじれ座屈理論

１９７０年代後半から１９８０年代にかけて、幅員の狭い国道において、歩行者の安全対策として歩道の併設が行われた。河川を横断する個所では歩行者・軽車両を対象とした側道橋が建設された。橋梁形式は多岐に亘るが、図－１２に示すような横桁あるいは横構で連結された２主桁橋が多い。これらの橋梁の架設時構造系を対象とした全体横ねじれ座屈荷重の簡易算定式を導くため、面外たわみおよびねじりに関する弾性方程式を考える。

横桁連結形式でも横構連結形式でも横繫ぎ材は密に配置されていて連続体として取り扱うことができることを前提として、水平横たわみに関してせん断変形を考慮したはりの曲げ理論ないしは積層ばりの曲げ理論を適用する。



(a) 横桁方式



(b) 横構方式

図－１２ ２主桁形式側道橋の形状

横桁連結形式はフィーレンディール桁としての挙動を横たわみに伴うせん断変形とみなす。水平たわみに関する弾性方程式は

$$EI_y {}^g u^{IV} - EK u^{VI} = 2p - \kappa p''$$

横ねじれ座屈を考えるとき、 $p = -\frac{\{M_x \phi\}'''}{2}$ において座屈方程式は以下のように与えられる。

$$EI_y {}^g u^{IV} - EK u^{VI} + \{M_x \phi\}'' - \frac{\kappa}{2} \{M_x \phi\}^{IV} = 0$$

$$M_x u'' - GJ {}^g \phi'' + EC_w {}^g \phi^{IV} - p_y e_y \phi = 0$$

$$\text{ここに、} EI_y {}^g = 2EI_y {}^m + \frac{b^2 EI_x {}^m}{2}$$

$$EK = \kappa EI_y {}^m$$

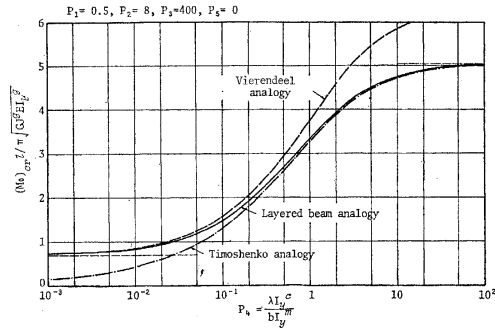
$$\kappa = \frac{\left\{ b^2 \lambda^2 I_y {}^c + 2b^3 \lambda I_y {}^m \right\} K_\theta + 12b^2 \lambda EI_y {}^c I_y {}^m \left\{ A_m \right\}}{12 I_y {}^c I_y {}^m K_\theta}$$

$$GJ {}^g = 2GJ {}^m$$

$$EC_w {}^g = 2EC_w {}^m + \frac{b^2 EI_x {}^m}{2}$$

水平変位 u およびねじれ角 ϕ を

$$u = s_1 \sin\left(\frac{\pi}{l}\right), \quad \phi = s_2 \sin\left(\frac{\pi}{l}\right) \text{ と仮定してガラーキン法を適用すると}$$



図－1 3 2 主桁形式側道橋のアナロジーの比較

等曲げを受ける場合

$$\frac{(M_0)_{cr} l}{EI_y {}^g} = \pi \sqrt{\frac{C_1 C_2}{C_3} \frac{r_x}{l}}$$

$$\text{ここに、} C_1 = \pi^2 + P_1^2$$

$$C_2 = 1 + \left(\frac{\pi}{P_2} \right)^2 \frac{P_3 - 2}{P_3} \cdot \frac{2 + P_4 (1 + 12P_5)}{12P_4}$$

$$C_3 = 1 + \pi^2 \frac{P_3 - 2}{P_2^2} \cdot \frac{2 + P_4 (1 + 12P_5)}{24P_4}$$

等分布荷重を受ける場合

$$\frac{(p_y)_{cr} l^3}{EI_y {}^g} = 42.35 \frac{r_x}{l} \frac{\sqrt{\eta C_2^2 + 0.466 C_1 C_2 C_3'} - \eta C_2}{C_3'}$$

$$\text{ここに、} C_3' = 1 + 0.522 \pi^2 \frac{P_3 - 2}{P_2^2} \cdot \frac{2 + P_4 (1 + 12P_5)}{12P_4}$$

$$\eta = \frac{e_y}{r_x}$$

このように拡張はり理論を適用することにより、横桁連結形式の2主桁構造の横ねじれ座屈現象に関与している力学パラメータは

$$P_1 = \sqrt{\frac{GJ {}^g}{EC_w {}^g}} \cdot l, \quad P_2 = \frac{l}{\lambda}, \quad P_3 = \frac{I_y {}^g}{I_y {}^m},$$

$$P_4 = \frac{\lambda I_y {}^c}{b I_y {}^m}, \quad P_5 = \frac{EI_y {}^m}{\lambda K_\theta}$$

であることが明らかになり、実績調査によるパラメータの変化を調べると、 P_4 が最も顕著に現象を支配するパラメータであることが示された。

なお、横桁（はり）により2本の主桁（柱）を連結した構造の拡張はり理論に属する理論としては Mortelmans のフィーレンディールアナロジーや Timoshenko のアナロジーがある。上述の理論とフィーレンディールアナロジーおよび Timoshenko アナロジーを横ねじれ座屈問題に適用すると、図－1 3 に示すようにアナロジーの相違点が明らかになった。Timoshenko アナロジーでは主桁の曲げ剛性を無視しているため横桁による連結効果が小さい範囲で強度を過小に評価し、フィーレンディールアナロジーでは主桁の伸縮を考慮していないので横桁による連結効果が強い範囲で強度を過大に評価する結果となっている。

4. 拡張はり理論と有限要素法の融合

(1) 照査のための構造力学

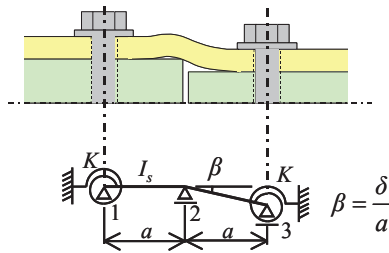
実務設計においては実際の荷重状態、境界条件、断面変化状態を考慮した解析が必要であり、汎用有限要素法ソフトはその目的に適っている。しかし解析結果の力学的評価・解釈を有限要素法単独で行うことは困難である。いわゆる尺度が定まらないからである。そこに登場するのが初等構造力学である。有限要素解析によって得られた変位や応力は初等構造力学の値と比較することで解析結果に確信を持ったり、逆に初等構造力学との差違が対象構造の特徴を表すこともある。初等構造力学に留まらず前出の拡張はり理論を用いれば、照査の幅が広がる。拡張はり理論によって現象を支配する力学パラメータとその影響度を知ることができる。ただし拡張はり理論では取り扱える荷重状態、境界条件などに制約があるので、有限要素法と拡張はり理論との融合が解析あるいは設計において有力な手段となる。

このように初等構造力学を少し発展させた構造解析理論を照査のための構造力学と位置付けることで、コンピュータ時代の構造力学教育の柱と考えることができる。

以下において有限要素法と拡張はり理論の融合に成功した事例を紹介する。

(2) 高力ボルト摩擦接合継手における肌すきの影響評価

高力ボルト摩擦接合継手において連結される鋼板に板厚差がある場合、継手の中心に近いボルトの導入軸力の一部が肌すきを埋めるための板曲げに消費されるため、母材と連結板を密着させるための接触力にならない。高力ボルトの初期導入軸力が規定の値であっても接触力の合計が規定値に達しないため、接触力と摩擦係数の積で与えられる継手の限界すべり強度が低下することになる。連結板が厚い程、肌すき量が大きい程、限界すべり強度の低下は著しくなる。高力ボルト摩擦接合継手内部の応力状態はかなり複雑であり、鋼板の降伏現象が絡む場合は有限要素解析によって検討することになるが、その結果に一般性を与えるために拡張はり理論の適用を試みる。



図－1 4 肌すきを有する高力ボルト摩擦接合継手

曲げに伴うせん断変形を考慮したはり理論が目的に適っている。図－1 4 に示すように両端の回転変形が弾性拘束された2径間連続ばりを考える。右側の径間は肌すきに対応した部材回転角 β が存在する。拡張はり理論を適用するにあたり以下の条件が満たされているものとする。

- ・ 最内列のボルト位置で肌すき量が閉じる程度の比較的小さな板厚差を対象とする。肌すきを閉じるために消費されるボルト軸力は最内列のボルトに限定される。
- ・ ボルト孔周辺における連結板の局部変形やボルト軸の変形を回転バネで考慮できるものとする。(剛性は有限要素解析によって同定する)
- ・ 連結板は弾性範囲にあるものとする。曲げによる応力を算出して降伏限界を明らかにする。

各支点における回転角の適合条件により

$$\begin{aligned} \frac{M_1}{K} &= \frac{M_1 a(1+3\lambda)}{3EI} + \frac{M_2 a(1-6\lambda)}{6EI} \\ \frac{M_1 a(1-6\lambda)}{6EI} + \frac{2M_2 a(1+3\lambda)}{3EI} + \frac{M_3 a(1-6\lambda)}{6EI} + \beta &= 0 \\ \frac{M_3}{K} &= -\frac{M_2 a(1-6\lambda)}{6EI} - \frac{M_3 a(1+3\lambda)}{3EI} + \beta \end{aligned}$$

支点上モーメントについて連立方程式を解くと

$$M_i = C_i EI \frac{\delta}{a^2} \quad (i=1,2,3) \quad (1)$$

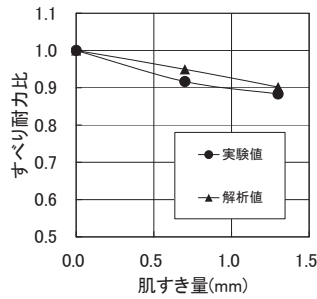
$$\begin{aligned} \text{ここに、} \quad C_1 &= 1.5(1-6\lambda) \frac{1+\frac{3}{\Omega}}{1+3\lambda+\frac{3}{\Omega}} \cdot \frac{1}{1+12\lambda+\frac{4}{\Omega}+\frac{12\lambda}{\Omega}}, \quad C_2 = -\frac{3+\frac{6}{\Omega}}{1+12\lambda+\frac{4}{\Omega}+\frac{12\lambda}{\Omega}} \\ C_3 &= \frac{4.5+27\lambda+\frac{15}{\Omega}+\frac{18\lambda}{\Omega}}{1+3\lambda+\frac{3}{\Omega}} \cdot \frac{1}{1+12\lambda+\frac{4}{\Omega}+\frac{12\lambda}{\Omega}} \end{aligned}$$

$$\Omega = \frac{Ka}{EI}, \quad \lambda = \frac{\kappa EI}{GAa^2}$$

支点反力は板曲げ変形に消費されるボルト導入軸力を意味しており、支点3の反力が最大となる。

$$R_3 = -\frac{C_3 EI \delta}{a^3} \quad (2)$$

$$C_5 = \frac{7.5+36\lambda+\frac{30}{\Omega}+\frac{36\lambda}{\Omega}+\frac{18}{\Omega^2}}{\left(1+3\lambda+\frac{3}{\Omega}\right)\left(1+12\lambda+\frac{4}{\Omega}+\frac{12\lambda}{\Omega}\right)}$$



図－１５ 筋すき量と限界すべり強度との関係

ボルトの初期導入軸力 P_0 を以下のように表す。

$$P_0 = c\sigma_{YB}A_B$$

ここに、 σ_{YB} ：高力ボルトの降伏応力度、 A_B ：高力ボルトの有効断面積。

R_3 と P_0 の比を取る。

$$\frac{R_3}{P_0} = C_6 \frac{E}{c\sigma_{YB}} \cdot \frac{b\delta}{A_B} \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^3 \quad (3)$$

$$\text{ここに、} C_6 = \frac{0.625 \left(1 + 4.8\lambda + \frac{4}{\Omega} + \frac{4.8\lambda}{\Omega} + \frac{2.4}{\Omega^2}\right)}{\left(1 + 3\lambda + \frac{3}{\Omega}\right) \left(1 + 12\lambda + \frac{4}{\Omega} + \frac{12\lambda}{\Omega}\right)}$$

N列のボルト継手における接触圧則ち継手効率の減少量 r は

$$r = 1 - \frac{R_3}{NP_0} \quad (4)$$

と表すことができる。重要なことは拡張はり理論を適用することによって、高力ボルト摩

擦接合継手における筋すき問題が、式（３）に表されているように材料特性： $\frac{E}{c\sigma_{YB}}$ ，

筋すき量： $\frac{b\delta}{A_B}$ ，連結板厚： $\frac{t}{a}$ ，せん断パラメータ： $\lambda = \frac{kEI}{GAa^2}$ の無次元パラメータで評

価できること、連結板厚のパラメータの３乗に比例することが明らかにできたことである。

（３）波形鋼板ウェブＰＣ橋の床版２次曲げ応力の評価

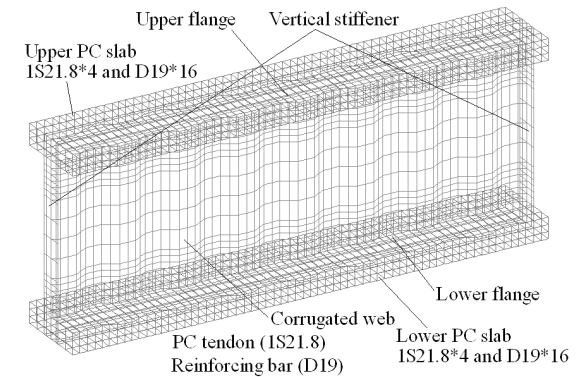
最近、ＰＣ箱桁橋のウェブを、プレストレスの導入が効率的に行える波形鋼板で置き換えることにより、軽量化を計り下部構造への負担を軽減する構造法が採用されている。カンチレバーＰＣ橋に限定せず、エキストラドーズド橋（栗東橋）、ＰＣ斜張橋（矢作川橋梁）の桁としても適用され始めた。

この形式の桁を採用するにあたって実施された模型実験や施工管理のために行われた有限要素解析によって、波形鋼板ウェブ構造の特徴がある程度明らかにされていた。この特徴とは集中荷重作用点や中間支点においてコンクリート床版の局部的曲げ応力が顕著に現れることで、この現象を重ねばりのようであると表現されていた。

この桁は重ねばりではない。床版の２次曲げが顕著に現れるのは支点部を含め集中力の作用点近傍に限定され、一般部では通常のはりと同様の挙動を呈する。上下コンクリート床版をフェーシング材、波形鋼板ウェブをコア材とする前述の積層ばりの曲げ理論によってこの問題を説明することができる。

図－１６は波形鋼板ウェブＰＣ桁の１／３縮尺模型実験供試体で載荷は３点曲げである。たわみの解は第３章の式（１１）で示したが、各部が分担するせん断力の分布、コンクリート床版の曲げモーメント分布、集中荷重作用点の断面内の曲げひずみ分布を図中に示した。床版の曲げモーメント自体は小さいが曲げひずみは集中荷重作用点の近傍で急増し、この部分の応力分布は重ねばりのように見える。

ＰＣ斜張橋の桁に波形鋼板ウェブＰＣ構造を適用した例について、有限要素解析結果と拡張はり理論をベースとしたマトリックス変位法の結果を比較して図－１７に示す。中間支点部とケーブル段数が少ない場合にはケーブルと桁の定着部に集中力作用点の特性が現れる。拡張はり理論を複雑な構造に適用するための３連モーメント公式を２重３連モーメント公式 (Dual Three Moment Equation) およびＣＷＢマトリックス変位法と称している。



図－１６ 波形鋼板ＰＣ桁の実験モデル

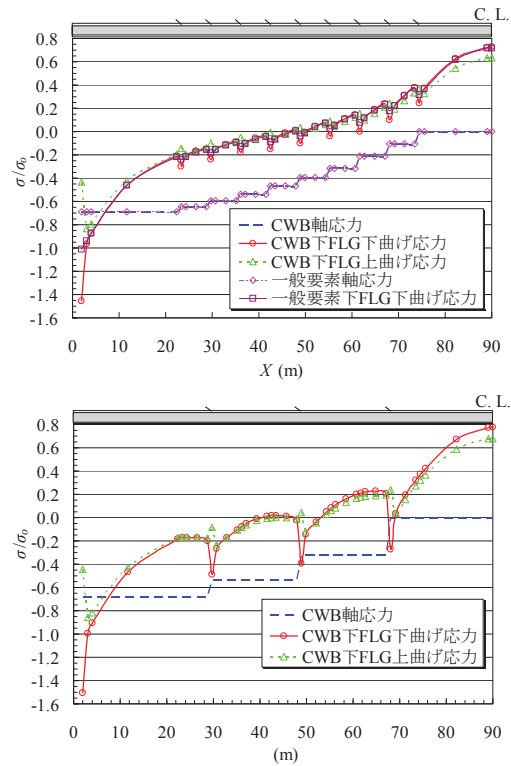


図-17 波形鋼板ウェブP-C斜張橋の床版応力

(4) 鋼逆π形断面合成桁橋架設時の合成床版底鋼板による補剛効果

一般に開断面箱桁橋と称されている合理化桁橋の呼称をより正確に表現するため、鋼逆π形断面合成桁橋とした。この橋梁構造の架設時（床版コンクリート打設時）では抵抗断面は開断面の鋼桁のみであり、平面曲率を有する場合や非常駐車帯が設けられることにより床版重量が偏心作用する場合など、ねじれやすい構造となる。そこで開断面としての高いねじれ剛性に期待して、合成床版の底鋼板を鋼桁フランジと連結して図-18のような疑似閉断面を構成する工法が採用されている。

鋼桁フランジと底鋼板との連結材の配置や剛性および底鋼板間の連結状態により開断面

として機能する換算板厚が異なる。底鋼板における局部変形も影響するので換算板厚の評価のために有限要素解析が必要であるが、疑似閉断面としてのねじり変形の計算には、以下の薄肉開断面ばりのそりねじりに関する弾性方程式を利用できる。

$$EC_w \phi^{IV} + (GJ_o + GJ_c) \phi'' = m_t \quad (5)$$

ここに、 EC_w ：開断面のそり剛性、 GJ_o ：開断面のSt.Venantねじり剛性、

GJ_c ：閉断面ねじり剛性

側径間の床版コンクリート打設が終了し閉断面としての剛性が発揮された後、非常駐車帯を有する中央径間のコンクリートを打設する条件で、径間内のねじれ角分布を計算した。

図-19に示すように、式(5)の簡単な計算でFEMと同程度の精度で評価できている。

図-20は底鋼板の換算板厚とねじれ角最大値の関係を表している。複数の合成床版の底鋼板についてスタッドとπ形金具を連結材として使用した場合の底鋼板換算板厚の範囲も併せて示した。

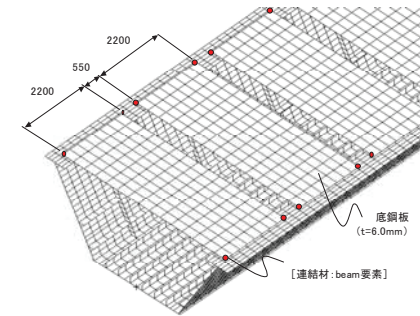


図-18 底鋼板による疑似閉断面の構成

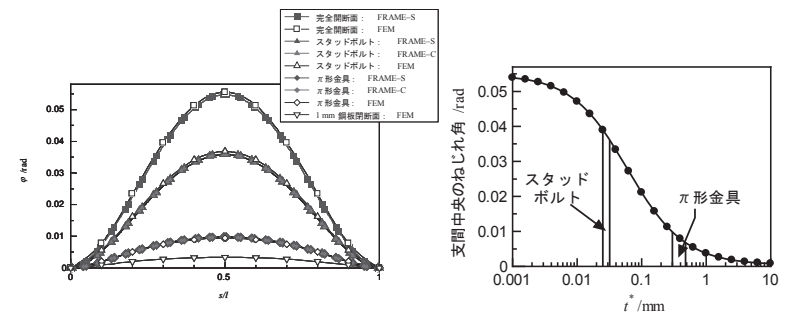


図-19 ねじれ角分布

図-20 底鋼板の換算板厚とねじれ角

5. 進化する構造力学

(1) 解析ソフトの変遷

前後期コンピュータ時代の35年間は解析ソフトの開発に明け暮れた。前半の15年位は自らソフトを作ったが、後半の20年間ではソフト開発は学生に任せ、注文を付けるだけでソフトの中身は見ないことにした。これまでに作成した主な構造解析ソフトとその作成に深く関与した卒業生の名前を挙げて、感謝の意を表したい。

・SUSP (中川知和君)

マトリックス変位法による吊橋の立体解析ソフト

連続補剛吊橋(南備讃瀬戸吊橋)の立体解析, 吊橋の架設工法の検討, 吊橋における部材長誤差の評価, デュアル形式吊橋の立体解析

・NAFRAM (大野正人君)

薄肉断面部材からなる鋼骨組構造物の複合非線形解析ソフト

Ver. 1 開断面, Ver. 2 閉断面

側道2主桁橋の耐荷力, 鋼部材の基本強度(柱, はり), 組み合わせ断面力を受ける鋼部材の相関強度, 斜張橋(鳥飼・仁和寺大橋)の耐荷力, 単弦トラスドアーチの耐荷力, 補剛アーチの耐荷力, トラス圧縮材の有効座屈長さ, 合理化桁橋架設系の耐荷力

・NAPLAT (西村良司君)

鋼薄板構造の局部座屈強度解析ソフト

・OLFRAM (西出俊亮君, 吉田信博君)

NAFRAMとNAPLATの結合解析ソフト

箱形断面・H形断面圧縮部材の全体・局部連成座屈強度, I形断面はりの横ねじれ変形と板要素の局部変形の連成座屈強度

・NASTAP (村上茂之君)

8節点アイソパラメトリックシェル要素を用いたシェル構造の複合非線形解析ソフト

電縫鋼管の冷間加工による材料特性と残留応力の変化, 腐食による有孔・減厚鋼管の座屈強度, 製作鋼管の製作工程を考慮した座屈強度, 変厚鋼板・補剛板の圧縮強度

・CYNAS (池内智行君)

鋼材の塑性履歴構成則(西村・小野・池内BMCモデル)を考慮した薄板構造の繰り返し

塑性履歴解析ソフト

鋼管橋脚の兵庫県南部地震による損傷シミュレーション, 矩形断面鋼製橋脚の繰り返し塑性履歴, 隅角部を含む鋼製ラーメン橋脚の地震時挙動

・DYNAFRAM (宇井崇君, 大呑智正君)

NAFRAMの動的応答解析バージョン(BMCモデル)

高橋脚橋梁の地震時動的応答解析

跨座型モノレール軌道桁橋梁の地震時応答解析

・SABOL (高木優任君, 池端文哉君)

20節点アイソパラメトリックソリッド要素による高力ボルト摩擦接合継手の限界強度(滑りと降伏の相互作用)解析ソフト

引張を受ける高力ボルト摩擦接合継手の滑り限界と降伏, 高力ボルト摩擦接合継手のすべり以降の支圧強度, 多列ボルト継手の滑り限界強度, 超高力ボルト摩擦接合継手の限界強度, ボルト・溶接併用継手の施工方法

・SABOR-ORTH (宇井崇君, 三好崇夫君)

直交異方性材料を用いた合成構造の耐荷力解析ソフト

炭素繊維強化樹脂板接着による鋼板・補剛板の圧縮強度と変形能の改善
CFRPケーブルの長大吊橋への適用性

・OLFRAM-NASTAP (小池洋平君)

OLFRAMの拡張バージョン

鋼桁の曲げ・せん断強度, 腐食鋼板の残存強度, 鋼逆π形断面桁の耐荷力

・SUSPD (織田敏彰君)

風による吊橋の動的応答解析ソフト

自然風下における長大吊橋の安定性解析(フラッターとパフエッティング)

・COLLIS (大澤和也君)

地震による構造物間の衝突解析ソフト

跨座型モノレール軌道桁支承部品の地震時損傷シミュレーション

・SLIPDF (権映録君)

直接基礎構造物の地震時滑動解析ソフト

立体交差橋梁の地震時安全性の評価

（２）構造力学段階位制

表－４に構造力学段階位制というバーチャル・グレードを書いてみた。大学における学部教育では６級の構造動力学までは教えているが、実務の設計技術者に求められる知識レベルとしては不十分である。しかしそこまでの基礎知識があれば、それ以上の段階位への昇級は独学でも可能である。

大学院博士前期課程（修士）では１級の有限要素法までは教えている。拡張はり理論や同理論の有限要素法との融合については、大阪大学大学院では教えているが、学部卒業者や他大学の出身者は受講する機会が与えられていない。

構造解析のプロと呼ばれるのは三段以上の高段者であり、最先端の有限要素解析や力学現象の解析の体験者である。土木技術者で高段位に該当する人は少ない。それでも計算会社のＳＥとして仕事をしている土木技術者は少なくないのは何故であろうか。多分、計算会社が扱う構造解析レベルは多様であって、表－４の段階位の上位のみが求められ訳ではないからであろう。

現状における大学の土木工学科における教育だけでは構造力学教育は不十分である。この４０年間ににおける大学カリキュラムの動きを振り返ってみると、ゆとり教育の名の下に総授業時間の削減、土木工学の多様化を目指した計画系・環境系・総合科目の増加により、年々高度な構造解析が必要となっているにも拘わらず、構造力学系科目は減少傾向にある。独学で知識を獲得することも日常業務に忙殺され難しい。このような現状の解決策として２つの方法が考えられる。

１）構造工学を専門とする学科で構造に特化した教育を行う。

ゆとり教育や多様化の次に求められているのは特徴ある教育であり、全ての大学が総合土木工学を目指す必要はなく、構造に特化して土木構造工学を目指す大学があって良い。

２）社会人教育を充実させ、大学卒業後も継続的に構造力学教育を行う。

２０代、３０代にサービス残業をセーブして、自己の力学能力をグレードアップするための自己投資を薦める。そのような要望に対応する教育システムの受け皿造りを必要としている。一部の私立大学は都心に社会人教育専用のサテライトキャンパスを造り、大学院後期レベルの教育を行おうとしている。１年間で１段、３年で３段程度構造力学能力をグレードアップすることが可能である。

最近、各種の構造設計に性能照査型設計法の導入の動きが見られる。従来の設計法との相違点は、要求される性能に対する保証の方法を設計者の裁量によって決め提案できるところにある。そのことにより技術革新を推進する狙いがあるが、設計者に相当の技術力を求めることになる。

また建設業全体の改革論に関連して、品質保証が重要視されるようになり、その過程で設計照査のレベル向上が議論されている。このような建設業界全体の動きを考えると、橋梁設計という技術は“誰もが設計できる技術”から、“有資格者のみが設計できる技術”へと変わって行くように思える。

- ・ 競争原理の中で新技術を育む設計力が求められる。
- ・ 高齢化社会における工事量の縮小により、社会の労働力再配分が加速される。

表－４ 構造力学段階位制

七段	アダプティブ有限要素法	
六段	空力弾性問題の数値解析	
五段	衝突・衝撃現象の数値解析	
四段	亀裂伝播解析	
三段	構造・流体連成解析	
二段	境界要素法	
初段	塑性論・非線形計算法	
１級	有限要素法（高次要素）	連続体解析特論
２級	有限要素法（線形要素）	連続体解析特論
３級	拡張はり理論	構造解析特論
４級	構造安定論	構造安定特論
５級	薄肉構造理論	構造解析特論
６級	構造動力学	土木動力学
７級	マトリクス変位法	マトリクス構造解析法
８級	連続体の力学（弾性論）	連続体力学
９級	初等構造力学（不静定構造編）	構造力学Ⅱ
１０級	初等構造力学（静定構造編）	構造力学Ⅰ
学部科目		大学院博士前期科目

以上

最終講義 コンピューター時代の構造力学教育

西村宣男

1. 大学における構造力学教育の変遷
2. 教科書に書いていない構造力学
3. 拡張はり理論
4. 拡張はり理論と有限要素法の融合
5. 進化する構造力学

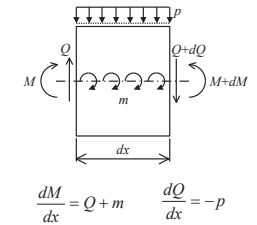
1. 大学における構造力学教育の変遷

1. 1 プレコンピュータ時代（～1967）
1. 2 前期コンピュータ時代（1968～1982）
1. 3 後期コンピュータ時代（1984～現在）

2. 教科書に書いていない構造力学

2. 1 分布モーメント荷重
2. 2 はりのせん断変形
2. 3 非対称断面はりの曲げ応力

2. 1 分布モーメント荷重



1. 1 プレコンピュータ時代（～1967）

計算尺、手廻し計算機、函数表

はり置換モデル、板置換モデル

薄肉弾性はり理論、直交異性板理論

ガラーキン法、付帯条件付き変分法、級数解法

1. 2 前期コンピュータ時代（1968～1982）

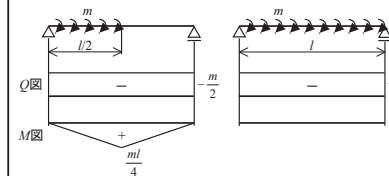
全国利用大型計算機センター
京都大学大型計算機センター（～1975）週2回京都へ通う
大阪大学大型計算機センター（1976～）計算センター浸り

電算カードとカードリーダー、TSS

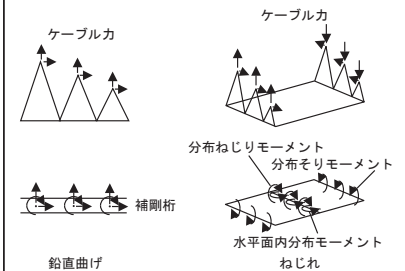
マトリックス変位法、有限要素法、有限変位理論、弾塑性

教育用コンピュータ環境の不整備にジレンマ

分布モーメント荷重によるはりの断面力の例



斜めハンガー吊橋



1. 3 後期コンピュータ時代（1983～現在）

コンピュータ環境の整備が進む

パソコン・WS-スバコンのネットワーク

教育用コンピュータの導入

学部の情報処理教育
力学科目におけるコンピュータの活用
ソフトウェアの充実

構造力学関連科目の変遷

安宅時代	小松時代	西村時代
構造力学1（小坂）2 構造力学2（舘尾）4 構造力学3（波田）2	構造解析学I（西村）2 構造解析学II（小松）4 マトリックス 応用弾性学（伊藤）2 振動学（鳥海）2	構造力学I（小野）2 構造力学II（西村）2 マトリックス 構造解析（金）2 連続体力学（西村）2 土木動力学（西村・阿部）2
110分	100分	90分
数字は単位数		

2. 2 せん断変形を考慮したはりの曲げ

曲げに関する弾性方程式

$$EIv^{IV} = p - \kappa \frac{EI}{GA} p''$$

ここに、

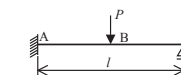
EI : 曲げ剛性

GA : せん断剛性

κ : 断面形状に関する係数

$$\kappa = \frac{1}{A} \int_A K^2(y) dA$$

せん断パラメータ

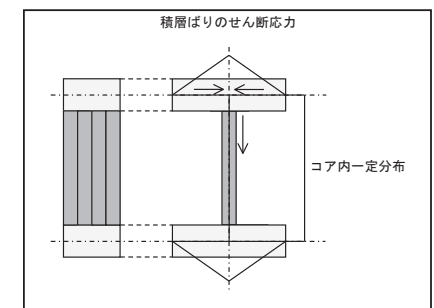
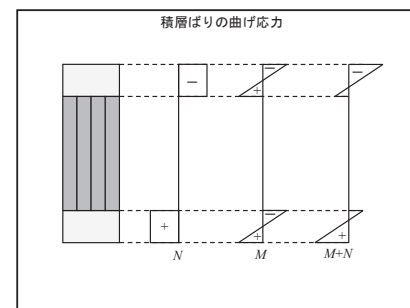
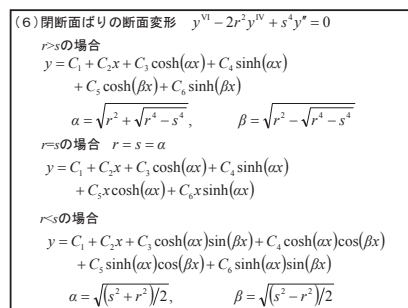
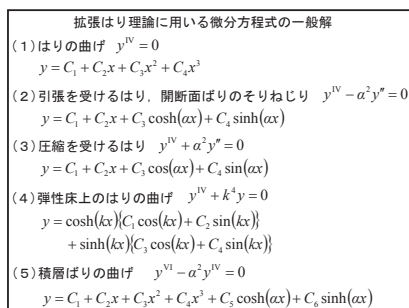
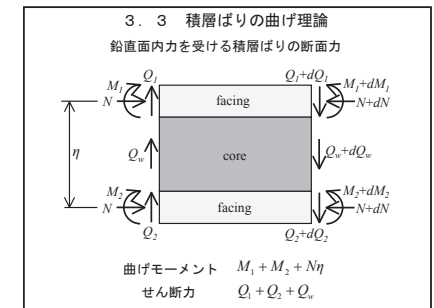
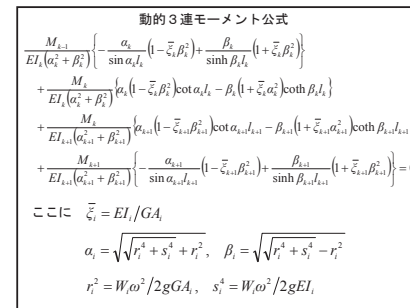
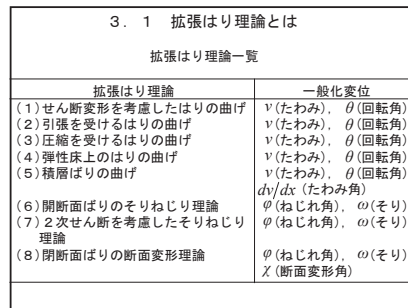
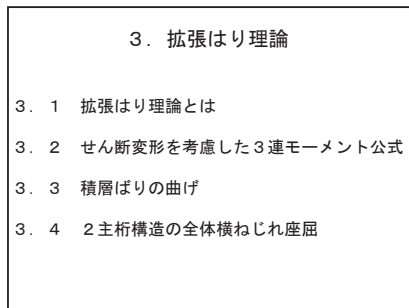
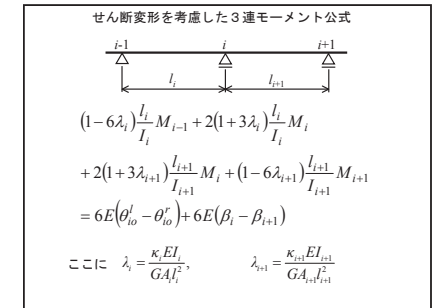
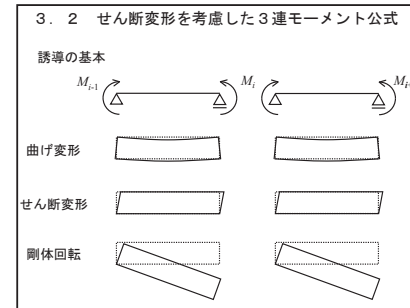
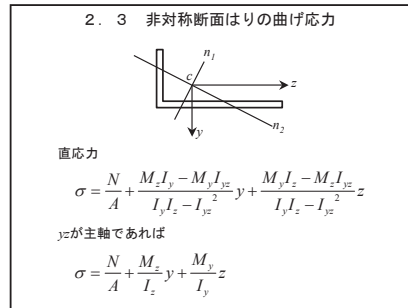
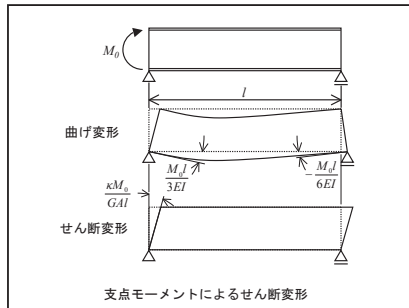


固定端における回転変位の適合

$$\left(\frac{l}{3EI} + \frac{\kappa}{GA} \right) M_A + \frac{Pl^2}{16EI} = 0$$

$$\frac{M_A}{Pl} = -\frac{3}{16(1+3\lambda)}$$

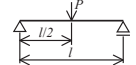
ここに $\lambda = \frac{\kappa EI}{GA l^2}$: せん断パラメータ

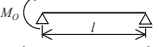


積層ばりの鉛直面内曲げに関する弾性方程式

$$v^{VI} - \alpha^2 v^{IV} = -\frac{1}{EI_n} \frac{h_g}{h} \frac{GA_n}{EI_f} p + \frac{p''}{EI_f}$$

$$\text{ここに } \alpha^2 = \frac{I_g}{I_n} \cdot \frac{h_g}{h} \cdot \frac{GA_n}{EI_f}$$



$$v \frac{EI_g}{PI^3} = \frac{1}{16} \left\{ 1 + \frac{I_n}{I_f} \frac{8}{(al)^2} \right\} \frac{x}{l} - \frac{1}{12} \left(\frac{x}{l} \right)^3 - \frac{I_n}{I_f} \frac{1}{(al)^2} \frac{\sinh(\alpha x)}{2 \cosh \frac{\alpha l}{2}}$$


$$v \frac{EI_g}{M_0 l^2} = \left\{ \frac{1}{6} - \left(1 - \rho \frac{I_g}{I_f} \right) \frac{1}{(al)^2} \right\} \frac{x}{l} - \frac{1}{6} \left(\frac{x}{l} \right)^3 + \left(1 - \rho \frac{I_g}{I_f} \right) \frac{1}{(al)^2} \frac{\sinh(\alpha x)}{\cosh(al)}$$

$0 \leq x \leq \frac{l}{2}$

大雲橋の鑑定

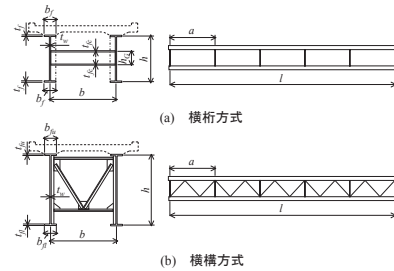
表-2 比較計算例2

Method	Support condition	F-S	S-S
BUCK-PG	Varsatile section	3.615t/m	2.878t/m
Simplified formula Eq. (16) or Eq. (19)	Centre section	4.120t/m (1.140)	3.190t/m (1.108)
	Arithmetical Mean section	2.977t/m (0.824)	2.291t/m (0.796)
	Mechanical Mean section	3.546t/m (0.981)	2.819t/m (0.979)
Numerical values in () : Simplified formula/BUCK-PG			

4. 拡張はり理論と有限要素法との融合

4. 1 照査のための構造力学
4. 2 高力ボルト摩擦接合継手における肌すきの影響評価
4. 3 波形鋼板ウェブPC桁橋の床版2次曲げ応力の評価
4. 4 鋼逆π型断面合成桁橋架設系の合成床版底鋼板による補剛効果

3. 4 2主桁側道橋の架設時全体横ねじれ座屈理論



横析連結形式の座屈方程式

$$EI_y u^{IV} - EK u^{VI} + \{M_x \phi\}'' - \frac{\kappa}{2} \{M_x \phi\}^{IV} = 0$$

$$M_x u'' - GJ^2 \phi'' + EC_w \phi^{IV} - p_y \phi_y \phi = 0$$

4. 1 照査のための構造力学

設計照査技術の大切さの再認識が必要

品質保証

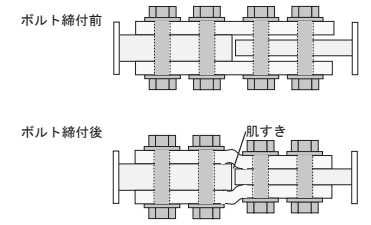
構造設計における照査システム

社内照査・発注者協議・第3者照査

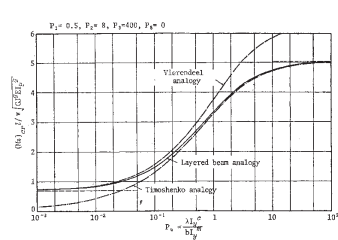
照査技術能力を育むために

弾性設計
初等構造力学・拡張はり理論
応力集中・局部板曲げ

4. 2 高力ボルト摩擦接合継手における肌すきの影響評価



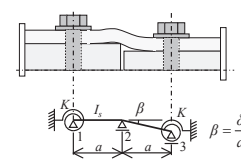
アナロジーの比較



横構連結形式の座屈方程式

$$EI_y^2 u^{IV} + E \left[2 \left\{ I_y^2 \left(\frac{h}{2} + e_s \right) - I_y^2 \left(\frac{h}{2} - e_s \right) \right\} - \left\{ A_n e_s + (A_n - A_p) \frac{h}{2} \right\} \frac{b}{2} \right] u^{IV} + \{M_x \phi\}'' - \frac{EA b^2}{2Gb t_s} \{M_x \phi\}^{IV} = 0$$

$$EC_w \phi^{IV} - GJ^2 \phi'' + 2E \left\{ I_y^2 \left(\frac{h}{2} + e_s \right) - I_y^2 \left(\frac{h}{2} - e_s \right) \right\} u^{IV} - E \left\{ A_n e_s + (A_n - A_p) \frac{h}{2} \right\} \frac{b}{2} u^{IV} + M_x \phi'' - 2\beta_s \{M_x \phi\}' - p_y \phi_y \phi + \frac{Eb^2 \{2A_n e_s + (A_n - A_p) h\}}{4Gb t_s} \{M_x \phi\}^{IV} = 0$$



肌すき現象の評価モデル

支点3の反力

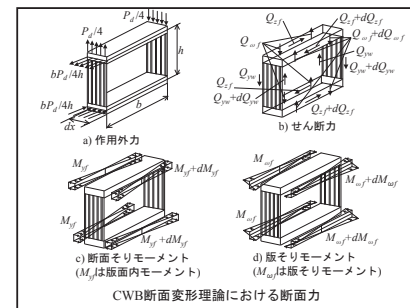
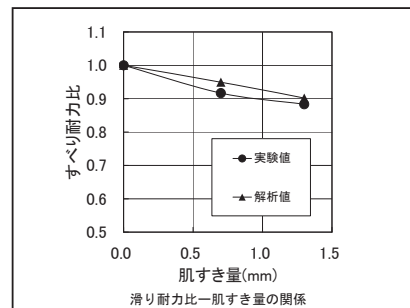
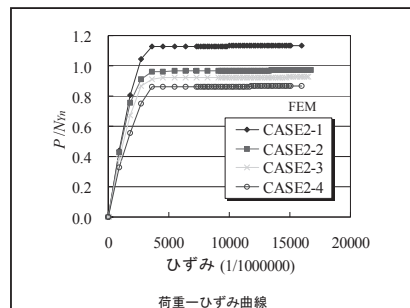
$$\frac{R_3}{P_0} = C \cdot \frac{E}{\sigma_B} \cdot \frac{b \delta}{A_n a} \left(\frac{t_s}{a} \right)^3$$

最内列のボルト接触圧

$$1 - \frac{R_3}{P_0} \quad \text{ただし} \quad \frac{R_3}{P_0} < 1$$

N列ボルト継手における有効接触圧

$$1 - \frac{R_3}{NP_0} \quad \text{ただし} \quad \frac{R_3}{P_0} < 1$$

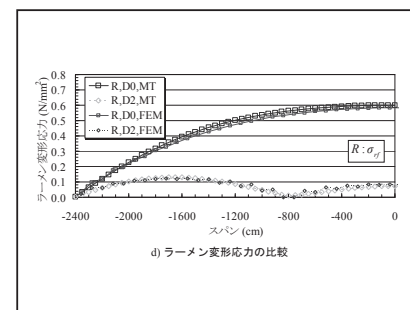
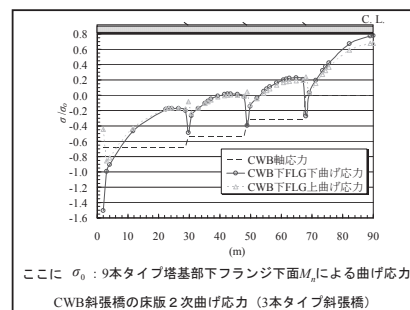
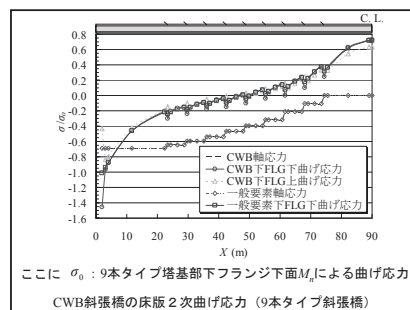
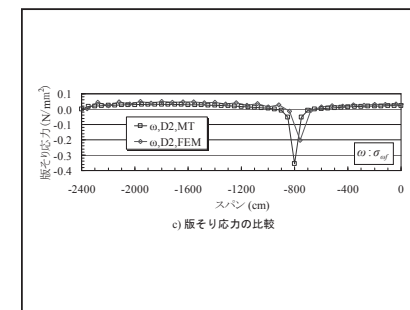
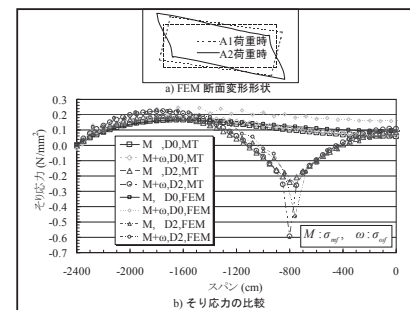
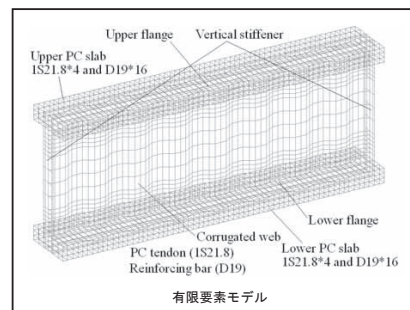


断面変形の弾性方程式

$$\chi_w^{VI} = \frac{b^2 h}{2} \frac{G_w A_w}{h_w \kappa_w E_f I_{wf}} \frac{I_{wg}}{I_{wN}} \chi_w^{IV} = -\frac{b^2 h}{2} \frac{G_w A_w}{h_w \kappa_w E_f I_{wf}} \frac{1}{E_f I_{wN}} (m_x - C\chi) + \frac{1}{2} \frac{1}{E_f I_{wf}} (m_x'' - C\chi'')$$

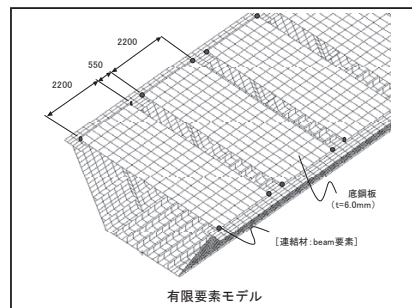
4. 3 波形鋼板ウェブPC橋の床版2次曲げ

波形鋼板ウェブのアコーディオン効果（軸方向の抵抗が小さい）
 荷重集中点近傍（集中荷重・ケーブル定着部・中間支点）で重ね
 ばり挙動
 積層ばりで6層の微分方程式で記述できる



4. 4 鋼逆π形断面合成箱桁の合成床版底鋼板
 による補剛効果

架設時の開断面に底鋼板を連結して擬似閉断面をなす
 開断面のそり変位の拘束と循環せん断流による高いねじり剛性
 非常駐車帯を含む区間の床版コンクリート打設時の
 ねじり変形防止
 曲線区間への鋼逆π形断面合成箱桁の適用限界
 微分方程式の閉じた解、マトリックス変位法、有限要素法

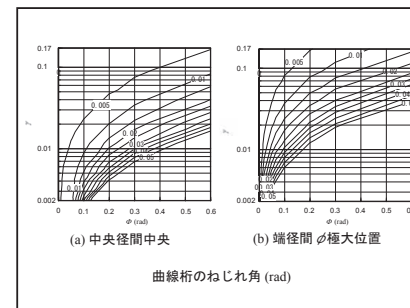


擬似閉断面材のねじり弾性方程式

$$EC_w \phi^{IV} + (GJ_0 + GJ_c) \phi'' = m_t$$

ここに $J_0 = \frac{1}{3} (bt_f^3 + 2ht^3 + bt^{*3})$

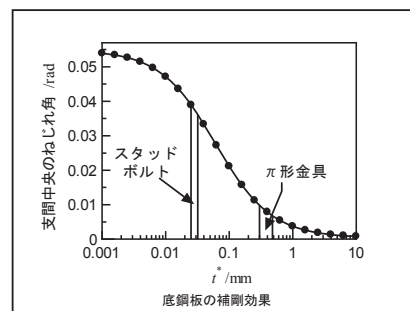
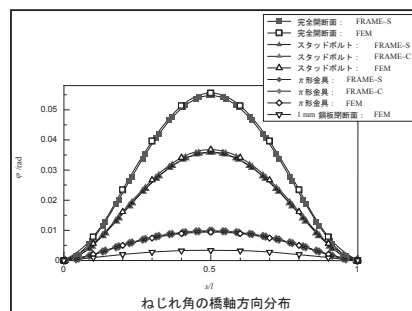
$$J_c = \frac{(2F)^2}{b} t^*$$



5. 進化する構造力学

5.1 解析ソフトの変遷

5.2 構造力学段階位制



5.1 解析ソフトの変遷

NAFRAM 大野正人君
鋼薄肉骨組構造の3次元複合非線形解析ソフト
Ver.1 薄肉閉断面 Ver.2 薄肉閉断面
側道2主桁橋の横ねじれ座屈
鋼部材の基本強度
組み合わせ断面材に対する相関強度
トラス圧縮材の有効長さ
斜張橋の耐力
アーチ橋の耐力
合理化桁橋の架設時耐力

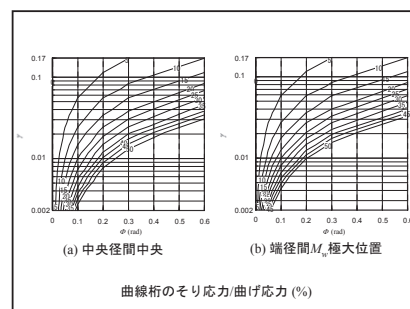
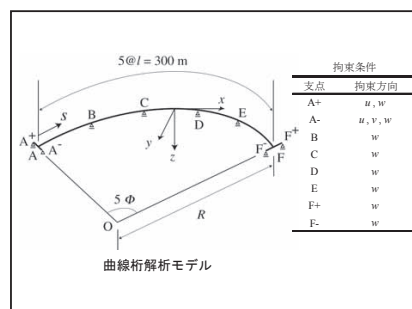
OLFRAM 吉田信博君
鋼部材の全体・局部座屈強度解析ソフト
圧縮材の座屈強度
曲げ部材の座屈強度

NASTAP 村上茂之君

鋼薄板構造の複合非線形解析ソフト
(8節点アイソパラメトリックシェル要素)
変厚鋼板・補剛板の圧縮強度
有孔鋼管の座屈強度

OLFRAM-NASTAP 小池洋平君
鋼部材の全体・局部座屈強度解析ソフト
(8節点アイソパラメトリックシェル要素)
鋼桁の曲げ・せん断強度
腐食鋼桁の残存強度
鋼逆π形断面材の耐力

CYNAS 池内智行君
繰り返し塑性履歴構成式を考慮したシェル構造の非線形解析ソフト
鋼製橋脚の耐震性能評価
隅角部を含む鋼製ラーメン橋脚の耐震性能評価



DYNAFRAM 大香智正君

NAFRAMの動的応答解析バージョン
高橋脚橋梁の地震時動的応答解析
モノレール橋梁システムの地震応答解析

SABOL 高木優任君・池端文哉君
高力ボルト摩擦接合継手の限界強度解析ソフト
(20節点アイソパラメトリックソリッド要素)
引張を受ける高力ボルト摩擦接合継手のすべり限界と降伏
高力ボルト摩擦接合継手のすべり以降の支圧強度
多列ボルト継手のすべり限界
超高強度ボルト摩擦接合継手の限界強度
ボルト・溶接併用継手の限界強度

その他 衝突解析
スリップ解析

5.2 構造力学段階位制

七段	アダプティブ有限要素法	連続体解析特論
六段	空力弾性問題の数値解析	連続体解析特論
五段	衝突・衝撃現象の数値解析	構造安定特論
四段	亀裂伝播解析	構造安定特論
三段	構造・流体連成解析	構造力学
二段	境界要素法	土木力学
初段	塑性論・非線形計算法	マトリックス構造解析法
1級	有限要素法 (高次要素)	連続体解析特論
2級	有限要素法 (線形要素)	連続体解析特論
3級	拡張はり理論	構造安定特論
4級	構造安定理論	構造安定特論
5級	薄肉構造理論	構造力学
6級	構造力学	土木力学
7級	マトリックス変位法	マトリックス構造解析法
8級	連続体の力学 (弾性論)	連続体力学
9級	初等構造力学 (不静定構造編)	構造力学Ⅱ
10級	初等構造力学 (静定構造編)	構造力学Ⅰ

____ 学科科目 _____ 大学院博士前期科目

論文目録

西村宣男略歴

1941年12月9日（昭和16年）山口県岩国市にて生まれる
1960年3月（昭和35年）修道高等学校卒業
1961年4月（昭和36年）大阪大学工学部構築工学科入学
1965年3月（昭和40年）大阪大学工学部構築工学科卒業
5月 大阪大学工学部助手（構築工学科）
1972年2月（昭和47年）大阪大学工学部講師（土木工学科）
1986年1月（昭和61年）大阪大学 工学博士
1986年5月（昭和61年）大阪大学工学部助教授
1990年9月（平成2年） 大阪大学工学部教授
1998年4月（平成10年）大阪大学大学院工学研究科教授
2005年3月（平成17年）退職
2005年4月 大阪大学名誉教授

受賞

土木学会田中賞論文賞“トラスおよび補剛トラスを有する吊橋の立体的力学特性と実用設計法”，1976.
日本鋼構造協会業績賞“ジャッキアップ回転工法による鋼桁橋の架設”，2000.
日本鋼構造協会論文賞“断面に欠損を生じた円形鋼管部材の残存強度の評価法”，2002.

公職

土木学会	理事 鋼構造委員会委員長 論文編集委員会副委員長 論文賞選考委員会副委員長
日本鋼構造協会	学術委員会委員長 鋼構造シンポジウム運営委員会委員長 半地下道路技術の研究小委員会委員長
日本道路公団	橋梁委員会委員
本州四国連絡橋公団	技術委員会委員
日本モノレール協会	跨座型モノレール鋼軌道桁検討委員会委員長
大阪府	阪南2区連絡橋技術委員会委員長
大阪市	本庄長柄線検討委員会委員
日本橋梁・鋼構造物塗装技術協会	理事

大阪大学土木構造研究室

高力ボルト摩擦接合継手に関する研究BOL

(1) 高力ボルト摩擦接合継手の引張強度に関する研究

BOL-1 秋山寿行・西村宣男・亀井義典：高力ボルト摩擦接合引張継手の限界状態区分、鋼構造年次論文報告集，Vol. 3，289-296，1995. 11.

BOL-2 Nishimura,N.,Kamei,Y.,Ikehata.B. : Elasto-Plastic Analysis of HSFG Bolted Joints Considering Local Slip , Technology Reports of Osaka University,Vol.46,No.2257,227-236,1996.10.

BOL-3 亀井義典・池端文哉・西村宣男：高力ボルト摩擦接合引張継手の限界強度区分に関する解析的研究，土木学会論文集，No. 584/I-42，243-253，1998. 1.

BOL-4 亀井義典・松野正見・西村宣男：多列高力ボルト摩擦接合引張継手のすべり強度に関する解析的研究，土木学会論文集，No. 640/I-50，49-60，2000. 1.

BOL-5 亀井義典・西村宣男：高力ボルト摩擦接合継手の主すべり以降の挙動，鋼構造論文集，Vol. 8，No. 31，17-29，2001. 9.

BOL-6 亀井義典・今田滋則・西村宣男：高力ボルト摩擦接合継手の信頼性評価，鋼構造年次論文報告集，Vol. 12，445-452，2004. 11.

(2) 高力ボルト摩擦接合継手の曲げ強度に関する研究

BOL-7 秋山寿行・西村宣男・松村達生・大塚勝：プレートガーダー高力ボルト継手部腹板の補剛方法の合理化，構造工学論文集，Vol. 40A，317-329，1994. 3.

BOL-8 秋山寿行・西村宣男・亀井義典・大松彰吾：鋼I桁の高力ボルト継手部腹板の補剛構造の合理化に関する研究，鋼構造年次論文報告集，Vol. 2，179-186，1994. 11

BOL-9 西村宣男・秋山寿行・亀井義典・高木優任：鋼I桁の高力ボルト摩擦接合曲げ継手部の限界状態に関する実験，鋼構造年次論文報告集，Vol. 1，23-30，1993. 7.

BOL-10 秋山寿行・西村宣男：曲げを受ける鋼I桁高力ボルト継手のすべり機構と限界強度の評価，鋼構造年次論文報告集，Vol. 4，287-294，1996. 11.

BOL-11 石川誠・亀井義典・西村宣男：曲げを受ける鋼桁高力ボルト継手部の限界強度に関する解析的研究，土木学会論文集，No. 759/I-67，157-170，2004. 4.

(3) 特殊高力ボルト摩擦接合継手の限界強度に関する研究

BOL-12 亀井義典・池端文哉・西村宣男：低材質フィラープレートを用いた高力ボルト摩擦接合継手の限界状態，構造工学論文集，Vol. 43A，65-72，1997. 3.

BOL-13 石川誠・亀井義典・西村宣男・秋山寿行：千鳥配置された高力ボルト摩擦接合継手の強度と荷重伝達機構，構造工学論文集，Vol. 48A，1-9，2002. 3.

BOL-14 今田滋則・亀井義典・西村宣男：拡大孔を有する高力ボルト摩擦接合継手の挙動と限界強度，鋼構造年次論文報告集，Vol. 10，255-262，2002. 11.

(4) LP鋼板用高力ボルト摩擦接合継手に関する研究

BOL-15 亀井義典・中村貴史・秋山寿行・高木優任・西村宣男：等厚部を省略したLP鋼板の高力ボルト摩擦接合継手のすべり強度試験，構造工学論文集，Vol. 46A，1241-1250，2000. 3.

(5) 高力ボルト・溶接併用継手に関する研究

BOL-16 中村貴史・西村宣男・亀井義典・雨森慶一・新井正樹：高力ボルト・溶接併用継手における高力ボルト施工法に関する検討，鋼構造年次論文報告集，Vol. 7，351-356，1999. 11.

(6) 超高強度ボルトに関する研究

BOL-17 亀井義典・石川誠・西村宣男・桐生真司・竹内修治：超高強度ボルトの鋼桁橋への適用性に関する検討，鋼構造論文集，Vol. 10，No. 38，39-49，2003. 6.

(7) 総括研究

BOL-18 西村宣男・秋山寿行・亀井義典：高力ボルト摩擦接合継手に関する最近の研究動向，土木学会論文集，No. 675/I-55，1-14，2001. 4.

BOL-19 石原靖弘・小林剛・皆田理・西村宣男：地震被害を受けた高力ボルト摩擦接合継手の特性調査と繰返しすべり実験，土木学会論文集，Vol. 745/I-65，54-64，2003. 10.

トラス・吊橋・斜張橋に関する研究SUS

(1) 補剛トラスを有する吊橋における吊構造のせん断変形に関する研究

- SUS-1 小松定夫・西村宣男：吊構造の横断面変形を考慮した吊橋の立体解析，土木学会論文報告集，No. 236, 13-29, 1975. 4.
- SUS-2 小松定夫・西村宣男：横荷重を受ける吊橋の変形と応力について，土木学会論文報告集，No. 248, 55-67, 1976. 4.
- SUS-3 Komatsu,S., Nishimura,N. : Effects of shear deformation on vertical and horizontal bending in suspension bridges, Technology Reports of Osaka University, Vol.26, No.1304, 311-328, 1976.
- SUS-4 小松定夫・西村宣男・中川知和：グループ変形法による吊橋の立体解析，土木学会論文報告集，No. 279, 1-13, 1978. 11.
- SUS-5 小松定夫・西村宣男：長大吊橋の固有振動に対する吊構造のせん断変形の影響，土木学会論文報告集，No. 323, 29-40, 1982.
- SUS-6 Nishimura,N., Take,N. : Mechanical parameters on structural characteristics of long span suspension bridges, EASEC4, 1993.

(2) 新形式吊橋に関する研究

- SUS-7 Komatsu,S., Nishimura,N., Minami,K. : Structural characteristics of suspension bridges with inclined hangers, Technology Reports of Osaka University, Vol.21, No.1023, 705-726, 1971.
- SUS-8 Take,N., Kitani,M., Konishi,H., Nishimura,N. : Feasibility study on dual cable suspension bridges, Technology Reports of Osaka University, Vol.47, No.2276, 79-86, 1997.4.
- SUS-9 武伸明・木谷紋太・小西英明・西村宣男：新素材を適用したデュアルケーブル形式吊橋に関する考察，鋼構造年次論文報告集，Vol. 5, 1-8, 1997. 11.
- SUS-10 武伸明・松村達也・西村宣男：新素材を用いたデュアルケーブル形式吊橋のフラッター特性に関する考察，鋼構造年次論文報告集，Vol. 6, 273-278, 1998. 11.
- SUS-11 武伸明・松村達也・西村宣男：新素材を用いたデュアルケーブル形式吊橋のフラッター特性と経済性，日本計算工学会論文集，Vol. 1, 89-94, 1999. 5.

(3) トラス橋の立体解析法に関する研究

- SUS-12 小松定夫・西村宣男：トラスの立体的力学特性を考慮した強度設計について，橋梁構造工学研究発表会論文集，Vol. 20, 161-168, 1973.
- SUS-13 小松定夫・西村宣男：薄肉弾性ばり理論によるトラスの立体解析，土木学会論文報告集，No. 238, 1-16, 1975. 6.
- SUS-14 小松定夫・西村宣男：平行弦トラスの立体振動特性について，土木学会論文報告集，No. 297, 21-30, 1980. 5.
- SUS-15 Nishimura,N., Kawakami,M., Fujita,K., Fukumoto,Y. : Mechanical parameters governing structural behaviors of long span truss bridges, Proc.EASEC II, Bangkok, 1989.

(4) 斜張橋に関する研究

- SUS-16 牧野文夫・小松定夫・上田浩太・西村宣男：太径HiAmケーブル定着構造に関する研究，構造工学論文集，Vol. 31A, 341-350, 1985. 3.
- SUS-17 西村宣男・昼間康裕・石崎浩・小松定夫：鋼床版合成トラス斜張橋の主構弦材および鋼床版応力の実用算定式，構造工学論文集，Vol. 34A, 363-373, 1988. 3.
- SUS-18 内藤純也・西村宣男：2次曲げを考慮した斜張橋ケーブルの活荷重応力に関する研究，鋼構造年次論文報告集，Vol. 10, 111-117, 2002. 11.
- SUS-19 Naito,J., Nishimura,N. : Relationship between fatigue damage and cable safety factor for the steel cable-stayed bridges, 5th Japan-Germany Symposium on Steel and Composite Bridges, 287-394, 2003.9.
- SUS-20 内藤純也・西村宣男：鋼斜張橋ケーブルの疲労安全性と部材安全率に関する研究，土木学会論文集，No. 780, 1-70, 145-153, 2005. 1.

(5) CFRPケーブル・ケーブル安全率に関する研究

- SUS-21 三好崇夫・武伸明・西村宣男：超長大吊橋バンド部でのハイブリッド構成したCFCCの強度評価，鋼構造年次論文報告集，Vol. 8, 571-578, 2000. 11.
- SUS-22 三好崇夫・武伸明・西村宣男：CFRP wire と鋼線で構成した Hybrid cable の超長大吊橋ケーブルバンド部における強度評価，第1回FRP橋梁に関するシンポジウム論文集，95-102, 2001.
- SUS-23 Miyoshi,T., Nishimura,N., Take,N., Hwang,W.S. : Evaluation of strength for hybrid cable which composed CFRP wire and steel wire at the cable strap of ultra long span suspension bridges, Proc. of 1st International Conference on Steel and Composite Structures, Pusan, Vol.2, 1277-1284, 2001.

- SUS-24 三好崇夫。鷲塚敏之・西村宣男・内藤純也：ラップト及びアンラップト平行線ケーブルの力学挙動に関する実験，鋼構造年次論文報告集，Vol. 10, 119-126, 2002. 11.
- SUS-25 三好崇夫・鷲塚敏之・西村宣男：ワイヤラッピングされた平行線ケーブルの力学挙動に関する実験的研究，鋼構造論文集，Vol. 9, No. 36, 55-68, 2002. 12.
- SUS-26 内藤純也・西村宣男：中規模単径間吊橋主ケーブルの安全率に関する研究，鋼構造論文集，2005.
- SUS-27 三好崇夫・鷲塚敏之・西村宣男：超長大吊橋主ケーブルの活荷重二次応力に関する基礎的研究，鋼構造年次論文報告集，Vol. 12, 357-364, 2004. 11.

大阪大学土木構造研究室

鋼構造の耐荷力に関する研究 U L T

- (1) 側道 2 主桁橋の全体横ねじれ座屈強度に関する研究
- ULT-1 小松定夫・西村宣男・大野正人：横桁で連結した 2 主桁橋の全体横倒れ座屈特性と補剛設計法，土木学会論文報告集，No. 329, 69-79, 1983.
- ULT-2 Komatsu,S., Nishimura,N., Ohno,M. : Effect of local deformation on ultimate strength of ladder-like plate girder bridges, Technology Reports of Osaka University, Vol.32,No.1678,401-409,1982.10.
- ULT-3 小松定夫・西村宣男・中田憲正：横構・対傾構で連結された 2 主桁橋の全体横倒れ座屈簡易算定式，土木学会論文報告集，No. 341, 215-222, 1984.
- ULT-4 Komatsu,S., Nishimura,N. : Overall lateral instability of twin girder bridges with slender aspect ratio, Proc. of 3rd International Colloquium on Stability of Metal Structures, Paris, 149-156,1983.11.
- ULT-5 小松定夫・西村宣男・中田憲正：側道 2 主桁橋架設系の全体横倒れ極限強度式と補剛設計，構造工学シンポジウム論文集，Vol. 30, 205-211, 1984.
- (2) 薄肉部材の連成座屈強度に関する研究
- ULT-6 西村宣男・小松定夫・西出俊亮・西村良司：局部座屈を考慮した鋼箱形断面柱の設計公式，構造工学論文集，Vol. 33A, 171-182, 1987. 3.
- ULT-7 西村宣男・吉田信博：鋼 H 形断面柱部材の連成座屈強度特性と設計公式，土木学会論文集，No. 398/I-10, 311-318, 1988. 10.
- ULT-8 西村宣男，吉田信博。竹内正一：局部座屈を考慮したはり一柱部材の強度評価式，土木学会論文集，No. 416/I-13, 385-393, 1990. 4.
- (3) 鋼部材の基本強度に関する研究
- ULT-9 西村宣男・青木徹彦・西井学・福本嘸士：鋼柱部材の基本強度の統一評価，土木学会論文集，No. 410, 325-333, 1989. 10.
- ULT-10 西村宣男・久保全弘・西井学・福本嘸士：鋼はり部材の横ねじれ強度の統一評価，土木学会論文集，No. 416/I-13, 303-312, 1990. 4.
- ULT-11 Nishimura,N., Fukumoto,Y. : Unified evaluations of ultimate strength formula for steel structural members, Proc. of 4th International Colloquium on Stability of Metal Structures, New York, 83-92, 1989.

- ULT-12 西村宣男・笠原宏紹・福本嘯士：鋼はり一柱部材の相関強度式の適正化，土木学会論文集，No. 416/I-13, 357-364, 1990. 4.
- ULT-13 西村宣男・笠原宏紹・菅田喜之：2軸曲げを受ける鋼はり一柱部材の相関強度式，土木学会論文集，No. 428/I-15, 157-166, 1991. 4.
- ULT-14 西村宣男・小松定夫・西出俊亮：トラス圧縮材の構面内極限強度特性，土木学会論文集，No. 386/I-6, 221-223, 1987. 10.
- ULT-15 西村宣男：弾性拘束を受けるI形断面ばりの極限強度評価式，土木学会論文集，No. 386/I-6, 267-277, 1987. 10.
- ULT-16 西村宣男・間瀬利明・大吞智正：軸力と曲げを受ける鋼部材の断面区分，構造工学論文集，Vol. 41A, 207-214, 1995. 3.

(4) プレートガーダーの耐荷力に関する研究

- ULT-17 Komatsu,S., Nishimura,N. : Safety against static failure of plate girders subjected to shear and design criteria, 橋梁構造工学研究発表会論文集，Vol. 18, 207-214, 1971.
- ULT-18 西村宣男・大崎史淳・長谷川徹雄：曲げを受ける鋼I形断面の局部座屈強度と限界幅厚比に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol. 37A, 135-144, 1991. 3.
- ULT-19 西村宣男・秋山寿行・松村達生：曲げを受けるI形断面はりおよびプレートガーダーの強度設計法の一提案，構造工学論文集，Vol. 39A, 165-174, 1993. 3.
- ULT-20 堀田毅・内藤純也・西村宣男：鋼2主桁橋梁架設系の横ねじれ座屈強度特性，土木学会論文集，No. 612/I-46, 287-296, 1999. 1.

(5) 逆 π 形断面箱桁橋に関する研究

- ULT-21 加藤久人，川村曉人，小野潔，西村宣男：開断面箱桁橋の架設時の耐荷力解析について，鋼構造年次論文報告集，Vol.9, pp.527~534, 2001年11月.
- ULT-22 加藤久人・玉田和也・三原邦啓・酒井和男・西村宣男：そりねじり変形を考慮した鋼逆 π 形合成箱桁橋設計の基本事項，鋼構造年次論文報告集，Vol. 12, 91-98, 2004. 11.
- ULT-23 玉田和也・小野潔・川村曉人・西村宣男：鋼逆 π 形箱桁橋架設系の曲げ耐荷性能に関する実験的研究，土木学会論文集，No. 787/I-71, 147-160, 2005. 4.
- ULT-24 玉田和也・小野潔・川村曉人・西村宣男：鋼逆 π 形箱桁橋架設系のせん断耐荷性能に関する実験的研究，土木学会論文集，2005.

(6) LP鋼板の極限強度に関する研究

- ULT-25 堀田毅・西村宣男・村上茂之・滝英明：テーパプレートフランジ桁の耐荷力特性と設計法，鋼構造年次論文報告集，Vol. 4, 257-264, 1996. 11.
- ULT-26 村上茂之・西村宣男・堀田毅：自由突出テーパプレートの圧縮強度，構造工学論文集，Vol. 43A, 107-116, 1997. 3.
- ULT-27 堀田毅・西村宣男・村上茂之・滝英明：テーパプレートを用いたI断面桁の局部座屈設計法，鋼構造年次論文報告集，Vol. 5, 239-246, 1997. 11.
- ULT-28 堀田毅・西村宣男・村上茂之・滝英明：LP周辺支持板および補剛板の圧縮強度特性と設計法，鋼構造年次論文報告集，Vol. 6, 335-342, 1998. 11.

(7) 鋼管構造の強度に関する研究

- ULT-29 西村宣男・竹内修治・村上茂之・讃井一将：電縫鋼管の製造工程における降伏応力の変化と残留応力，鋼構造論文集，Vol. 4, No. 13, 53-62, 1997. 3.
- ULT-30 西村宣男・竹内修治・村上茂之・遊田昌樹：孔あき鋼管部材の座屈強度に関する実験的研究，鋼構造論文集，Vol. 3, No. 10, 29-38, 1996. 6.
- ULT-31 西村宣男・竹内修治・村上茂之・竹下主義，軸屋一美・伏見義仁：断面欠損を生じた円形鋼管部材の座屈強度特性，鋼構造論文集，Vol. 6, No. 21, 55-66, 1999. 3.
- ULT-32 西村宣男・竹内修治・村上茂之・田淵敦彦・伏見義仁：断面に欠損を生じた円形鋼管部材の残存強度の評価法，鋼構造年次論文報告集，Vol. 9, 489-496, 2001. 11.
- ULT-33 西村宣男・竹内修治・二神崇・神谷信彦：製作円形鋼管の局部座屈強度と局部応力に及ぼす各種幾何学的初期不整の影響，鋼構造論文集，Vol. 6, No. 24, 133-148, 1999. 12.

(8) 腐食損傷を受けた鋼構造の強度評価に関する研究

- ULT-34 Nishimura,N., Kamei,Y., Murakami,S. : Residual strength of corroded steel plates in compression, PSSC,1993.
- ULT-35 西村佳大・竹内正一・西村宣男：腐食損傷を有する圧縮板の極限強度解析法，鋼構造年次論文報告集，Vol. 12, 123-128, 2004. 11.
- ULT-36 竹内正一・西村佳大・西村宣男：腐食損傷を有する鋼板の極限強度特性，鋼構造年次論文報告集，Vol. 12, 129-136, 2004. 11.

(9) その他

ULT-37 Nishimura,N., Yamagata,N. : Evaluation of effective length of restrained struts on the basis of ultimate strength, Technology Reports of Osaka University, Vol.34,No.1752,93-99,1984.3.

ULT-38 Ohmori,K., Nishimura,N. : Buckling coefficients of deck arches with continuous stiffening girder, Technology Reports of Osaka University, Vol.44,No.2195, 287-293,1994.10.

ULT-39 Nishimura,N., Harimoto,S., Hwang,W.S., Sasaki,Y. : Experimental study on ultimate strength of joints in H-shaped steel column supporting systems, Technology Reports of Osaka University, Vol.39, No.1978, 267-274, 1989.10.

大阪大学土木構造研究室

複合構造に関する研究COM

COM-1 加藤久人・川畑篤敬・西村宣男：波形鋼板ウェブを有する鋼・コンクリート複合構造橋梁の変位と断面力の実用計算法，土木学会論文集，No. 703/I-59, 293-300, 2002. 4.

COM-2 西剛整・細木康夫・武伸明・西海健二・西村宣男：鋼管・コンクリート合成壁構造の耐力特性と変形性能，鋼構造年次論文報告集，Vol. 10, 559-566, 2002. 11.

COM-3 黒田修一・緒方辰男・武伸明・平田尚・西村宣男：鋼管・コンクリート合成壁隅角部の耐力評価，鋼構造年次論文報告集，Vol. 10, 1-8, 2002. 11.

COM-4 加藤久人・西村宣男：波形鋼板ウェブを有する連続桁および斜張橋の実用解析法，土木学会論文集，No. 731/I-63, 231-245, 2003. 4.

COM-5 加藤久人・佐藤知明・牧浦信一・西村宣男：波形鋼板ウェブを有するPC桁の断面変形理論，土木学会論文集，No. 766/I-68, 109-127, 2004. 7.

鋼構造の耐震性能に関する研究SES

(1) 鋼材の塑性履歴に関する研究

- SES-1 Nishimura,N., Ono,K., Ikeuchi,T. : Correction of two-surface model for hysteretic loaded structural steels, Technology Reports of Osaka University, Vol.42, No.2114,321-328, 1992.10.
- SES-2 西村宣男・小野潔・池内智行・新家徹：各種鋼材の繰返し塑性履歴に関する実験的研究，鋼構造論文集，Vol. 1. 1, No. 1, 173-182, 1994.
- SES-3 単調載荷曲線を基にした繰返し塑性履歴を受ける鋼材の構成式，土木学会論文集，No. 513/I-31, 27-38, 1995. 4.
- SES-4 Nishimura,N., Ikeuchi,T. : Hysteretic behavior of steel plates under uniaxial tension and compression, Technology Reports of Osaka University, Vol.45, No.2232,221-230,1996.10.
- SES-5 鈴木雄大・小野潔・池内智行・岡田誠司・西村宣男・高橋実：実用的な構成則の開発，第6回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，2003. 9.

(2) 鋼製橋脚の耐震性能に関する研究

- SES-6 池内智行・谷口直子・西村宣男：兵庫県南部地震における鋼管橋脚の地震損傷に関する一考察，鋼製橋脚の非線形数値解析と耐震設計に関する論文集，231-238, 1997. 5.
- SES-7 池内智行・谷口直子・西村宣男・中川知和：兵庫県南部地震における鋼管橋脚損傷の数値シミュレーション，鋼構造論文集，Vol. 4, No. 14, 29-38, 1997. 6.
- SES-8 Nishimura,N. Ikeuchi,T.,Taniguchi,N. : Numerical simulation on damage to pipe piers in Hyougokenn-Nanbu Earthquake, Engineering Structures, Vol.20, No.4-6, 291-299, 1998.
- SES-9 Ono,K., Nishimura,N., Hwang,W.S. : Setting restoring force models based on moment-curvature relationship of circular section steel bridge piers corresponding to allowable displacement, Proc. of the 1st International Conference on Steel and Composite Structures, 1605-1611, 2001.6.
- SES-10 小野潔・西村宣男・西川和廣・高橋実・中洲啓太：円形断面鋼製橋脚の正負交番載荷実験結果に基づくM- ϕ モデル設定手法に関する検討，鋼構造論文集，Vol. 8, No31, 97-105, 2001. 9.
- SES-11 池内智行・小野潔・西村宣男：座屈被害を受けた鋼管橋脚の地震応答解析，第4回鋼構造物の非線形解析と耐震設計への応用に関する論文集，119-126，

2002. 1.

- SES-12 小野潔・西村宣男・高橋実・野中哲也・坂本佳子：コンクリートを充填した鋼製橋脚のM- ϕ 関係を利用した耐震性能評価手法に関する検討，第4回鋼構造物の非線形解析と耐震設計への応用に関する論文集，193-202, 2002. 1.
- SES-13 Caetano,A.,Ono,K.,Nishimura,N. : Calibration of the fiber model for seismic design of elevated highway steel piers, 第4回鋼構造物の非線形解析と耐震設計への応用に関する論文集，223-231, 2002. 1.
- SES-14 森口智聡・小野潔・西村宣男：降伏応力度等のばらつきが鋼製橋脚の耐震性評価に与える影響に関する検討，第4回鋼構造物の非線形解析と耐震設計への応用に関する論文集，239-248, 2002. 1.
- SES-15 小野潔・西村宣男・西川和廣・中洲啓太・野中哲也・坂本佳子：コンクリートを充填した矩形断面鋼製橋脚のM- ϕ 関係を利用した耐震性能評価手法に関する検討，構造工学論文集，Vol. 48A, 683-692, 2002. 3.
- SES-16 岡田誠司・小野潔・服部伸幸・西村宣男・池内智行・高橋実：長方形断面鋼製橋脚の耐震性能評価のための正負交番載荷実験，地震工学シンポジウム論文集，2003. 12.

(3) 鋼製ラーメン橋脚隅角部の耐震性能に関する研究

- SES-17 Hwang,W.S., Harimoto,S., Sasaki,Y., Nishimura,N. : Inelastic behavior of beam-to column connections of welded box-section, Technology Reports oh Osaka University, Vol.40. 323-330,1990.
- SES-18 Hwang,W.S., Harimoto,S., Nishimura,N. : Hysteretic behavior of thin-walled box beam-to-column connections, Technology Reports oh Osaka University, Vol.41. 347-357,1991.
- SES-19 Nishimura,N., Hwang,W.S., Fukumoto,Y. : Experimental investigation on hysteretic behavior of thin-walled box beam-to-column connections, Stability and Ductility of Steel Structures under Cyclic Loading, CRC Press, 163-174, 1992.
- SES-20 黄元燮・西村宣男・高津秀俊：鋼製ラーメン橋脚隅角部の強度と変形能に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol. 40A, 1994.
- SES-21 黄元燮・西村宣男・西野滋博：鋼製ラーメン隅角部パネルの強度と変形能の評価法，構造工学論文集，Vol. 40A, 1994.
- SES-22 池内智行・西村宣男：繰返し曲げを受ける鋼製ラーメン橋脚隅角部の変形能，鋼構造年次論文報告集，Vol. 5, 199-206, 1997. 11.

構造力学教育

(4) 直接基礎構造の耐震性能に関する研究

SES-23 Kwon,Y, Nishimura,N. : Earthquake response of three-dimensional soil-structures considering sliding phenomenon, Technology Reports of Osaka University, Vol.49,No.2347,79-90,1999.4.

SES-24 権映録・西村宣男:直接基礎を有する立体交差橋梁の滑動を考慮した地震応答解析, 構造工学論文集, Vol.46A, 737-744, 2000. 3.

(5) 地震時衝突に関する研究

SES-25 梅曙東・西村宣男・北脇道夫・福田清・松崎慎一郎:隣接橋梁の地震時衝突による衝撃力の緩和法に関する実験, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 7, 1-8, 1999. 11.

(6) CFRPによる耐震補強に関する研究

SES-26 宇井崇・汐待公二郎・西村宣男:CFRP板接着による鋼板パネルの強度と変形能の改善に関する基礎的研究, 第4回鋼構造物の非線形解析と耐震設計への応用に関する論文集, 13-18, 2002. 1.

SES-27 宇井崇・汐待公二郎・西村宣男・鈴木博之:炭素繊維強化樹脂板を接着した圧縮鋼板の極限強度解析, 構造工学論文集, Vol. 48A, 2002. 3.

橋の設計と力学教育

橋梁新聞 1997年4月21日 「私の橋歴書」

昭和40年、大学卒業と同時に、大学院への進学を辞退して助手になり、爾来32年間、構造力学教育に従事して参りました。

土木工学の構造力学は主として橋梁の設計を念頭に置いたのもであること、大学で教育に費やす時間の数倍は鋼橋を対象とした研究であることから、私も橋歴書に名を列ねることをお許し頂けるものと思います。

若い頃は教育効果に対する過大な期待から、学生に対して特別に難しい演習問題を課し、完璧なレポートを要求していました。40数名の学生に一人ひとり違う課題を与え、提出するレポートは直接目を通して、直ちに不備な点を指摘して修正させました。

演習の時間にレポートの概要を板書させ、解説を加えてひとつの課題が完了します。このような教育方法では1学期15回の演習時間内にこなせる問題数は150程度で1人当り3題に過ぎない。

自分の担当課題以外にまで解答を用意する学生は稀であり、この教育方法は挫折しました。教育効果は教官が教育に費やす時間に比例するのではなく、学生が学習に掛ける時間に比例するからです。

昭和40年代の中頃から急速に計算機と、これを利用した構造解析法が発展しました。マトリックス変位法、有限要素法の出現により、構造力学教育の中味は大きく変わりました。古典的構造力学は必要最小限に絞り、計算機の利用を前提とした構造解析法の比重を増やしました。

不幸なことにマトリックス変位法や有限要素法による構造解析を体験させるための教育用コンピュータ環境はパーソナルコンピュータが普及する昭和50年代後半まで待たなければなりませんでした。

その間、構造力学演習で重要視したことは、力学的直観力の養成でした。例えば、骨組構造の断面力図、変形あるいは影響線を計算によらず、直感的に描く能力を育んでおけば、計算機の出力結果に対して盲目的に従うことなく、人為的過誤を見抜く力が付くと考えたからです。

しかし、この試みも以下の理由により十分な教育効果を挙げるができなかったように思います。

直観的力学能力は、豊富な構造解析の体験の上で初めて確実なものとなるもので、僅か1年か2年の学習で身に付くものではない。土木工学科の学生すべてが、高度な構造力学能力を修得することは必ずしも社会の要請ではない。

そこで再度教育方針を改めて卒業後に構造解析を必要とする分野に進む学生にのみ、構造解析のプロフェッショナルになるための能力を授けることに致しました。

私の研究室の配属になった学生の大半は大学院へ進みますが、構造解析を汎用プログラムに委ねることは一切認めず、全て自前のプログラムを作成して行うように指導しています。

解析結果の妥当性を確認するために、標準的問題との照合、簡易解析法の構築と比較等の過程で構造力学能力の高度化が可能になっています。橋梁の実務設計ではほとんどすべて計算機を利用した構造解析法が用いられています。

ブラックボックス・エンジニアにならないためには、構造解析上の錯誤がどのような場合に生じやすいかを周知すること、手計算で照査できる簡易計算法に習熟すること、応力集中や集中力の分散が問題となる個所での応力の流れを想定する能力、薄板構造における局部板曲げの発生を予測する能力が必要となります。

このような技術を「照査のための構造力学」と名付け、関西道路研究会道路橋調査研究委員会の中に、設計照査システム小委員会を設けて頂き、若手の技術者の方々の御協力を得て間もなく報告書として纏まろうとしています。橋梁技術者の方々の御参考になれば幸甚に存じます。

公共工事における品質保証と設計照査について

コンサルタント講演会 1998年3月

概要

世の中では金融ビックバンの到来が注目されているが、現在の我国を含むアジア諸国の経済発展の行き詰まりは金融関係ばかりでなく社会システムのあらゆる分野に対して、変革を要求している。公共工事に関しても同様で、入札制度の変革、建設コスト縮減施策、公共工事の品質確保を中心として大きな変革期の渦中にある。土木技術者としても逸早く社会システムの動向を察知して、これに対処する方策を身に付ける必要がある。本文ではコンサルタントの技術者向きに、建設分野における変革への対応を述べる。

1. 公共建設事業のビックバン

21世紀初頭に迎える超高齢化社会に備えて、社会基盤の充実のために投資できる機会は現在をおいてないことが、1980年代の後半から言われ始め、またわが国の貿易黒字に対する海外からの批判を躲すために、10年間630兆円の社会基盤への投資を国際的に約束してから数年の間に、わが国も含めてアジアの経済環境は曲がり角にきており、先の約束は反古になろうとしている。

このような経済情勢の中で、なお社会基盤の充実が国民生活レベルの向上のために必須であり、建設コストの縮減施策[1]が政府の重要課題となった。この施策の背景にはわが国のコスト高、とりわけ建設コストの内外価格差の是正に対する要望がある。

同時に、公共工事の入札に絡んだ不祥事への対処、WTO協定発効に対応するために導入され始めた一般競争入札制度[2]もコスト縮減施策を支援するものとの見方もある。

さらに、一般競争入札の円滑な施行のために、公共施設の品質保証[3]の重要性が指摘され、折からの規準や資格の国際的統一の動きと併せて、企業についてはISO9000sおよびISO14000の認証、技術者個人に対してはPE(Professional Engineer)やVE(Value Engineering)リーダーの取得が求められる時代が始まっている。

建設コスト縮減、一般競争入札および品質保証はお互いにリンクしあいながら、公共建設事業の仕組みに一大変革をもたらそうとしている。

2. 公共工事の品質確保について

公共工事に拘わる設計・施工の品質確保に関して建設省の施策[3]として、以下の5項目が挙げられている。

- ①技術者・技能者の技量を向上させ、能力を十分に発揮させる。
- ②技術開発を促進し、技術基盤を整備する。
- ③発注者・設計者・施工者の役割と責任を明確にする。

- ④品質確保・向上のインセンティブを付与する。
- ⑤発注体制の強化・支援策を充実する。

これらの基本思想に基づいて、具体的な施策が実施に移されようとしている。

第1に発注者・設計者・施工者が一体となった品質管理システムの構築が挙げられる。ISO9000sの認証の動きは設計者・施工者側の対応と受け止めることができる。このことについては設計業務を例にとりて後述する。

第2は建設CALS/ECの構築と発注業務への試行が挙げられる。これまでのところ建設CALSは情報通信技術を活用した発注業務における生産性の向上に重点が置かれているが、将来は情報公開も含め建設技術の一大データベースとして発展することが期待される。

3. 品質保証と設計照査

公共土木施設の設計業務における成果品の品質保証は設計照査と称されている。ドイツ等ではPrüfungen Ingenieur(Proof Engineer)と称されている設計照査を専門とする事務所において成果品の品質保証が検査される制度が実施されている。設計照査を行なう事務所は専門的知識を有する大学の教授などがメインスタッフとして関わっており、社会システムとしての歴史を有している。わが国ではこれまでは大学教授の民間会社との兼業は厳しく規制されてきたこと、実務に精通した人材が育っていないことなどから、このような制度はわが国には馴染まないと言われている。

品質のレビューシステムとしては施主が関与する検査技術マニュアルと受注者の社内検査マニュアルの2本立てが考えられている。設計業務の一定の階段ごとに発注者と受注者は会合を持ち、検査技術マニュアルに規定された検査項目について照査を行なう。なおこの会合に先立って、受注者は社内検査マニュアルに基づいて成果品の照査を行なうが、この照査業務は当該業務の担当技術者ではなく、予め任命された照査責任技術者が担当する。この照査技術者として土木品質監査士と称する資格認定制度を策定する動きがある。

何れにせよ、設計業務における品質確保のためには設計照査が重要であり、そのためには検査の体制と適切な照査項目の整備が必要である。それと同時に技術者個々の能力の向上が求められている。

4. 設計技術者に対する構造工学の教育

設計技術者の力学能力を育むには高等教育課程(大学・高専)における構造力学・構造工学の教育、また実務によって経験する種々の工学問題から得られる知識の体系化が重要である。土木・建築分野のみならず機械・造船・航空分野も含めて、構造解析用汎用ソフトの発達とコンピュータ環境の整備とに対応すべき高等教育機関における構造力学・構造工学教育の内容と教育方法には依然として改良の余地がある。また実務においても設計技術者の力学離れが進行していると聞く。

関西道路研究会道路橋調査研究委員会設計照査小委員会では、上述のような構造力学教育の現状を省みて、構造設計における力学能力を育てるための一つの試みを行なった。その報告書[5]のタイトルは” 照査のための構造力学” と名付けた。報告書は以下のような構成となっている。

第1章 序説

第2章 構造解析の盲点

第3章 簡易計算法

第4章 応力集中

第5章 集中力の分散

第6章 薄板構造における局部板曲げ問題

以下では各章の内容のあらましを紹介する。

第1章では鋼橋設計の現況と照査技術の必要性を述べ、報告書の利用方法を解説している。特に、構造解析に用いる構造モデルの妥当性と構造解析が正常に行なわれたことの照査技術に力を注ぐことを喚起している。

第2章では構造解析の盲点が業務の円滑な遂行を妨げた事例を多数紹介するとともに、構造力学教育において適用限界が十分に説明されていない力学問題を解説している。初等構造力学の適用限界については、はりの曲げに伴うせん断変形の評価法、deep beam の応力特性、はりに作用する軸引張り力のたわみに対する影響、たわみ角法の適用限界を紹介している。また構造力学に強くなるための直感力を養成する構造力学問題集も提示している。

第3章では精密な電算解析の結果を比較的簡単な方法で照査するために用いる簡易解析法を整理し、応用例を紹介している。簡易解析法とは初等構造力学を少しばかり拡張した1次元化理論を言う。鋼橋を対象とした種々の力学問題、すなわち応力計算、変形計算、座屈荷重の計算、固有振動解析に対する適用法が紹介されている。またトラス、ラーメン、アーチおよび吊橋の立体解析を平面格子モデルで解析する方法も紹介している。

第4章では鋼橋における開孔や切り欠きに伴う応用集中現象を取り上げ、応力集中問題を統一的に解釈するための整理と補強対策の事例の紹介を行なっている。またトラスおよびアーチ系橋梁の格点部フィレットの応力集中係数を系統的に纏め、構造法との関連を考察している。さらに、応力集中問題に対する有限要素法の適用について概説している。

第5章ではケーブル力、支点反力などの集中力の橋体への分散過程を整理し、代表的事例を紹介している。ケーブル力に関しては各種の斜張橋および自定式吊橋の補剛桁への分散過程と実務的計算法を述べている。支点反力に関しては箱桁のゴム支承部、斜張橋の補剛橋と主塔剛結部、バランストアーチ橋の中間支点部の事例を紹介している。

第6章では薄板構造に見られる局部板曲げ問題の事例を取り上げ、局部板曲げの発生要因とそれを回避するための構造法を紹介している。

5. 提案型設計への志向

建設省の公共工事のコスト縮減に関する行動指針[4]では、平成11年度末までに、施主側の努力で6%、受注者側の努力で4%、合計10%以上の縮減を目指している。その中で民間技術提案の反映（VE）、新技術の開発・活用・普及が謳われている。コスト縮減は新技術・新工法の採用や海外資材の活用等、受注者側の縮減努力だけでなく、発注ロットの適正化や設計と施工の一体化を目指したデザインビルドの導入等、受注側の努力を支援する規制緩和策の整備が有効である。

ゼネコンは設計段階にまで業務を拡大することでその保有する技術力を発揮しようとしている。

製鉄メーカーの建材開発部門でも資材の販売を超えて新工法・新構造を積極的に開発し、その売り込みに力を注いでいる。また鋼橋を製作している重工業も下部工から上部構造までの一括受注を狙って、土工部門や床版工事部門の社内設置を目指している。このように公共建設事業の変革の胎動が既に始まっている。

このような情勢の中で建設コンサルタンツ協会は平成3年度よりA T I 構想を打建て業界の倫理観の確立と技術力の向上に努力されてきた。さらに昨今の公共工事コスト縮減等の動きに応えるために1996年建設コンサルタント中期行動計画・A T I -21 を策定されたことはご同慶の至りである。

一時期、大学の土木工学科の卒業生で建設コンサルタント業界へ就職する者は極めて少数であった。ところが5年ばかり前から建設コンサルタントへ就職を希望する学生が増加し始め、現在は総合建設業に次いで多くのしかも優秀な学生が志望するようになった。その時期は奇しくも建設コンサルタンツ協会のA T I 構想と期を一にする。

問題は行動計画の具体的な施行に懸かっている。

6. 建設コンサルタントへの要望

最後に、公共施設の建設におけるコンサルタントの有り方に関連して、いくつかの要望を述べて本稿を締め括りたい。

第1に発注者とコンサルタントとの役割分担であるが、計画設計におけるこれまでの協力者の立場から脱却して、対等な関係を構築されたい。発注者は基本計画の策定において主役を演ずるが、社会基盤整備の具体案の作成はコンサルタントが責任を持って当たらなければならない。

第2にコンサルタントの技術者は業務報告書の作成ばかりでなく業務で得た経験を研究論文の著者として纏め、業績を蓄積されたい。そのことによって学位の取得を目指して頂きたい。

第3に公共工事の円滑な遂行のための合意形成、特に住民参加を考えた立案システムにも取り組んで頂きたい。

建設コンサルタントが発注者に替わって公共工事の遂行に中心的役割を果たすようにな

ると、最早、営利企業としての体質から脱却して第3組織としてのNPO的色彩を強めて行くことが望まれている。

参考文献

- [1] 建設省：公共工事の建設費の縮減に関する行動計画，1994.
- [2] 建設省：公共工事の入札・契約手続の改善に関する行動計画，1994.
- [3] 公共工事の品質に関する委員会報告，1996.
- [4] 公共工事コスト縮減対策に関する行動指針，1997.

橋梁技術者・研究者を育む術

橋梁と基礎 1998年11月 巻頭言

私の所属する大学では、卒業研究や大学院で構造工学を志望する学生は比較的成绩が良い。しかしながら、最近では、卒業後の就職先として構造分野を選択するものは30%に過ぎない。構造関係の研究には興味があるが、一部の学生を除いて、構造分野は職業選択の条件にはなっていないようである。まず橋梁技術者あるいは研究者を育てるための入り口の問題を考察してみたい。何故、せっかく取得した専門技術を活かすことができる分野に進まないのか、その理由を分析する必要がある。

学生たちが就職先を選択する際の基準は、給与を含めた待遇面もあるが、重要な視点は団体・企業の活力と仕事の社会的注目度である。阪神・淡路大震災後の被災橋梁の復旧には多くの橋梁技術者・研究者の多大な貢献があったけれども、それを称えるような報道は皆無に等しい。本年4月に開通した明石海峡大橋は確かに素晴らしい。このことは多くの観光客を集めていること、淡路島や四国東部の人々に対して大きな利便性を与えたことはマスコミによって報道されたけれど、同時に建設費に見合う通行量を確保することは悲観的であると報道されている。後世に負担を残すような建設計画は橋に対する感銘を半減させてしまう。新しい橋、長大な橋だけではなく、それらが市民から歓迎される建設に関与できることが、真面目な学生たちの希望である。

大学の構造工学研究室を担当している者にとって、研究室を巣立った卒業生が構造の分野で順調に成長して活躍していることを見聞きすることが最も嬉しいことである。機会あるごとに助言したり、仕事の成果を聞いて共に喜ぶこともあるけれど、そのような卒業生は少数である。お互いに日常的業務に忙殺されて、師弟の結びつきは弱まる傾向にあった。

最近、この傾向が少しずつ変わり始めている。大学院博士後期課程定員を充足することを文部省から強く求められている大学側の事情と、高度な専門知識を有する技術者（学位を取得していることがその証となる）を必要とするようになってきた企業側の思惑とが合致して、社会人を対象として博士後期課程入学制度が広まってきた。このことは実務に疎いが理論に強い大学側と理論等には劣るが実務に明るい社会人側との相互補完により良い成果が挙がってきているように思える。しかし多くの場合、社会人ドクターは会社の業務と大学での研究の二足の草鞋を履いた形態を採っているのもので、本人の負担は大変なものである。また、企業側の経済的負担も少なくないと聞く。

そこで学位取得までには至らなくても新しい学問や技術を修得するために、あるいは大学院博士後期課程での研修の前段階として、次のような技術者のリフレッシュ・リカレント教育の形態を提案したい。複数の大学と協会が協同してリフレッシュ・リカレント教育に関する組織を作り、大学の個性と業界からの要請を反映した研修内容を定める。希望する技術者は提示されたメニューの中から自由に選択できる。研修期間は半年ないしは1年、週に半日程度の研修が適当であろう。組織はオープンであることが前提で、出身大学にこだわる必要はさらさない。

最後に、研究者の育て方について一言述べたい。最近研究者の評価において研究実績の量が重要視されているので、若手の研究者もそれぞれの専門分野において論文の数を揃

えなければならない。そのために基礎理論の勉強が疎かになっている。指導者は研究者になることを志望する学生に対して、博士前期課程の間は基礎理論の勉強に重点を置くことを薦め、狭い範囲の先端研究にのみ集中して、偏った専門知識のみで学位を取得することがないように指導することが大切である。いったん、学位を取得し独立した研究者として歩み始めた者を、学会、研究会、技術委員会等へ積極的に勧誘して、橋梁工学の様々な分野に対する知識をバランス良く習得できるように配慮することが必要であろう。後継者を育てることはすべての橋梁関係者に共通した重要課題であると考える。

橋梁工学に役立つ構造力学教育のあり方

横河ブリッジ技報 2004年 巻頭論説

1. はじめに

1964年、学部4回生になって橋梁工学研究室（安宅勝教授）において卒業研究の指導を受けることになり、以来40年間、構造力学の研究・教育に携わってきた。数値計算の道具は手回し計算機から電子計算機へ、それに対応して構造解析法は級数解法や差分法からマトリックス変位法や有限要素法へと変遷する過程を教育と研究の両面から体験してきて、ようやく最近、構造力学教育の全体像が見えてきた感じがしている。これまでの教育研究の経験を振り返りながら、学生や若い橋梁技術者の構造力学に対する直観力を育む観点から、構造力学教育のあり方を纏めてみた。

2. 弾性方程式と近似解法

橋梁工学研究室に入れて頂いて最初に与えられた研究課題はプレキャストRC床版の弾性設計のための有効幅の決定と降伏線理論による極限強度式の誘導であった。昼間は実物供試体を用いた実験を行い、夜は数値計算を行う日々であった。版の弾性解析では主鉄筋と配力鉄筋の効果の差を直交異方性版とモデル化し、プレキャスト版の継ぎ目を考慮してLevyの級数解法を適用した。左手に双曲線関数表、右手で手回し計算機を操作して数値計算を行った。変位の計算では級数の項数が少なくともそこそこの精度で実験結果を再現でき、近似解法もまんざらではないとの印象を受けた。

1967年、安宅教授の後任として小松定夫教授が着任され、いきなり研究課題がLeonhardt教授の提案したモノケーブル吊橋の立体解析法に変わったが、構造解析法は依然として微分方程式を誘導して級数法や差分法による近似解法に拘った。結果的に2面の吊材と補剛桁とで構成する3角形の閉断面のねじり剛性が、吊材の伸縮によって失われ、期待したほどは発揮されないことが明らかとなり、モノケーブル吊橋に関する研究は頓挫した。しかしモデル化の中で、吊材力が補剛桁に与える分布曲げモーメントや分布そりモーメントの扱い方を理解できたことが、後ほど別の研究課題で役に立った。

吊橋に関する研究は本四公団の瀬戸大橋の立体解析法の開発を目標として継続した。道路鉄道併用橋における吊構造の断面変形の影響評価や偏載荷重に対する部材設計に関わる諸問題、固有振動モードと力学パラメータの関係をなどを説明することができた。構造解析法は依然として基礎微分方程式を導き、級数解法を採用した。理想的境界条件のもとでは微分方程式の閉じた解を適用した。

3. マトリックス変位法・有限要素法へ

吊橋における立体解析の必要性やモデル化の基本的条件が明らかになると、実際の構造詳細が挙動に与える影響、部材長誤差が完成系の品質に与える影響などの評価が求められるようになった。これらは理想化した構造モデルに関する弾性微分方程式では対応できないことや、大型計算機の環境が整ってきたこともあって、研究では骨組構造に対してマトリックス変位法が、板構造に対しては有限要素法を用いた研究に移行するのは必然の成り行きであった。

10年間の吊橋研究も一段落し、研究課題は鋼構造の耐荷力問題へとシフトして行った。耐荷力研究の仲間入りしたのは1977年に発生した大雲橋（京都府、鋼2主桁側道橋）の架設時落橋事故であった。多くの鋼構造耐荷力の研究者は鋼板や鋼部材の基本強度に関する研究からスタートするのに対し、筆者はいきなり構造物の全体不安定現象からのスタートとなった。

この事故原因を究明するために2つの構造解析ソフトを作成した。一つは立体骨組構造の弾塑性有限変位解析プログラム（NAFRAM : Nonlinear Analysis of Framed Structures）で、開断面部材を対象として断面のそりを含む1節点7変位自由度を考慮すると共に、断面の塑性化による図心やせん断中心の移動、主軸方向の変化に対応する機能を付与している。また部材要素内の塑性化の変化に対応した諸剛性の要素内変化を考慮できる特殊な剛性マトリクスを採用して、精度の向上に努めている。このソフト開発においては当時大学院生であった大野正人君（現国土交通省）の貢献が大きい。今ひとつのソフトは2主桁構造の弾性全体座屈強度の簡易評価プログラムで、パソコンを用いて全体横ねじれ座屈に関する固有方程式の解を級数により近似的に求めることができる。マトリックス変位法による数値計算結果を簡易式と比較し、力学的に解釈する補助手段として活用することを意図したものである。

大雲橋の事故原因の分析では、床版コンクリート打設時で主桁は弾性状態にあるものの、座屈強度の正確な予測に当たっては、固定支点の変位拘束状況を反映した境界条件、主桁の断面変化、鋼桁の重量とその作用位置の橋軸方向変化を忠実に考慮した解析が必要であり、設計当時用いられていた等断面一定剛性の単純支持構造を仮定した Vlasov や Burgermeister の横ねじれ座屈式では精度が悪いことが明らかになった。これらの分析内容が当該橋梁の設計時には不明であったと裁判で評価され、被告であった発注側と設計側の責任者が無罪となったと聞いている。

1987年、鋼構造の耐荷力研究の先達である福本誘土教授が名古屋大学から大阪大学へ転任されたのを機に、我が国における鋼構造設計に境界状態設計法を導入するための土台を築くべく、鋼構造の限界強度の統一の評価に関する研究をプロモートした。統一評価の内容としては、

- ・名古屋大学を中心として収集されてきた座屈実験データベースと大阪大学で行ってきた数値シミュレーションによる鋼構造の限界強度の整合性を図ること。
- ・これまで個別に行われてきた圧縮部材、曲げ部材、はり・柱部材、板構造などの限界強度評価モデルの統一化

である。これらの研究成果は土木学会の刊行物には逐次取り入れられてきたが、残念ながら土木鋼構造設計に最も深く関係している道路橋示方書には殆ど反映されていない。

さらに研究成果の蓄積が不十分であった課題について、それぞれに固有の現象を解明するための有限要素解析ソフトを開発しながら研究を進めてきた。主な解析ソフトは以下の通りである。

- ・鋼構造部材および構成板要素の連成座屈解析ソフト OLFAM : Overall-Local Buckling Analysis of Framed Structure
断面構成板要素の局部座屈の発生が予測される部位にシェル要素からなる立体薄板ブロックを、その他は骨組要素を用いた結合解析ソフトで、鋼骨組構造物の局部座屈を考慮した全体解析を行う。
- ・鋼薄板構造の限界強度解析ソフト
NASTAP : Nonlinear Analysis of Sheller Structure with Taper Plate
8節点アイソパラメトリックシェル要素による鋼薄板構造の弾塑性有限変位解析ソフトで、鋼管、有孔板、変厚板等の限界強度解析に適用。
- ・鋼骨組構造の非線形動的応答解析ソフト
DYNAM : Dynamic Nonlinear Analysis of Framed Structures
立体骨組構造物の地震応答解析ソフトで NAFRAM の動解バージョン。断面のねじりによる循環せん断流を考慮した鋼の塑性繰返し構成則を適用。
- ・繰返し塑性履歴を考慮した鋼薄板構造解析ソフト
CYNAS : Cyclic Nonlinear Analysis of Sheller Structures
鋼材の塑性繰返し構成則を考慮した鋼薄板構造物の弾塑性有限変位解析ソフトで NASTAP の拡張バージョン
- ・高力ボルト摩擦接合継手の限界強度解析ソフト SABOL : Slip Analysis of Bolted Joint
20節点アイソパラメトリックソリッド要素を用いた高力ボルト摩擦接合継手のすべりと降伏の相互作用を考慮した限界強度解析ソフト。すべり以降の支圧状態の解析も可能。
- ・積層板の弾塑性有限変位解析ソフト
SABOL-ORTHO
直交異方性材料からなる積層板の弾塑性有限変位解析ソフト。要素は SABOL を踏襲。炭素繊維強化樹脂板を接着した鋼板・補剛板の限界強度解析に適用。
- ・合成構造の限界強度解析ソフト
NACOMP : Nonlinear Analysis of Composite Structures
鋼・コンクリート合成構造の限界強度解析ソフトで、鋼板は8節点アイソパラメトリックシェル要素、コンクリート床版に20節点アイソパラメトリックソリッド要素を適用した限界強度解析ソフト。オプションで膨張剤によるケミカルプレストレスの効果を評価できる。

これらの解析ソフトを駆使し、鋼橋の合理化設計に関連して変厚鋼板の鋼桁フランジへの適用、高力ボルト継手の限界強度、送り出し架設時の耐荷力評価あるいは腐食被害を受けた送電鉄塔の残存強度評価など技術課題の解明に貢献できた。

4. 力学現象のより深い理解のために

このように現在の構造解析における主要なツールとしては有限要素法が席卷しているように思われるが、ごく最近2つの橋梁工学に関する問題において有限要素法の解析結果を骨組構造理論に関する知見により説明することにより、より深く理解できることを体験した。

《波形鋼板ウェブPC桁の曲げ理論》

合理化橋梁の一形式として波形鋼板ウェブを用いた複合橋梁が建設されている。この橋梁形式の推進者であるJHの角谷氏の講演会において、実験や有限要素解析結果によると、波形鋼板ウェブPC桁の構造的特徴として、波形鋼板ウェブのせん断変形の影響が顕著に現れ、また上下のコンクリート床版に重ねばりのような2次の曲げによるひずみが見れるとの説明であった。

波形鋼板ウェブを有する桁構造は上下コンクリート床版をフェーシング、波形鋼板ウェブをコアとする積層ばりである。このような構造モデルの曲げ問題は、初等はり理論の延長線上で論ずることができるので、直ちに曲げに関する弾性方程式を誘導してみた。その結果、波形鋼板ウェブを有する複合橋梁の曲げ問題は以下の6階の微分方程式で表現できることが分かった。

$$v^{IV} - \alpha^2 v'' = -D_1 q + D_2 q''$$

$$\text{ここに、} \alpha^2 = \frac{I_g}{I_a} \frac{h}{h_w} \frac{GA_w}{EI_f}, \quad D_1 = -\frac{1}{EI_f} \frac{h_d}{h} \frac{GA_w}{EI_f}, \quad D_2 = \frac{1}{EI_f}$$

記号は参考文献〔1〕を参照頂きたい。この弾性方程式の解は閉じた形で与えられ、力学挙動に対する力学パラメータの関わりが直接表現されている。

曲げを受ける波形鋼板ウェブPC桁におけるひずみ分布の特徴は、集中荷重や中間支点など集中力の作用点付近において発生する上下コンクリート床版の局部的曲げひずみの急増である。上式の解は桁の全体変形と同時にコンクリート床版の2次の曲げを評価することができる。

また弾性方程式の解からマトリックス変位法に拡張できて、波形鋼板ウェブPC桁を用いた斜張橋やエクストラードスト橋の変位や応力の解析に適用することができる。〔2〕

《開断面箱桁橋架設系の合成床版底鋼板の補剛効果》

開断面箱桁橋も合理化橋梁の一形式である。逆π形の鋼断面の上に合成床版を載せて合成桁とする形式が一般的である。合成床版のコンクリート打設時に開断面の鋼桁のねじり剛性が小さいので、非常駐車帯がある場合その荷重の偏心作用によるねじれ変形が無視できない。そこで合成床版の底鋼板を鋼桁の上フランジと結合することによるねじれ剛性の増加を期待する工法を採用する場合がある。

底鋼板による補剛効果を解明するためには鋼桁と底鋼板の連結構造を忠実にモデル化して、連結材の弾性変形や底鋼板の有効断面を考慮することと、補剛効果の力学的解釈が重要である。

底鋼板による部材の剛性増加は、薄肉開断面部材のそりねじり弾性方程式

$$EC_w \phi'''' - GJ \phi'' = m_1$$

において、底鋼板によるそり変形の拘束効果および準閉断面を構成することによる循環せん断流の発生は共にねじり剛性GJの増大をもたらすことで説明できる。有限要素法による解析結果を薄肉弾性はり理論の援用によって力学的に解釈することが現象のより深い理解にとって重要である。

5. 構造力学教育への反映

昭和40年代から50年代にかけて我国の大学における工学系の重点分野に土木工学科が含まれていて、各大学の土木工学科の教育および学生数はかなり増加した。その間に起こったことは個々の大学の特色が消え、ゼネラリストの育成を目指した総合土木への画一化が進んだように思われる。土木の分野は構造、地盤、水理に加えて計画、環境、マネジメントが加わり、学生たちが学ぶ授業科目の範囲が広がった。一方では、ゆとり教育を実践するために学生が取得する総単位数の削減が求められ、構造力学系科目の縮減を招くこととなった。

限られた授業時間内でマトリックス法も含め、十分な構造力学能力を養成することが困難になっている。初等構造力学で力学の基本を教え、電子計算機を用いた演習でマトリクス法を体験させる程度で、橋梁を題材として構造力学の応用例を講義する機会は失われた。橋梁会社や設計コンサルタントの技術者の構造力学能力が低下してきていると言われているが、原因のひとつに大学における構造力学教育が、現状では中途半端になっていることに問題があるように思われる。

平成16年度から始まる国立大学の法人化を控えて、社会から求められているのは特色のある教育研究機関の創成である。総合土木を目指す大学（総合土木大学と呼ぶ）もあれば特殊分野の人材育成に特色を発揮する大学があっても良い。例えば、構造工学の教育を重点とする大学（構造土木大学と呼ぶ）も考えられる。

ここでは総合土木大学と構造土木大学の構造力学教育の相違点について述べる。総合土木大学では全員が専門基礎科目である構造工学、地盤工学、水理学、計画学、環境原論を必修科目として学ぶ。構造工学は構造力学と構造材料学である。構造・地盤コースを選択した学生に対しては構造専門教育を施す。構造系科目としては弾性学、有限要素法、構造動力学、耐震工学、鋼構造学、コンクリート構造学等が含まれる。

一方、構造土木工学でも専門基礎科目として地盤工学、水理学、計画学、環境原論等も受講するが、特徴は全員が構造専門教育を受けるところにあり、しかも総合土木大学の構造・地盤コースを選択した学生よりも構造力学についてより深い教育を行うことができる。構造力学系の授業科目は初等構造力学、弾性学、有限要素法、構造動力学、耐震工学、鋼構造学、コンクリート構造学のほか高学年では構造力学特論、薄肉構造理論、構造設計実習を学ぶ。

構造力学特論では初等構造力学で無視されている項目の影響を評価し、それらの影響を考慮した拡張理論とその応用例を教授する。以下の課題が含まれる。

- ・せん断変形を考慮したはり理論、・軸力を考慮したはり理論、・積層ばりの理論、・有限変位、・応力集中現象

薄肉構造理論では以下の課題を教授する。

- ・薄肉開断面および閉断面部材の曲げ，・薄肉開断面および閉断面部材の単純ねじり，・開断面部材のそりねじり，・閉断面部材の断面変形，・薄肉断面構造における局部板曲げ。

構造設計実習は，学生が一定期間企業に出掛けて，設計実務を体験するインターンシップである。実務設計に対する問題意識を育むには僅か1・2ヶ月の体験では不十分であり，就職後も継続して専門先端技術を学ぶシステムの構築が望まれる。大学はそのような社会人教育についても責務を負っており，都心のサテライトキャンパスを活用した社会人リフレッシュ教育プログラムを立ち上げる動きもある。

6. まとめ

以上，筆者の構造力学に関する教育・研究を振り返りながら橋梁などの実務設計に役立つ構造力学教育の有り方について私見を述べた。

筆者の構造力学教育に対する想いを実現するには，ひとつのキーワード「融合」を実践することである。古典的な構造力学と電子計算機の利用を前提とした離散的解析法の融合，大学と実務が協力した構造力学教育の実践である。そのためには大学と企業間の人事交流も必要となる。

このようなシステムの成果として，設計照査技術の高度化が可能となり，優れた品質の橋梁など社会基盤施設の建設とその維持管理技術が保証される。

参考文献

- 〔1〕加藤久人・川畑篤敬・西村宣男：波形鋼板ウェブを有する鋼・コンクリート複合構造橋梁の変位と断面力の実用計算法，土木学会論文集，I－59，2002. 4.
- 〔2〕加藤久人・西村宣男：波形鋼板ウェブを有する連続桁および斜張橋の実用解析法，土木学会論文集，I－63，2003. 4.

鋼橋の合理化と技術革新

川田技報 2000年 Vol.19

1. 鋼橋における技術革新の流れ

第二次大戦以降の約半世紀におけるわが国の鋼橋の技術革新は以下の3期に分けて論ずることができる。

第1期は戦後復興期から東京オリンピック・大阪万博までの約25年間であり、溶接技術、高力ボルト接合の導入、合成桁や曲線桁理論の開発と実用化など中小スパン橋梁を中心とした技術開発であった。

第2期は設計に電子計算機が導入され始めた昭和40年頃から今日までで、この間で特筆すべきは長支間化への挑戦であり、明石海峡大橋（吊橋）、多々羅大橋（斜張橋）はそれぞれの橋梁形式で世界最長となった。

第3期は第2期と並行して昭和60年頃から始まり次世代に繋がる中小スパン橋梁への新技術の導入である。中小スパン橋梁が対象という観点からは第1期と同様に見えるけれども、以下のような点で第1期の技術革新とは異なることを認識しなければならない。

- ① コスト縮減と耐久性の両立が保証されていること。
- ② 構造解析技術および施工管理技術の向上が反映されていること。
- ③ 要求性能の明確化と最新の照査技術が適用されていること。

2. 鋼橋分野に新技術の活用が求められる背景

21世紀初頭に迎える超高齢化社会に備えて、社会基盤の充実のために投資できる機会は現在をおいてないことが、1980年代の後半から言われ始めた。またわが国の貿易黒字に対する海外からの批判をかわすために、10年間630兆円の社会基盤への投資を国際的に約束してから数年の間に、わが国も含めてアジアの経済環境は曲がり角にきており、前の約束は反古になろうとしている。

このような経済情勢の中で、なお社会基盤の充実が国民生活レベルの向上のために必要であり、建設コスト縮減施策1)が政府の重要課題となった。この施策の背景にはわが国のコスト高、とりわけ建設コストの内外価格差の是正に対する要望がある。同時に、公共工事の入札に絡んだ不祥事への対処、WTO協定発効に対応するために導入され始めた一般競争入札制度2)もコスト縮減施策を支援するものとの見方もある。

さらに、一般競争入札の円滑な施行のために、公共施設の品質保証3)の重要性が指摘され、折からの規準や資格の国際的統一の動きと併せて、企業についてはISO9000sおよびISO14000の認証、技術者個人に対してはPE（Professional Engineer）やVE（Value Engineering）リーダー等の資格取得が求められる時代が始まっている。建設コスト縮減、一般競争入札および品質保証はお互いにリンクしあいながら、公共建設事業の仕組みに一

大変革をもたらそうとしている。

公共工事にかかわる設計・施工の品質確保に関して建設省の施策3)として、以下の5項目が挙げられている。

- ① 技術者・技能者の技量を向上させ、能力を十分に発揮させる。
- ② 技術開発を促進し、技術基盤を整備する。
- ③ 発注者・設計者・施工者の役割と責任を明確にする。
- ④ 品質確保・向上のインセンティブを付与する。
- ⑤ 発注体制の強化・支援策を充実する。

これらの基本思想に基づいて、具体的な施策が実施に移されようとしている。

建設コスト縮減と同時に品質確保のために、新技術の導入による成果が期待されている。建設省の公共工事のコスト縮減に関する行動指針4)では、平成11年度末までに、施主側の努力で6%、受注者側の努力で4%、合計10%以上の縮減を目指している。その中で民間技術提案の反映（VE）、新技術の開発・活用・普及が挙げられている。コスト縮減は新技術・新工法の採用や海外資材の活用等、受注者側の縮減努力だけでなく、発注ロットの適正化や設計と施工の一体化を目指したデザインビルドの導入等、受注側の努力を支援する規制緩和策の整備が有効である。

ゼネコンは設計段階にまで業務を拡大することでその保有する技術力を発揮しようとしている。製鉄メーカーの建材開発部門でも資材の販売を越えて新工法・新構造を積極的に開発し、その売り込みに力を注いでいる。また鋼橋を製作している重工業も下部工から上部構造までの一括受注を狙って、土工部門や床版工事部門の社内設置を目指している。このように公共建設事業の変革の胎動がすでに始まっている。

3. コスト縮減施策と鋼桁橋の合理化

わが国では、1990年頃から、建設コスト縮減を目指して、社会基盤施設の設計・製作・架設の各段階における技術革新の導入が注目されるようになった。西欧ではわが国に先立つこと10年、すなわち、1980年頃から、社会基盤建設コスト縮減の施策が講じられてきた。その効果が最も顕著に現れたのは、鋼橋を中心とした橋梁分野であった。鋼桁橋に関して、徹底した合理化が推進された結果、コンクリート橋に比べて鋼橋の経済的競争力が増し、新設橋梁における鋼橋の割合が増加したと言われている5)。鋼橋の合理化は少数主桁化と横繫ぎ材の簡素化、主桁フランジへの厚板の採用等に見られるが、圧延変厚鋼板（Longitudinally Profiled Plate＝LP鋼板）を用いることにより、鋼重増加を最少に抑える工夫が取り入れられている。

わが国でも、日本道路公団を中心として、合理化桁橋への取組みが開始され、技術革新の一つとして圧延変厚鋼板の採用例が増えてきている6)。桁フランジの突き合わせ溶接工程を省略することによる製作工程の簡略化に加えて、等厚鋼板を使用する場合の鋼重増加を、変厚鋼板の採用により回避できることが認められるようになった。さらに、変厚鋼板

はフランジのみならず、連続桁橋の中間支点付近のウェブや鋼箱桁の補剛フランジにも採用されるようになった。LP 鋼板以外にも鋼橋の合理化に対して、さまざまな技術革新が導入されてきている。鋼橋に求められている技術革新はコスト縮減と耐久性の向上である。

それらの新技術は、発案者の属性によって、以下のように分類できる。

A - scheme : 構造形式における発想の転換で発注側と受注側の合意に基づく。

B - scheme : 新しい構造要素、構造材料の開発で民間からの提案による。

C - scheme : 設計規準の見直しで、受注者側からの提案もあるが、発注者側の裁量に負う。支間長が 60m 以下の鋼桁橋を対象とした代表的な新技術としては、以下のものが挙げられる。

A - scheme : 横繫ぎ材の簡素化を考慮した少数主桁化

B - scheme : LP 鋼板、新型プレキャスト床版

C - scheme : 高力ボルト摩擦接合継手の限界強度の見直し、主桁腹板の補剛法の見直し、鋼板の板厚制限の緩和

各 scheme は文末の表 1 に掲げるような得失を有しており、個々の新技術の採用に際しては、お互いの関連性を十分に把握する必要がある。また、新技術を導入する際に、現行の設計規準に記述されていない強度条項が必要となる場合がある。これまでは実務設計に関連して実験的あるいは解析的検討が行われているが、それらの技術情報を統一的に整理する作業が望まれている。

4. 公共工事の推進における新技術導入のあり方

(1) 新技術導入の現状

公共施設の建設は、設計と施工の分離の原則により、発注者—設計者（コンサルタント）・発注者—施工者（ファブリーケータ）の 2 段階で行われている。新技術の導入は計画設計の段階から考慮されることが望ましいが、現在の受発注制度の中では最初から 3 者が協議することは許されない。

新技術の導入に対して 3 者はそれぞれに問題点を抱えている。行政のスリム化が強く求められる中で、発注者が高度な技術開発に専念する時間的余裕は与えられていない。設計者グループには高度な技術開発を実行できる人材は多くない。現状では高度な技術力を有する施工者がある能力を発揮するには受注に際しての VE 提案にのみ活路が開かれている。長大橋梁や特殊橋梁の場合は技術委員会が組織され、総合的な技術課題について学識経験者を含むエキスパートによる審議が行われる。しかし、技術委員会への新技術の提案の多くはコンサルタントをサポートする施工者によって行われているのが現状である。また、公社公団等の常置的審議会・技術委員会は新しい技術を普遍化する役割を担っているが、実施工に先立って新技術の可能性を審議することはない。

(2) 望ましい制度

上述のような問題点を克服するために、以下のような制度の導入が考えられる。

- ① 公共施設の建設は官主導から、CM（Construction Management）專業集団に移行する。
- ② CM 專業集団は NPO（Non Profit Organization）的性格でなければならない。
- ③ CM 專業集団は計画設計、製作、施工までに長じた人材であれば、発注者、設計者および施工者のいずれでも登用可能である。ただし、プロジェクトの完了まで責任をまっとうできることが条件となる。
- ④ CM 專業集団はプロジェクトオリエンティドである。プロジェクトの規模に応じて個人、あるいは複数名で構成される。

(3) CM 專業集団の育成と評価

上述のような新しい公共施設建設の遂行制度への転換を一気に行うことは不可能である。新しい制度は試行的に導入され、継続的に CM 專業集団の能力の育成と制度の熟成を図っていくことが重要である。そのためには新しい制度の効用を適切に評価するシステムの構築が必要である。このような CM 專業集団の育成と評価システムの構築こそ、行政内の専門家が担うべき緊急の課題であると考えられる。

5. 今後の合理化橋梁に求められる技術開発目標

合理化桁に関するデザインマニュアル 7) の事例調査でも明らかのように、道路橋の合理化に向けてさまざまな技術開発が試みられている。この段階でこれらの新技術に関する資料を系統的に整理して、鋼橋の合理化に与える効果を評価することが重要である。また合理化橋梁は適切な耐久性と使用性を確保した上でライフサイクルコストを低減した橋梁を言うのであって、初期コストのみを取り上げて論ずることは過ちである。

(1) 耐久性の確保

橋梁の耐久性を確保するためには、以下の項目に留意しなければならない。

a) 損傷しない床版

昭和 40 年代に施工された鋼桁橋を中心として、コンクリート床版の損傷が多数発生し、床版の打ち替えが困難な合成桁橋が敬遠されるようになった。しかし、欧米では桁橋を合成構造とすることが標準であり、わが国で見られたような床版の損傷はほとんど発生していない。最近、輪荷重移動試験装置を用いた実験により、床版の陥没に到る損傷のメカニズムおよび主たる原因が明らかにされるとともに、少数主桁橋に見られる床版の長支間化に対応するために、耐久性に優れた各種のプレキャスト床版、PC 床版が開発されている。さらに床版の耐久性を確実なものとするには、コンクリートと舗装の間に防水工を施工するとよいことも指摘されている。

b) 疲労問題のない鋼桁の構造法

都市高速道路などで横繫ぎ材取り付け個所の主桁腹板やガセットに疲労損傷が多数発生している。床版の剛性不足、重車両の増大などの要因もあるが、設計上考慮していない大きな局部応力を発生し、しかも疲労等級の低い構造詳細が用いられていることが主たる原因である。このように設計計算で捉えられない局部応力は、下路アーチ橋の主構造と横桁

の取り付け部における疲労問題にも共通している。

今日、構造詳細まで考慮して鋼橋の3次元解析を行い、局部応力の発生状況を調べることはそれほど困難ではない。鋼橋の立体的構造特性を考慮して、横繋ぎ材の適正配置を検討することが必要になっている。

c) 腐食しやすい構造詳細の改善

鋼材の腐食も大きな問題である。錆の発生には空気と水分が関係するが、水はけの悪い箇所、塗装の乗りにくい細部の構造改善など、細かい配慮が必要である。また、耐候性鋼材の信頼性を高める材料開発を推進することが期待される。

(2) 使用性に関する留意事項

一方、使用性に関しては、すべてがインフラ側だけで解決できる課題ではないが、以下のような車両の走行性（乗り心地）、車両走行による振動騒音の問題を解決しなければならない。

a) 路面の平滑性の確保

路面の平滑性は走行車両によって励起される動的応答倍率（設計上は衝撃係数で評価）に大きな影響を与えるので、耐久性のある舗装材料の開発が望まれる。勿論、舗装の劣化を引き起こすような床版の変形や床版上の突起などは避けなければならない。

b) 伸縮継手部の段差の改善

車両の乗り心地に対して、伸縮継手部の段差の影響が大きい。段差のある伸縮継手上を通過する重量車によって、付近の床版や床組に対する衝撃係数の増大、騒音、地盤振動などが誘起される。上部構造の連続化、ノージョイント化によってこの問題は軽減ないしは解消されるが、構造的に別の問題が生ずる場合がある。

c) 路面と車輪の摩擦音・エンジン音・排気音の低減

交通車両の騒音問題は、最終的には車両側の音源を改善する他はない。インフラ側で支援できること、例えば、縦断勾配を可能な限りなだらかにすること、路面の消音処理などについて努力する必要がある。

(3) 環境負荷の評価

さらに、今後は橋梁の建設に伴う環境負荷の総量に対して、厳しい条件が課せられる可能性がある。例えば、①使用材料の製造時のエネルギー消費量とCO₂、SO₂排出量、②工事に伴う汚水の発生、生態系への影響、③舗装材料の磨耗、凍結防止材料、塗装の剥げ落ちなどの環境負荷要因を数量化し、橋梁評価の一指標とすることが考えられる。

6. 性能設計が導入された後の設計・施工システム

最近、各分野において性能設計への志向が強くなっている。道路橋示方書についても次の中間改訂では各条項に要求性能が明確に記述され、これに応える性能照査法として新しい照査法を認めるとともに、見なし仕様として現行の条項の適用も可能にする2層構造

が考えられていると聞く。このような書式を導入することによって橋梁の設計に新技術を適用する自由度が増すものと期待される。このような設計・施工システムが導入されたとき2つの問題点が存在する。

① 2つの照査法のうち、技術革新が期待できる新しい照査法は慣行的な見なし仕様より上位にあるから、橋梁の設計業務は現在より高い能力を技術者に要求する。

② 新しい照査法を認定する作業を担当する組織の設立とその運用の適正化を図ることが重要である。

このような問題点は単に示方書や制度の改革ではなく、社会体制の変革なくしては実効が挙がらない。発注機関、設計会社、製造会社で社会基盤施設の計画・設計・製作に関する能力を蓄えた人材は、前述したようなCM專業集団に移動する“人材の流動化”が必要となる。そうすることが当人の名誉であると社会的に認知されれば、土木技術者とりわけ橋梁技術者の社会的ステータスが向上するであろう。

7. おわりに

誌面の都合で本文中では述べられなかった2、3の想いについて述べる。

橋梁の更なる合理化に向けて期待される材料開発としては、大型圧延材、海浜対応耐候性鋼材、超高強度ボルトなどがある。また、橋梁構造の合理化と耐震性を両立させることに留意することが大切である。

新技術の導入に際しては、事後にその効果を適切にレビューすることが重要である。実構造に対して最初に新しい技術を適用する際には、各種の調査や実験が行われ、その経費を考えると総工費的には大きなコスト削減効果は期待できない。しかし、以降の適用に当たっては研究開発費等の初期投資を伴わないので確実にコスト削減が達成できる。したがって、公共施設の建設コスト削減に対して共通的に貢献する技術開発に対しては公的資金の適切な運用が望まれる。

新技術の効果を適正に評価するためには建設にかかわる種々の技術情報が確実にデータベースとして整備されていることが必要である。現在、急速に適用範囲が拡大している建設CALS/ECがそれを実現する可能性を秘めているように思われる。

最後に、現在進められている合理化橋梁の命題である“安くて長持ちする橋梁”を実現するためには、発注者、設計者、施工者のみならず道路利用者も含めて、それぞれが遵守すべき節操を重んじることが大切である。

参考文献

- 1) 建設省：公共工事の建設費の縮減に関する行動計画，1994。
- 2) 建設省：公共工事の入札・契約手続の改善に関する行動計画，1994。
- 3) 公共工事の品質に関する委員会報告，1996。
- 4) 公共工事コスト削減対策に関する行動指針，1997。

- 5) 関西道路研究会道路橋調査研究委員／構造計画小委員会：橋梁の技術革新，1994.
- 6) 西村宣男：合理化桁橋梁への LP プレーットの適用について，鋼材倶楽部：第 2 回土木鋼構造研究シンポジウム，1998.
- 7) 日本鋼構造協会／次世代土木鋼構造研究特別委員会／合理化桁の設計法研究小委員会：合理化桁に関するデザインマニュアル（中間報告），1998.

表-1 新技術 scheme ごとの得失の比較

A-scheme	○ コスト縮減に対する効果大
	● 設計思想・安全性の考え方に十分な配慮が必要
B-scheme	○ 適材・適所の使用をするとコスト縮減の効果あり
	● 開発コストを要す
	△ コスト縮減に対する効果を引き出す工夫が必要
C-scheme	○ コスト縮減にある程度の効果あり
	● 適用に際しては，十分な裏付けが必要
	● 適用区分など条件が付き，設計は若干複雑になる

鋼橋と性能照査型設計

第 1 1 回近畿地区鋼橋技術講習会（日本橋梁建設協会） 2000 年 2 月

性能設計のあり方

（１）ネッシーの正体を暴く

数年前から，我が国においても構造物の設計規準の有るべき規範に関する議論が持ち上がり，その中で性能照査型あるいは性能要求型設計法なるものが注目を集め，土木学会コンクリート委員会，日本コンクリート工学協会，日本建築学会，建設省総合技術開発プロジェクトなどで調査研究が始まった．

最近，土木学会等の諸行事の中で，性能設計法に関する調査研究の進捗状況，規準化への試み等の話題提供を聞く機会が多いが，プレゼンタータの属性によって，性能設計の内容や捉え方に差異が感じられる．土木分野における性能設計法への取り組みはコンクリート工学系の研究者が先行しているが，彼らの内容は“性能設計＝耐久性設計”なる印象を強く受ける．鋼構造を専門とする者にとって比較的理解しやすいのは，耐震性能を念頭に置いた鋼製橋脚の耐震設計法であるが，これを鋼構造物全般に普遍できるものではない．性能設計法の包括性・多面性に起因して，性能設計法という正体不明の存在（ネッシー）をそれぞれがある側面から捉えた議論となっているように思われる．

性能設計の実態を知るには，後述するように性能設計の導入を必要としている社会的背景を分析しなければならない．

（２）出発点はシステムにあり

ここでは対象を道路橋に限定すると，そこには必ず設計示方書が介在するが，クライアント（発注者）側からみた性能設計法による示方書の特徴は，以下の様に語られている．

- ・性能規定と項目規定が混在した現行の道路橋示方書と異なり，性能設計法による示方書では①構造の用途に関する規格性能（建築限界，耐荷力等），②ライフサイクルコストを考慮した耐久性能，③景観等の付加性能・・・などの要求性能のみが記述される．
- ・受注者は構造物が性能規定を満たすものであることを「適切な方法」を用いて照査する．その際，新技術を活用することにより経済性を達成するように努める．
- ・上記の新しい性能照査型の設計システムに加えて，現行の示方書（内容はかなりの部分は改訂される可能性がある）を用いた従来型の設計システムも見なし規定として併用する．

このような動向に対して，鋼構造のある研究者は見なし規定を構成する力学条項の整備に努力を傾注しようとしている．また別の研究者は「適切な方法」を適用した性能照査技術の具体化に取り組もうとしている．いずれにせよあらゆる技術レベルの技術者を対象とした性能設計法は，当面は，階層化されるものと考えられるが，新技術の活用やコスト縮減の可能性は「適切な方法」を適用した性能照査型の設計法に軍配が上がるものと思われる．競争原理に従って，橋梁設計は前例に倣う姿勢では通用しなくなる．併せて，性能設計法

を社会に広めて行くために、性能照査型設計法の受け入れを可能にする社会システムの有り方について検討しなければならない。

（３）土木技術をコントロールするのは誰れ

いま最重要課題として求められている公共施設建設コストの節減を達成するためには、規制緩和（示方書の過剰な制限の弾力化ないしは撤廃、受発注システムの透明性と効率化、発注ロットの適正化等）と新技術の活用が必要である。新技術の適正な活用や示方書の制限撤廃は高度な技術的判断が要求される。これまでは建設省を中心とした行政が許認可権の名の元に土木技術をコントロールしてきた。新技術が活用しやすい形で示方書に盛り込むにはかなりの期間が必要であり、即時性を必要とする技術革新には行政主導型の技術コントロールは弊害が多いことが明らかになってきている。ましてや、今後１０年間で２５％の国家公務員を削減し、スリムな行政を目指す我が国においては、最早、土木技術のコントロールを行政側のみに委ねることは不可能と思われる。性能照査型設計法はまさにこのような社会情勢において期待される設計法である。

このような情勢の中で、性能照査型の設計法が導入されたとき、照査に用いる「適切な方法」を誰が評価・認定するのが問題となる。建築分野では以前から一定以上の規模あるいは技術水準の高い建築物の設計施工にあたって、学識経験者で編成される技術評定委員会における審議に付すことが行われてきた。土木分野においても、重要な橋梁の計画施工にあたっては、発注者、設計者及び学識経験者からなる技術委員会が組織され、技術革新が推進されてきた。今後は発注額の大半を占める一般橋梁の計画施工についても、技術革新が強く求められるから、その可否を評価するシステムの構築が急がれる。

上述のように行政には技術をコントロールする余裕は無く、受注者側がそこに関与することは有り得ないから、技術のコントロールは第３者機関を設置して、そこで集中的に行うのが効率的である。民間発注が大半を占める建築分野と異なり、行政発注が大半を占める土木分野における技術評定の有り方が性能設計法の成否を握っていると言っても過言ではない。

これまでに機会ある毎に述べてきたように、第３者機関あるいはそこに属する人材には以下のような資質が求められる。

- ・第３者機関に属する技術者の経歴は発注者、設計者、製作者の何れであっても良いが、それら全てにわたる知識を有していること、
- ・第３者機関はNPO (Non Profit Organization) 的でなければならない。
- ・第３者機関は公平性、透明性が確保されなければならない。

（４）行政の役割

このように土木技術のコントロールが行政の手を離れても、施主側には土木行政に対する責務が残っているのは当然である。望ましい社会基盤施設の設計施工システムの構築、第３者機関に属する人材の育成および完成した施設の技術的評価を着実に行うことが行政の役割である。

都市機能再生への橋梁技術の活用

橋梁と基礎 ２００１年１２月 巻頭言

最近、公共投資の見直しが声高に叫ばれるばかりでなく、１０年後には現在の投資水準の６０％に落ち込むとの予測がある。さらに投資額の大半は既存施設の再構築と維持管理費に充当され、新規施設の建設に回される額はほんの僅かになると言われている。このような情勢の中で、前世紀後半のようなテンポで長大橋梁が建設される可能性は更に低い。第２次大戦後５０年をかけて培ってきた我国の橋梁建設技術は最早不要となるのであろうか。橋梁の維持管理に関する技術革新は今後とも社会的要請であるが、土木教育機関を卒業する若い人材を引き付ける魅力に乏しい。

筆者は最近の１０数年間、主として高速道路に用いられる橋梁の合理化施策にささやかな貢献をしてきたが、大都市内の各種施設の合理化・技術革新に対する貢献を等閑にしてきたと反省している。大都会の魅力として、多くの人が集まることによる豊富な情報量、文化的なイベントに触れる機会に恵まれていること等を挙げることができる反面、道路交通の混雑、通勤負荷、居住者同士の疎外感など負の要因も多い。行政などによってこれを解消する努力は地道に続けられているが、人口集中による負の要因が増加するスピードに追いつかないのが現状である。

そこで、郊外や過疎地の高速道路の技術革新に貢献するよりも、大都市の機能再生に向けての技術革新に貢献する方が、市民に受け入れられる社会的貢献であるし、またプロジェクトとして展開する機会が多いと考える。

都市機能はハードとソフトの両面を融合させて再生プランを練る必要がある。防災、アメニティ、バリアフリー等も満足するハイレードな施設を目指すべきである。ここでは、橋梁技術を活用する観点から、主としてハード面について述べる。

大都市圏に居住して、常日頃感じている負の要因は前述のように、道路交通の渋滞、通勤電車の混雑、交通機関の乗り換えの負担などである。これらを解消するための方策としては

- ① 平面交差道路の立体交差化への急速施工法の適用
大都市圏の放射道路と環状道路の結節点の立体交差化工法として、従来工法では３～４年要しているが、３～４ヶ月で完成する急速施工法を開発し普及するべきである。
- ② ターミナル広場への人工地盤構築による歩行者と車両の分離
都市の主要ターミナル広場の横断歩道を無くすることは、車両通行を円滑にするばかりでなく、歩行者の安全とりわけ身障者に対する理想的バリアフリー化を達成できる。人工地盤は横断陸橋に変わるものではなく歩行者の移動空間の中心となるように隣接ビル等と連結される。

③ 都市高架道路の車線増による渋滞解消

具体的事例を挙げれば、大阪市営地下鉄御堂筋線淀川以北の地上線を地下に移設することにより、平行する国道 423 号線（新御堂筋）の車線増を図る。

これらの事業展開に対して必要な技術的課題は現在の橋梁建設技術によって十分に対応可能である。より効率的な実施に対しては数々の規制を取り払うとともに、公共工事の計画・推進の制度についても、官民の叡智を集めて見直しを図る機会として捉えたい。

道路構造物の建設と新技術の活用

橋梁メーカー講演会 2002年12月10日

1. はじめに

産官の協調で展開してきた公共施設の建設（計画・製作・施工）の有り方が批判され、さらに、建設投資額の計画的削減が実行されつつある。労働省、厚生省、外務省など他の行政分野に対する批判がマスコミに取り上げられ、我国特有である護送船団方式の産官体制の改革が求められている。長野県に端を発したダム建設不要論や最近の高速道路建設への投資不要論の矢面に立たされているのは地方公共団体や特殊法人であり、直接国土交通省が批判の対象にならないのは不思議である。

明治以来、国土開発は官主導で行われてきた。先進国に追いつくための行政方式として官主導は確かに効率の良い方式であったが、世界第 2 位の国民総所得を達成した後も、これまでと同様の官主導体制は成立しないことを国民全てが認識しなければならない。中央行政は小さい政府を目指すべきであり、不要な許認可権を放棄すべきである。公共施設の要不要の判断には市民がもっと深く関わる必要がある。しかし、専門知識を必要とする技術に関して、小さい中央行政がコントロールすることは不可能であり、行政に替わる受け皿が必要であることは明白である。

本稿は我国における公共施設の建設における技術論に関連して、現状の問題点と将来の予測について私見を述べることにする。

2. 建設 NPO

2. 1 現行建設行政の限界

近い将来における公共施設の建設推進システムにおいて、要求される基本的条件は説明責任（アカウンタビリティ）と透明性（トレーサビリティ）である。公共施設の建設が市民の賛同を得て、正当な手続きを経て実行されていることの証明、計画から施工にわたる各所において、適切な施行がなされていることの評価が可能なシステムであることが求められる。この条件に従えば、現在の行政システムにおいて公共施設の建設の責任者を行政内部に求めることは不可能である。その理由は、

- ① 全ての公共施設の建設において、財務から技術までの責任を行政が担うには圧倒的に人材が不足している。
- ② 行政の技術者は2～3年で移動するから、一つのプロジェクトの責任を一貫して担うことができない。
- ③ 行政が公共施設建設の立案から発注までを支配しているシステムは、産官間の腐敗を生じ、国民のための真の行政の遂行に適していない。
- ④ 行政の入口である公務員試験の内容は公僕たる行政マンの選抜方法になっていない。

等、枚挙に暇無い。

2. 2 プロジェクト推進システム

(1) プロジェクトマネジャーの資質

それでは誰が公共施設の建設におけるキーマンとして相応しいのか。答はプロジェクトマネジメント（PM）あるいはコンストラクションマネジメント（CM）のプロである。残念ながら我国においては、PM・CMの専門家を育てる土壌は今のところ希少である。しかし、海外工事においてはPMの傘下に入って、公共施設の建設に従事した経験を持つ我国の技術者は少なくない。

プロジェクトマネージャーとして求められる人材の資質は、技術的能力は当然のこと、公共施設の建設と言う特別な目的のために、営利的起業家とは異なる倫理観を有していることである。このような役割を担える人材は、少なくとも20年以上の実務経験を有していることが必要で、正しい倫理観とともに優れた指導力を有していることが自他ともに認められていることが重要である。昨年からスタートした土木学会認定技術者資格制度の特別上級技術者資格保有者はプロジェクトマネージャーとして相応しい資格者集団であり、出身母体は行政、コンサルタント、建設会社、製造会社を問わない。我国の学者は、マネジメントの経験を持たないので、一般に不向きである。

最近、大手ゼネコンを中心として公共施設の建設の効率化のためにデザインビルト（計画設計から建設までの一環受注）を指向する動きがあるが、営利企業であるゼネコンが公共施設の計画から参画するのはルール違反である。ここで言う中立性を保証されたプロジェクトマネージャーによってのみデザインビルトが可能となる。

(2) PM組織と行政の役割

PM組織は、行政によって選任されたプロジェクトマネジャーを中心として、契約した管理会社、設計会社、施工会社、製作・架設会社の代表者で構成される。管理会社の主たる役割は契約から設計施工のあらゆる分野における決定事項・了解事項に関するデータを整理し、必要に応じて直ちに情報を提供することである。このようなPM集団は行政の代行者として絶大なる権限を有するが、それに相応しい責任を負う。

一方、行政はプロジェクトが国民の支持を得ていることの証明と財政的支援について責任を負う。何より、このような公共施設建設の推進システムと人材の育成が行政の果たすべき責任である。

3. 技術指導の体験

3. 1 関与した代表的プロジェクト

上述のような公共施設建設の理想的システムは、現在の我国には組織されていない。従って、現行のシステムの中で、理想的システムの持つ特長を個人的に疑似体験するしかないのである。

この10年位の期間、種々の機関から技術指導の要請があった。それらへの対応の中で

新技術の活用を実現する努力を続けてきた。最近10年間における鋼橋に関する主な技術指導項目は、以下の通りである。

- ① 伊勢湾岸自動車道橋梁上部構造技術委員会・名港トリトン（JH）
主塔八角形補剛断面の耐荷力、ケーブル配置、鋼床版とRC床版の結合構造
- ② 丹南交差点立体交差事業（大阪府）
プレキャスト工法の採用による急速施工立体交差橋梁
- ③ 北花田交差点立体交差事業（大阪府）
直接基礎立体交差橋梁（UF0）
- ④ 四国縦貫自動車道混合桁橋技術委員会（JH 四国）
PBL（孔あき鋼板ジベル）による鋼桁とPRC桁の結合構造
- ⑤ 宿茂高架橋技術委員会（JH 四国）
ジャッキアップ回転工法による山岳橋梁の架設
- ⑥ 近畿自動車道連続合成桁技術委員会（JH 関西）
合成2主桁の復活
- ⑦ 跨座型モノレールPC軌道桁の衝突緩衝装置の開発（沖縄モノレール）
地震時桁間衝突の緩衝装置
- ⑧ 阪南2区連絡橋（大阪府）
景観・環境重視橋梁形式の選択、暫定施工断面の耐風安定性
- ⑨ 東名阪自動車道掘割構造技術検討委員会（JH 中部）
鋼管矢板の本体利用、頂版先行施工による急速施工
- ⑩ 新庄・長柄線検討委員会（大阪市）
斜張吊橋と2重合成連続桁橋

これらのプロジェクトのうち、⑦、⑨および⑩について、新技術とその活用方法を後述する。

3. 2 技術のバックグラウンド

これらの技術指導に並行して、研究室では土木構造物に関連する技術革新を目指して、以下のような研究を推進している。

- | | |
|----------------------------|-----------------|
| ① 波形鋼板ウェブPC桁構造の変位と応力の実用計算法 | （自主研究） |
| ② 開断面箱桁の耐荷力特性 | （自主研究・科学研究費） |
| ③ 高力ボルト摩擦接合継手の設計法の合理化 | （自主研究） |
| ④ CFRPを用いた長大吊橋用ケーブルの開発 | （自主研究） |
| ⑤ ケーブル系橋梁におけるケーブル安全率の決定法 | （自主研究） |
| ⑥ 鋼製橋脚の耐震性能評価法 | （自主研究、民間との共同研究） |
| ⑦ CFRP板を用いた鋼製橋脚の耐震補強 | （自主研究） |
| ⑧ 直接基礎橋梁の地震時滑動限界と残留変位の評価 | （自主研究） |

- ⑨ 地震時桁間衝突の緩衝装置の開発 (自主研究)
- ⑩ モノレール軌道桁の列車走行振動 (受託研究)

これらの研究課題を担当している構造工学研究室のスタッフは教官 3 名，博士後期課程 3 名，博士前期課程 1 1 名，学部 4 年生 6 名，研究員 5 名，研究生 2 名である。

また，これらの課題を推進するには実験的研究ないしは解析的研究，あるいはそれらを併用するが，解析的研究においては汎用ソフトを利用しないことをモットーとしている。汎用ソフトで解析できる課題は，大学の構造力学研究室において行う研究のレベルではない。汎用ソフトでは対応できない新しい構造解析技術の開発が目標でなければならない。

研究室において独自に開発した解析ソフトの主なものを以下に掲げる。

- ① NAFRAM：3 次元鋼骨組構造の弾塑性有限変位解析，Ver.1（開断面），Ver.2（閉断面）
- ② DYNAPRAM：3 次元鋼骨組構造の時刻歴応答解析
- ③ OLFAM：板構造と骨組の結合モデルによる弾塑性有限変位解析
- ④ NASHEL：アイソパラメトリックシェル要素による曲面構造の弾塑性有限変位解析
- ⑤ NASTAP：OLFAM の曲面構造バージョン，繰り返し塑性履歴考慮
- ⑥ NACOMP：合成桁の耐荷力解析
- ⑦ SUSP：ケーブル構造の非線形解析
- ⑧ SUSPD：ケーブル構造の動的応答解析，パフエッティング・フラッター含む
- ⑨ COLLIS：衝突現象解析
- ⑩ SABOL：高力ボルト摩擦接合継手の限界強度解析

4. 新技術活用事例

4. 1 新庄・長柄線橋梁計画（プロジェクト⑩，ソフト⑦⑧）

大阪市東淀川区と大淀区を結ぶ都市計画道路新庄・長柄線は大阪市建設局が担当する最後の淀川架橋である。このプロジェクトは淀川渡河部とこれに隣接した大川渡河部の 2 つの橋梁からなっている。現在確定している都市計画路線では，既設の道路（大阪高槻京都線）からの分離部および淀川左岸側の取り付け部では家屋が密集した市街地が形成されており，工事のために多数の家屋の立ち退きが必要である。また国交省の淀川スーパー堤防計画に抵触するので堤防と並行する路線の工事計画に支障が生じた。

そこで淀川渡河部については，都市計画路線の変更を前提として，堤防と並行する区間を解消し家屋の立ち退きを最小限とする斜め渡河路線を検討することとなった。また当該個所では河川の湾曲に伴い深掘れが発生しており，橋脚の位置および閉塞率に厳しい制限が加えられる。これらの条件を満たすために斜角 6 0 度，中央径間長 800m 級の長大橋梁が候補として浮上した。

ところが現地は大阪空港へ着陸する航空機の進入路にあたっており，構造物の高さに制約が課せられるため一般的な斜張橋は採用できない。斜張橋の桁上塔高さは中央径間長の 20～30% で最低の 20% としても桁上 160m（水面上 180m 程度）であり航路高さ制限 165m

を越えてしまう。一方，長大吊橋の桁上主塔高さは中央径間長の 10% であるからこの橋梁では桁上主塔高さは 80m で収まる。ただし，現地の地盤ではケーブルを外定式にするアンカレッジの建設費が高額となるので，自定式とならざるを得ない。これらのことを総合的に判断して自定式斜張吊橋案が浮上した。

自定式斜張吊橋は世界的にも前例の無い橋梁形式であること，架設工法が相当複雑になることが予想されるため，その採用にあたっては各種の事前検討が必要であった。主な技術的検討事項は以下の通りである。（詳細は OHP で説明）

① 主ケーブルおよび斜張ケーブルの現地搬入と施工法

架橋地点は淀川大堰の上流であり，船便にてケーブル材料を現地搬入することは困難である。主ケーブルをストランド方式とする場合，陸上輸送が困難な場合がある。その場合，エアスピニング工法の可能性（装置の設置場所，施工期間等）も検討した。また 1 部の斜張ケーブルは現場製作とすることにより施工可能である。

② 主ケーブルの主塔上における移動量

主ケーブル架設後のフリーケーブル状態の形状に対して，中央径間中央部の主桁重量を吊材に負荷した時の形状が大きく変化する。斜張ケーブルにより剛に拘束された主塔上でケーブルは約 2 m 橋軸方向に移動する。これを可能にするにはブラケットと移動装置が必要となる。

③ 主ケーブルと斜張ケーブルの干渉の回避

始めに斜張ケーブルを施工し，その後で主ケーブルを施工すると，フリーケーブル時に上段の斜張ケーブルと主ケーブルが干渉する。これを回避するために，上 2 段の斜張ケーブルは後施工とする。そのことにより，塔および主桁の形状管理，発生応力に問題が無いことが明らかにした。

④ 主ケーブルの桁端定着

自定式構造であるから，主ケーブルは桁端部に定着することになる。主桁幅および桁高を広げることにより，ストランドケーブルの場合でもエアスピニングの場合でも定着可能であることを明らかにした。

⑤ 全体架設計画

塔の施工に引続いてバランス工法により斜張ケーブルおよび主桁を張出す。中央径間中央部の主桁をステーキングで支持し，既設の斜張ケーブルで支持された主桁と連結する。その後，桁端に定着しながら主ケーブルを張り渡す。塔上でケーブルを橋軸方向に移動させながら，主径間中央部主桁を主ケーブルに預ける。上 2 段の斜張ケーブルを施工する。

⑥ 主桁の座屈安全性

我国で建設された斜張吊橋は鰻ヶ沢人道橋（中央径間長 110.15m）1 橋あるが，自定式斜張橋は始めてであり，特に中央径間中央部の座屈安全性を検討する必要がある。現在，研究室において架設時の応力履歴を含めた解析ソフトを開発している。

⑦ 耐風安定性と耐震設計

中央径間 800mを超える長大橋梁で、橋梁のフラッター限界風速、限定振動発現の有無等については風洞実験を実施しなければならない。研究室には類似断面の2次元風洞実験による空気力

が与えられていれば、3次元場でのフラッターおよびパフエッチングを解析するソフトを保有しているので容易に斜張吊橋の耐風安定性を照査できる。耐震検討も同様である。

⑧ 主ケーブルの2次応力

斜張吊橋では斜張区間と吊区間の境界において、主ケーブルの曲げ角度が大きくなるためケーブルの曲げ応力が局部的に大きくなる可能性がある。ラッピングされたケーブルの2次応力解析ソフトを用いてこの問題も解明する予定である。

⑨ ケーブルの防錆

ケーブルの安全率は斜張橋で2.5が用いられている。現在、ケーブル系橋梁におけるケーブルの所要安全率に関する研究を進めている。その成果を活用して斜張吊橋のケーブル安全率を決定する。その際、ケーブルの耐久性がポイントであり、取り替えが困難な主ケーブルの防錆技術は最高レベルを採用したい。

一方、大川渡河部の橋梁については史跡的価値を有する毛馬閘門を横切るので、閘門施設の景観を可能な限り阻害しないような桁高の低い4径間連続合成箱桁橋とすることとした。最大支間長は165mで我国最大級の合成桁橋となる。中間支点部の桁高をできるだけ低く抑えたいので、中間支点付近は下フランジ側にもコンクリートスラブを配した2重合成桁橋の可能性を検討している。その構造詳細や施工方法についての検討が必要である。

橋梁形式検討委員会：大阪市建設局、立命館大学（水理）、大阪工業大学（景観、生態）、大阪大学（構造）、コンサルタント

構造検討：大阪大学、ケーブルメーカー、橋梁メーカー

4. 2 東名阪自動車道・掘割構造（プロジェクト⑨）

東名阪自動車道（名古屋第2環状線）は2005年の愛知万博関連道路とするため、未開通区間の上社―名古屋南間の施工を急ぐ必要があった。この区間の道路用地は殆ど買収済みであるが、路線の周辺は閑静な住宅地であり、高架橋では環境面から工事の同意を得にくい状況にある。そこで急速施工と周辺環境の両面に配慮して、新しい半地下道路構造の検討が開始された。

新しい半地下道路構造の特徴は以下の通りである。

① 鋼管矢板土留め壁

止水性に優れたジョイント付き鋼管矢板を用い、内壁コンクリートと孔あき鋼板ジベルによって合成構造とする。

② 頂版先行施工

数メートル掘削した後、頂版を先行施工し予め打ち込んでいる鋼管矢板と結合する。頂版以下底版までの掘削は切梁なしで大型機械により効率的に施工する。

③ 耐震性に優れた合成壁と隅角部

鋼管矢板と内壁コンクリートの合成構造である合成壁、これと頂版および底版との隅角部の耐震性は十分に優れていることを実験的に確認した。

④ 建設コスト

従来の鋼板矢板を切梁で支える方法やSMW（ソイルセメント杭）を用いる工法に比べて、経済性に遜色が無い。建設期間の短縮や隣接する構造物の変形に対して有利であることにより、都市内道路に適した工法である。

2001年に実施した技術的課題および経済性に関する検討結果、本工法を当該路線の大半の区間に適用すべく準備が進められている。（詳細はOHPで説明）

基本検討：JH中部支社、コンサルタント、中部大学（地盤、地下水）、大阪大学（本体利用構造）、鋼管杭協会

構造検討：大阪大学、鋼管杭協会、コンサルタント

将来検討：日本鋼構造協会、鉄鋼連盟、国交省、JH、阪神公団、大阪大学他

4. 3 跨座型モノレールPC軌道桁の衝突緩衝装置の開発（プロジェクト⑦、ソフト⑨）

兵庫県南部地震の際、大阪モノレールPC軌道桁の支承部品（ダボと称する鋳鋼製の沓の固定装置）が破損した。事後の調査により破損の原因は、①ダボの底盤と突起部の間の形状に起因する応力集中、②地震時桁間衝突に起因する衝突衝撃力であることが判明した。応力集中に関してはダボの形状改良により応力集中係数を半減することにより解決した。桁間衝突に関しては、鋼板と強化ゴムを重ねた積層板を新たに開発し、それまでの鋼製くさびと取り替えることにより、緩衝材の役目を活用することとした。当初大阪モノレールの完成区間に活用することを狙ったが夜間作業で全数取り替えることが困難なことから、新規延伸区間において適用することとした。現在建設中の沖縄モノレールでは、全線この緩衝材を適用している。（詳細はOHPで説明）

地震直後の技術検討会：大阪府、大阪高速鉄道、コンサルタント、住友金属テクノロジー、大阪大学

緩衝材の開発：ゴムメーカー、コンサルタント、大阪大学

5. まとめ

以上、公共施設建設の推進システムの有り方に関する私見を述べ、新技術活用的事例を紹介した。理想的な制度を立ち上げるためには多くの経験を蓄積する必要がある。そのためには国民の納得する行動計画・行動指針を定め、さらに試行を積み重ねることが現実的

な方法である。国交省においては各種の制度の試行が行われている。それを地方行政単位でも試行可能なように広めて行かないと地方分権もお題目に終わる可能性がある。

建設分野の活力を取り戻すには、なにより技術者一人ひとりの自覚と研鑽が望まれる。

土木分野における技術者教育・資格支援の動き

日本造船学会誌 2002年7月

1. はじめに

この10年位の間、我国の科学技術の水準が世界のトップクラスであることを疑わされる事故が続いて発生した。H2ロケットの打ち上げ失敗、原子力施設における事故、山陽新幹線のトンネルにおけるコンクリート片の落下事故など枚挙に暇ない。資源の乏しい我国が引続いて先進国であり続けるためには、科学技術立国を自負するに足る科学技術教育と技術者の自覚が必要である。そのためには工学に関する各学協会の賛同を得て、技術者資格試験の普及とこれを支える技術者教育の重要性が認識されるようになった。

2. 技術者資格制度の動向

我国の数ある技術者資格の中で工学の幅広い分野を対象とした資格に技術士がある。社団法人日本技術士会が認定した技術士の資格保有者は約41,000人、そのうち土木分野は約20,000人である。土木分野の技術士の数が多い理由は、設計コンサルタント業では技術士の数に応じて受注できる業務の数が決まり、従って技術士資格の取得が給与に反映されるというインセンティブが存在するからである。

これまで技術士資格を取得するには、技術士補試験に合格した後実務経験4年を経るか、大学を卒業して実務経験7年を経ると受験資格が与えられ、記述および面接試験に合格しなければならなかった。この試験制度は最近改訂¹⁾され、大学卒業時に修習技術士の資格を取得した後、技術士資格を有する指導者の下で4年間の実務経験を経て技術士の受験資格が与えられる。後述する国際相互承認に向けて欧米の技術者資格のレベルとの整合性を取るための処置であった。修習技術士の資格試験である第1次試験(2002年からスタート)は、文部科学省が認定する大学等の教育課程を終了した者については免除される。この文部科学省の指定に後述する技術者教育の評価が関係してくる。

米国における技術者資格については、各州が認定するPE (Professional Engineer) が技術士に相当する。PE資格は、大学卒業時に工学の幅広い知識を習得していることを審査するFE (Fundamental Engineer) 資格を取得した後4年間の実務経験を経て受験資格が与えられる。米国におけるPE資格保有者は約40万人で我国の10倍と多いのは、工学の幅広い分野で主任技術者として仕事を担当する際に、PE資格が要求されるからである。英国でも同様の技術者資格制度があり、Chartered Engineer と称されている。この資格保有者は約25万人である。

最近、技術者資格の国際的相互承認の動きが北米 (NAFTA)、欧州 (FEANI) で始まっている。これは地域内における技術者の自由な移動と活動の推進を目的としたもので、WTOの理念に添ったものである。アジアでもAPEC Engineer と称する国際的相互承認協定²⁾

が締結され、2001 年より登録が開始された。

3. 技術者教育の評価

最近、大学人にとって大学評価・基準認定（accreditation）が重要な課題となっている。文部科学省の管掌する大学評価・学位授与機構が行なっている評価の目的は次のように説明されている。「大学の基準認定の真の目的は、大学を格付けしたり序列化したりすることではなくて、評価というプロセスを通じて大学の質を維持し、更に向上改善させることである」。この機構は大学の教育研究および管理運営を総合的に評価することを目的としている。

一方、日本技術者教育認定機構（JABEE）は大学学部レベルにおける技術者教育プログラムの認定を行なうもので、その役割は次のように説明されている。「高等教育機関の自由意思に基づき学部の教育プログラムを単位として技術者教育プログラムの認定とその教育レベルの確保と向上を主な目的とする」。

技術者資格のうち低位資格試験はこのような評価機関（JABEE）の認定を受けた大学等の卒業生に対して免除されることになっている。技術士制度の第 1 次試験を受けなくても申請することによって修習技術士の資格が付与される。少子化社会を迎えて大学の土木系学科は生き残りをかけて JABEE 認定を得るべく準備を始めている。

4. 土木学会の対応

土木学会は、1999 年、土木技術者の倫理規定を定め、さらに倫理規定を具体的な実践の場で展開する覚悟を国民に提示すべく“2000 年仙台宣言”³⁾を発表している。また土木学会内に設置した技術推進機構において、表 - 1 に示すような土木学会認定技術者資格制度⁴⁾を立ち上げ、2001 年から資格試験をスタートさせた。土木学会の認定する技術者資格の特徴は以下の通りである。

- (1) 特別上級技術者、上級技術者、1 級技術者および 2 級技術者の 4 段階からなる。技術士制度の修習技術士は 2 級技術者に、技術士は 1 級技術者が対応するものと考えている。土木学会技術者資格制度は技術士に比べて 2 段階上位の資格を有していることが最大の特徴である。
- (2) 全ての資格段階について 5 年間で有効期限とし、資格更新は絶え間無く新しい技術に関する継続教育を行なっていることの証として CPD 単位（Continuous Professional Development）を 250 単位取得することを求めている。

表-1 土木学会認定技術者資格の概要

資格名称	資格要件	実務経験年数(暫定)	試験内容
特別上級技術者	土木学会フェロー会員	17年	面接
上級技術者	土木学会会員	12年	筆記、面接
1級技術者	土木学会会員	7年	筆記
2級技術者	土木学会会員	2年	筆記

- (3) 資格試験には技術者倫理に関わる問題が含まれ、専門知識ばかりでなく土木技術者が社会に対して担っている使命についての認識が問われる。特別上級および上級技術者試験で行なわれる面接試験においても技術者倫理に対する個々の認識と姿勢が厳しく評価される。

2001 年に特別上級技術者試験でスタートした土木学会の技術者資格制度は、2003 年に 4 段階の技術者資格試験が全て立上がり、2008 年には下位資格保有者が 1 ランク上の資格試験にチャレンジする最終的な制度が定着する。

このような土木学会の新しい技術者資格制度は、現状では技術士制度のような社会システムとの連動は確立していないが、資格保有者の増加と共にやがては土木技術者を対象とした最上位の資格として位置付けられるものと期待される。同時に土木業界に対する社会一般の評価が良い方向に変わることを願って、学会全体として努力することを決意している。さらに土木学会としては、研究委員会等の協力体制を整備して継続教育機会の提供を図ると共に、技術者倫理教育の方法を確立することにより技術者資格制度の普及に対する支援を行なっている。

また、土木分野における特徴であるが、建設行政の担当者も土木技術者であり、建設行政を担うに足る技術的能力を対象とした資格分野も土木学会の技術者資格制度に含まれていることを特記しておく必要がある。

5. まとめ

以上、我国における科学技術者再生プログラムの必要性和土木分野における技術者資格制度の設立、並びに普及のための学会による支援策について概要を述べた。我国の科学技術者の行為が国民の支持を得るには、工学の全ての分野において技術者資格制度が上手く活用されることが重要であり、そのためには先ず技術者自身の自覚が望まれる。

参考文献

- 1) 技術士審議会：技術士制度改善方策について、2000. 2.
- 2) 廣谷彰彦：建設技術者資格国際的相互承認、土木学会誌, Vol.85, pp.96-97, Dec. 2000.
- 3) 森地茂：なぜいま「2000 年仙台宣言」か、土木学会誌, Vol.85, pp.6-8, Sept. 2000.
- 4) 池田駿介：土木学会技術者資格の創設と継続教育（CPD）の必要性を訴える、土木学会誌, Vol.85, pp.78-80, Aug. 2000.

活路を拓く

虹橋 2005年1月 巻頭言

21世紀を向かえて建設投資額は最盛期の2/3程度に減少し、右肩上がりの拡大しか経験したことのない土木業界にとっては初めての縮小を余儀なくされている。第2次大戦後、我が国の工業は総じて拡大発展を遂げてきたが、個々の分野は苦しい時期を経験し、構成員の努力によってなんとか乗り越えてきている。大学では他分野の栄枯盛衰を客観的に見ることができる。筆者の勤務する大学院研究科は23専攻で構成されている。大学院に院生を供給する学部は現在こそ4つの大学科に統合されているが、少し前までは各専攻に1つの学科が対応していた。業界の活性度は学部の入学試験成績に敏感に現れる。最もドラスチックに変化したのは造船工学科と原子力工学科である。何れもかつては工学部の入学試験において筆頭学科として優秀な学生を集めていたが、前者は昭和40年代の後半から、後者は昭和60年頃から工学部入試の底辺を支える学科に変わった。そのような急激な変化はないが長期間低迷している分野は化学系と材料系である。長期間安定しているのは機械系、電気系、応用物理である。この20年間、常に筆頭学科は建築工学科、あるいは建築を含む地球総合工学科（平成10年から船舶、土木、建築、環境が統合）であった。土木とは言えば、筆者の勤務する大学の入試方式が建築から第2志望を受け入れる特殊性の恩恵で中位以下に落ちたことがない。

苦渋の期間を経験した分野の2つの例を紹介しよう。化学繊維工業は化学分野の代表的産業であるが、紡糸・織布を中心とした昭和30年代をピークに、工場排水の環境汚染問題や発展途上国への産業シフトなどの逆風により、一時期低迷が続いたが、専門の技術を継承しながら他産業とのバリューチェーンを拡大し、今日では安定した経営の産業へと変革を遂げている。他産業とは、自動車産業、情報機器産業、医薬産業、建設産業など幅広い。他産業のひとつである建設産業に対しても、建築の内装材はもとより、土工に関わりの深いシート・マット類、地盤補強材、耐震補強材、緊張材、フィルター、排水材など多品目の市場を展開している。化学分野の若手の研究者に見られる進取の気性は、苦渋の時期を乗り越えてきた化学分野の先輩達の気概を継承しているように思える。

造船分野はかつての大型タンカーや貨物船などの建造ブームが去り、隣国の追い上げを受け始めた昭和40年代の後半から、30年以上にわたり工学部入試の底支えをしてきた。海洋工学への転身を図ったけれど、醗酵工学が応用生物工学に転じて活力を得たような成功は納めていない。それでも造船の教官には我が国の造船工業を支えていると言う気概は高く、若手の研究者を含め、社会人の再教育や一般人を対象とした公開セミナーなどを積極的に続けている姿勢は学ぶところが多い。

ところで、現政権が我が国の進むべき方向として科学技術創造立国を標榜し、4つの重点課題として情報、ナノテクノロジー、バイオ、環境、これらに漏れた重要事項を8つの

キーワードで補完して必要な研究分野を提示した。建設産業に直接関係するのは「都市再生」というひとつのキーワードのみである。大学における研究プロジェクトも上記の重点課題であることが重要視されるから、建設関連の研究プロジェクトは他分野の審査員の共感を得られず、採択される件数は少ない状況にある。

「都市再生」は大学における研究課題としてより実業において、特に東京の中心において大変な活況を呈している。現政権の発足後直ちに都市再生本部を立ち上げ、規制緩和と財務保証などの支援によって東京・名古屋・大阪における再開発事業を支援し、既に汐留シオサイト、品川グランドcommons、六本木ヒルズなどの大規模再開発が実現している。都市再開発には当然、道路やライフライン系の土木工事も含まれているが、一般にそれらが脚光を浴びることは少ない。品川グランドcommonsの場合は、JR新東海道線品川駅の開業と連動した珍しいケースである。

これらの都市再生プロジェクトは、不動産ディベロッパー、金融機関、大手ゼネコンなどを中心とした再開発協同組合の形式を採った民間主導で進められるところに特徴がある。行政主導の建設のみに依存し、自ら建設プロジェクトを企画した経験を持たない土木業界は呼びではない。六本木ヒルズの建設投資額は3,000億円、これに引き続く防衛庁跡地の開発には4,000億円の投資が見込まれている。さらに八重洲口、秋葉原、日本橋へと再開発プロジェクトは目白押しである。現状では、土木業界は大規模再開発に手を拱いて傍観するか、裏方の仕事に甘んずるより他はない。

東京中心部におけるパッチワーク的な拠点再開発方式には、都市交通やライフラインあるいは防災に関係した都市全体の調和的發展に関して懸念がある。また土木技術者としては、これまで培ってきた土木技術を、都市再生プロジェクトの中で有効に活用したいとの思いもある。これまで、このような広域の問題は行政の土木技術者が担ってきたが、民間主導の都市開発事業の源流に行政が絡むと規制が増加するから、民間の土木技術者に再開発事業への積極的な参画を勧めたい。そこでは従来の秩序や価値観が変化するので柔軟な対応が求められる。土木技術者が担うインフラの建設は事務所や住居のように直接的な資産価値を生まないけれど、利便性や安全性の面で再開発施設の付加価値を高める重要な条件であることを主張すべきである。

ところで鋼橋の建設は土木技術の中で屈指の高度な技術であり、都市再生事業の中で橋梁技術を有効活用することができる。数年前、都市再生に貢献できる技術のひとつとして急速施工立体交差橋梁の開発を唱えたところ、現在は橋梁会社の数だけの提案が行われている。都市機能再生に必要なとされる技術は立体交差橋梁だけでなく多様である。提案されている急速施工立体交差橋梁は鋼橋メーカー（上部構造）とゼネコン（基礎）の組み合わせが多いが、右折車両に対応する半地下道路と橋梁を組み合わせたより本格的な立体交差のアイデアは皆無である。

また、地上を活用しながら、広幅員の地下道路を急速施工する技術として、上部荷重を支える長支間ループ支保工（本体利用）は数メートルおきに橋を横に並べた構造で、正に

技術者倫理

地中に架けた橋構造である。地中にあるからゼネコンマターと考える必要はなく橋梁メーカーに挑戦して欲しいプロジェクトである。ボストンの再開発事業「ビッグディック」に見られるような、2.9 kmの高架道路を供用しながら、その直下に地下道路を建設して一気に切り替えるには橋梁技術の活用が不可欠である。

橋梁業界が将来にわたり安定した産業であり続けるには、本業である橋梁建設のための技術を継承発展させながら、若い技術者の柔軟性に期待して、鋼構造分野のバリューチェーンを拡げることが重要であろう。重工会社は橋梁だけでなく、その他の鋼構造を製作する部署を抱えているが、事業部制の限界なのか、事業部間の連携は余り聞こえてこない。ましてや異業種との連携には色々な障害が横たわっているように思えるが、このような制度や体質の打破なくしては業界の発展はあり得ない。

橋梁に係わる経営者、技術者、研究者の方々への願望として、

- ① 市民の賛同する社会資本整備に橋梁建設技術を活用して社会貢献を果たすと言う気概を育むこと、
 - ② 橋梁技術者は、技術開発に対して幅広く関心を持ち、プロジェクト立案能力とマネジメント能力を身に付けるよう努力すること、
 - ③ 人材確保のために夢のある産業であり続けること。人材育成のため若い技術者にチャンスを与えること、
- を挙げておく。

技術者資格と倫理教育

生産と技術（大阪大学）

1. はじめに

最近、マスコミを賑わせた2つの事件にも見られるように、企業倫理あるいは技術者倫理が揺らいでいる。山陽新幹線のトンネルにおけるライニングコンクリートの剥離・落下事故では2つの問題が提起された。ひとつは施工時におけるコンクリートの品質管理・施工管理の不良、いまひとつは事故発生後に実施された検査結果の公表についてマスコミ対応を含む混乱である。もうひとつの事件は、食品会社における衛生管理体制の不備により多数の中毒患者が発生した。幸いにもこれらの事件では人命に関わる影響は無かったものの、技術者倫理の観点から等閑にできない出来事であった。ここで取り上げた事件は、多分、日常的に起こっていることの氷山の一角であり、改めて企業倫理や技術者倫理が問われている。このような状況を打開するための施策が動き出そうとしているので、私見を交えて考察してみたい。

2. 技術者資格の改訂

工学系高等教育機関の卒業者をそれぞれの専門分野における高級技術者として認知する制度として、我が国では科学技術庁の管轄する技術士制度が有る。現在、技術士の資格保有者は約2万人で、その内、土木技術者が半数の1万人である。このように土木分野の技術士数が卓越しているのは、設計コンサルタントと言う職種では技術士資格を所有していることが、設計業務を受注するための基本条件となっているからである。これまでの技術士試験は7年間の実務経験を経て、体力的に厳しい記述試験と面接試験が課せられるが、一旦合格すると資格は生涯有効である。科学技術が日進月歩で発展しているにも拘らず、継続教育や資格更新のチェックのないことが問題視されるようになった。

欧米における同様の技術者資格制度は我が国とはかなり異なっている。米国では、大学卒業時にファンダメンタルエンジニア（FE）の資格を取り、4年間の実務経験を経て、プロフェッショナルエンジニア（PE）の資格を取得して始めて高級技術者として認知される。FE-PE資格試験は州ごとに実施されている。PE資格保有者数は約40万人であらゆる工学分野を網羅している。英国の技術者資格はチャータードエンジニアと称し、約20万人の資格保有者がいる。

ここ数年来、技術者資格の国際標準化が科学技術庁を中心として検討され、平成13年4月より我が国の技術士資格をFE-PEやチャータードエンジニアと同格のものに変更する新制度が導入されることになった。新制度は以下のような特徴を有している。

- （1）資格試験はFE-PEと同様2段階制である。大学等卒業時に第1次試験が実施され、合格者は修習技術士の資格が与えられる。大学エンジニアリング課程修了者のうち

認定された教育課程（JABEE認定）の修了者は1次試験を免除される。

- （2）修習技術士は優れた指導者のもとで4年間の実務経験を経て第2次試験を受け、これに合格すると技術士の資格を得る。
- （3）技術士の資格を取得した後も、定期的に継続教育を受講することを義務付けられる。
- （4）認定された教育課程および継続教育の中に技術者倫理教育が課せられている。

技術士制度に深く拘っている土木学会では理事会の下に、認定された教育課程たる大学教育カリキュラム、継続教育プログラムを検討する委員会を組織して新制度の発足に向けての対応を急いでいる。また、旧制度で取得した技術士と新制度の技術士とは実務経験の年数や試験の難易度に相違がある。旧制度の技術士を救済するために新技術士よりもランクが上の学会認定の専門技術者資格を新たに創設する準備も始めている。

技術者資格制度の改訂は以下に述べる意図を持っていると考えられる。土木界について言えば、公共工事の受発注システムにおける一般競争入札制度の普及に関係して、不適格企業（個人）を排除するための方策として活用される見通しである。このことはこれまで技術士資格が設計業務の受注条件であった設計コンサルタントに止まらず、製作・施工の各業務についても企業は適切な数の技術士を保有することが求められることになる。

土木以外の業界についての技術士制度の普及は未知数であるが、米英の企業に技術者として雇用される場合は、FE-PEあるいはチャータードエンジニアと同等の資格が必要である。今後は技術者資格の国際的相互認証へと展開することが望まれる。

3. 技術者倫理教育

新しい技術士制度は高等教育機関に対して、2項目の貢献を要求している。第1は技術者倫理教育科目を専門科目としてカリキュラムに取り入れること、第2は継続教育に対する指導者としての参画である。

倫理教育は文系の科目である。技術者倫理教育は言わば文系と理系との融合であり、倫理学を専門とする文系教官のみに教育を依存するわけには行かない。倫理学の基本に付け加えて、技術史、技術論、福祉学など多岐にわたる分野を統合する試みが必要となる。さらに技術的失敗事例とその原因分析などを演習科目とすることも考えられる。

土木工学専攻の技術者倫理教育科目のシラバス（案）を以下に掲げる。

- （1）現代社会の論理と倫理（文系非常勤講師）
- （2）近代技術史（理系非常勤講師）
- （3）環境と倫理（本専攻専任教員）
- （4）品質管理論（本専攻専任教員）
- （5）建設事故事例の原因分析（本専攻専任教員、演習とレポートを含む）

とくに、建設事故事例の原因分析について、多くの事故は複数の要因が複合していること、技術的評価に留まらず、社会的背景にまで考察を深めることを要求する。

4. 失敗情報データベースの構築

筆者が専門としている橋梁については、その架設作業時に重大な事故が発生する頻度が高い。人命が失われた事故の場合は、マスコミが取り上げ、事故調査委員会が編成されて原因の調査結果が公表される。広島新交通システム桁落下事故（1991）や本四公団来島海峡大橋の架設桁落下事故（1998）では多くの人命が失われた。筆者も事故調査委員会に加わり、原因の究明にあたり、社会的・技術的要因の分析を行った。しかし人命に関わりがない事故は往々にして隠蔽され、表に出ることはない。日本橋梁建設協会は、過去の悪しき因習を打破して、過去15年間における橋梁架設事故データ600件を会員各社の協力により収集し、重大事故の原因について分析したレポートを作成している。

これと期を一にして、科学技術庁は工学の各分野を対象として失敗情報データベースの作成を企画し、各分野を代表する学協会に協力方の申し入れを行っている。土木学会では調査研究部門担当理事として、筆者が科学技術庁に対応することになっている。このデータベース整備は以下の目的で企画されている。科学技術立国を目指す我が国において JCO 事故、H-II ロケットの打ち上げ失敗など技術の基盤が懸念される事故（技術的失敗例）が多発している。また我が国の産業競争力に翳りが見られ、青少年の学力低下が問題視されている。このような現状を打開し、縦割り・閉鎖体質を打破して技術立国としての復権に取り組む方策のひとつと位置付ける。別の観点から見ると、技術者倫理教育のバックデータとして役立てることもできる。

具体的には、研究開発、技術開発および技術業務に係る失敗事例を以下の事項について解析し、データベースとして取りまとめ、失敗情報を共有化する。

- ① 失敗事象
- ② 失敗に到る過程
- ③ 失敗の原因
- ④ 失敗事象への対応
- ⑤ 失敗の総括
- ⑥ 知識化

データベースの機能は、技術関連業務の企画、立案、実施の各段階において、技術者が予期せぬ事象に起因する事故等を未然に防ぐために有効となる知見を示すものとする。システムの構成は上記のデータベースと、利用者の推論の過程、知識の引き出し方に合わせたシソーラス、連想関連図、意味検索ソフトにより構成されるナビゲーションシステムとなる予定である。

ただし、工学の各分野でデータ構造を統一することは困難を伴う。機械とか化学分野のように大量生産で製品が造られる場合と、建設分野のように一品生産を主とする社会基盤施設では技術評価の項目についても大きな相違がある。そこでデータベースの作成に当たっては、とりあえず機械分野、材料分野、化学プラント分野および建設分野の4つのサブドメインでスタートし、最終的に全体を統合する計画である。

5. おわりに

最近、筆者の周辺で動きの有る施策を中心に、技術者倫理を再構築することの重要性を述べた。少子化と超高齢化社会の到来が真近に迫っている今、21世紀においても活力の有る技術力と経済力を維持するためには、一人ひとりの能力を向上させるとともに、国際的に通用する技術者の育成が求められている。

大規模土木構造物の建設と倫理

日本機械学会誌 2002年4月 技術者倫理特集

1. 土木構造物（大規模工事）の特徴

土木構造物には様々な規模の工事が含まれるが、ここではダム、高速道路、渡海架橋などの大規模構造物を対象として、幾つかの観点から倫理との関わりを述べる。

土木構造物に関しては以下の2つの特徴が挙げられる。

- ①ほとんど全ての土木構造物は公共施設である。民間土木と称されている電力や鉄道における土木施設も公共施設的色彩が強い。公共施設の建設は、広い意味での国民の福祉の増進と安全で安心な社会の形成のために遂行される。
- ②土木構造物はその計画から完成まで長期間にわたる。例えば、1999年に完成した明石海峡大橋では調査計画の開始時点を業務の中心が神戸市から建設省（すぐに本州四国連絡橋公団）に移行した1967年としても、実に33年に及ぶ。

このような特徴から、大規模土木構造物における倫理問題は、まず行政を中心とした公共工事遂行システムの在り方、施策に対しての様々な評価への行政サイドの対応などについて論じられなければならない。さらに、自然災害や環境問題への土木技術者の対応の在り方についても触れなければならない。

2. 建設行政と倫理

明治以来、官主導型の建設が続けられている。短期間に近代化を推し進め、先進国に追いつくためには、中央集権のもとに官主導型の建設を進めることは極めて効率的であり最善の方法であった。なかでも、1960年代から1980年代にかけての四半世紀は、経済成長の観点から見ると我国が最も輝いた時代であった。しかし、この高度成長期を通じて開発に伴う環境問題等の負の影響が顕在化するようになるばかりでなく、建設投資の地域的不平等さが指摘されたり、投資効果の不透明さが目立つようになってきている。建設投資を行うことで産業の活性化を誘発できる大都市近郊は、土地価格や公害の面から投資対象としてハードルが高い。その種のハードルが低い地方への建設投資の比率が大きくなっていないだろうか。

投資効率が低い建設プロジェクトに対して予算を注ぎ込むことは、建設業界に対する国民の批判的となっているばかりか、我国の経済力を支えるために必要な社会基盤整備の遅れが目立つようになった。最近、都市機能の再生に関する資本注入の要求が声高に言われるようになってきたのはその辺りの事情にある。

このように社会情勢が急速に変化しているにも拘らず、20年・30年前の需要予測に基づ

いた大型工事に邁進することは避けねばならない。個々のプロジェクトのプライオリティは年々更新されるべきであり、その評価には行政サイドだけでなく学識経験者等が参画して合議することが重要である。これを実現するシステムを発足させ育成することが行政の責務であろう。

1990年代に入り建設工事のコスト縮減施策が実行されるようになり、このことが発端となって建設行政の見直しが建設省（現国土交通省）を中心として推進された。一つは建設工事の受発注システムの改善で、一般競争入札制度の導入であり、その円滑な普及のために品質確保を目的とした企業の業務体制の評価（ISO9000s）、技術者個々の資格評価が国土交通省の直轄工事については日常的に行われるようになってきている。残念ながら公共工事の大部分を占める地方公共団体が実施する建設工事にまで反映されるには時間が掛かるように思われる。

地方分権の名の元に、公共施設の建設も含めて各種の施策の遂行責任を中央官庁から地方行政に転嫁する傾向が現われているが、責任転嫁と共に受発注システムの改革を含めた行政能力の育成と適切な予算措置を行うことが重要である。

建設行政における倫理は、旧態然とした行政システムに甘んじることなく、市民の福祉の増進と経済力の維持のバランスを柔軟に選択できる行政システムの導入を着実に推進することにある。

3. 自然災害と倫理

土木構造物の建設の目的が、経済活動の基盤となる交通運輸施設やエネルギー施設を構築することであると共に、自然災害から市民やこれらのインフラ施設を守る防災施設の構築に有ることは冒頭で述べた通りである。そこでは台風・地震・雪害などに対してどの程度の安全水準を構造物に持たせるかが問題となる。

地震に対する社会基盤施設の安全性について言えば、我国で設計に用いられる地震力の大きさは世界中で最も厳しいものであった。兵庫県南部地震の後、土木構造物の耐震設計に用いられる地震力は更に厳しいものとなった。それでも過去において観測された最大級の地震に対する安全性を保証するものではない。想定される最大級の地震とは、ある地域において500年ないしは2000年のサイクルで発生するような巨大地震を言う。構造物の耐用期間が100年程度であることを考えると、500年サイクルで発生する可能性がある超巨大地震に対しても安全であるように構造物の設計規準を定めることは、建設費の著しい増加を招き国民の負担を強いる結果となる。このような耐震規準の意義を市民に正しく理解されるように教育が必要である。

併せて、各種の自然災害に対するハザードマップや、救急拠点等を明示した災害時の避難経路図の作成等ソフト面の充実を必要とする。

兵庫県南部地震の後、橋脚の耐震補強工事が全国規模で実施された。その多くは鋼板な

いしは炭素繊維シートの巻き立てによる強度と靱性を増強するもので、施工が容易な単柱形式橋脚や単純なラーメン形式橋脚が対象であり、形状が複雑なラーメン形式や長支間橋の耐震補強は手付かずの状況にある。行政の補助事業施策には 5 年程度の時限が設けられるから、施工が容易なものを優先的に補強することとなった可能性がある。10 年あるいは 20 年経って有効で割安な制震・免震技術の完成を待って、耐震性能の改善を図る施策も並行して行われるべきであろう。

4. 環境と倫理

環境問題は、産業の工業化と社会の都市化が急速に拡大する中で生じた負の遺産である。昭和 30 年代から、一部の化学工業や金属工業の廃水に含まれる有害物質による河川、湖沼、内湾など閉鎖性水域の環境汚染が問題となった。環境問題への関心が高まり、研究対象が広がるとともに、土壌および地下水の汚染も重要な課題として浮上した。

さらに、フロンガスによるオゾン層の破壊や二酸化炭素ガスによる温室効果による温暖化など地球規模の環境問題が人類の、いや地球上の生物全体にとって死活問題としてクローズアップしてきている。

土木施設が関係している公害問題の重要なものの一つに交通関係公害が有る。走行車両からの排気ガス、車両自体および構造物から発生する騒音、車両による構造物の振動が地盤を通じて周辺の家屋に伝わる問題などが、道路や鉄道周辺の居住環境を乱すものとして非難されている。今のところ、交通環境問題の発生源として非難の対象にあるのは道路管理者である国土交通省や高速道路関連公団であるが、本質的な発生源である車両側（車両の所有者と生産者）の責任分担が曖昧のように思われる。自動車業界は無公害水素ガスエンジンあるいは低公害ハイブリッドカーの開発を急がなければならなし、自動車保有者は効率的な使用を心掛けなければならない。

大型土木工事そのものが公害の発生源でなくても、今日問われている環境問題に関わる影響に充分配慮した建設計画・施工方法・使用材料の選択が望まれる。例えば、河川に建設されたダムによって土砂が貯留され、河口からの土砂流出量が減少すると、付近の海岸線において潮汐によって洗い流される土砂量との収支バランスが崩れることにより、海岸侵食が進行する。自然界の循環を人為的に絶つことが、取り返しのつかない環境破壊を引き起こすことは今日では充分科学的に説明できる。大型土木工事の計画にあたっては、想定される各種の影響を公正に評価することが大切で、工事を進めるためのアセスメントであってはならない。

5. 技術的失敗と倫理

構造物の機能を低下させたり安全性が懸念されるような予期せぬ破壊・破損が生じた場

合、それが建設中であれば“施工責任”として施工業者が責任を負うが、一旦施工検査に合格して供用を開始した後であれば、ほとんどの場合、“管理責任”として管理者たる行政が責任を負うことになっているのが我国の実状である。

建設業における事故は圧倒的に工事中に発生している。事故の直接原因は当事者の不注意であったり、施工担当者の安全管理に対する違反行為など施工側の責任である場合が多い。しかし、中には施主側からの要請による施工期間短縮のための異業種並行施工や安全対策の手抜きが事故に繋がる間接原因となったり被害を大きくする原因となる場合もある。そのような場合でも“施工責任”の名の元に責任は施工業者にのみ課せられる。一般市民が被害者として事故に巻き込まれた場合、遺族が心情的に行政の責任を追及することになるのもやむを得ない。

一方、供用開始後に構造物の設計・施工における技術的失敗が明らかになるのは、自然災害時であるとか、劣化が進行したコンクリートの剥落などでは、施工時から事故発生までに一定の時間が経過している場合が多いため、破損の原因が施工不良であることを特定することが困難な場合が多い。しかし、注意深い検討と洞察により、破損の原因が施工不良であることが判明した場合は、施工者に対して製造者責任を公正に問われなければならない。

行政にあつては、管理責任が科せられるがために、合理化を推進するための新技術・新工法の導入に躊躇することの無いように積極的な対応が望まれる。

6. まとめ

土木学会は、1999 年、“土木技術者の信条および実践要綱”（1938 年）を改訂して、“土木技術者の倫理規定”¹⁾を定め、さらに倫理規定を具体的な実践の場で展開する覚悟を国民に提示するべく“2000 年仙台宣言”²⁾を発表している。また 4 段階からなる土木学会技術者資格制度を立ち上げ、2001 年から資格試験をスタートさせた。この試験では受験者に対して技術者倫理についての認識を厳しく問うことになっている。

公共工事に携わる土木技術者は、豊で安全な社会建設に対する国民の期待に応えるとともに、地球規模の環境問題に配慮しつつ、施主たる行政と施工業者の双方の立場に応じた責任意識を持って、業務に対応することが望まれる。

参考文献

- 1) 土木学会：土木技術者の倫理規定，1999. 5. 7 理事会制定，土木学会誌，Vol. 84, 8 月号，1999.
- 2) 土木学会：2000 年仙台宣言，土木学会誌，Vol. 85, 9 月号，2000.

構造設計と技術者倫理

土木学会構造工学委員会 有限要素法講習会 2004年1月

1. まえがき

最近、構造設計を本務とする設計コンサルタントや橋梁メーカーの指導的立場の方々から、若い技術者の力学能力の低下を危惧する声をよく耳にする。大学で約40年間にわたり構造力学の教育研究に携わってきた者として、看過できない意見であり、構造力学教育の現状と設計実務で必要となる能力の関連を分析することにより、構造力学教育や構造設計システムの有り方について提言できればと考えている。技術者倫理の観点から言えば、技術者は構造物を適切に設計できたと自ら確信し、施主および納税者に対して責任を果たすことが肝要であり、そのような能力を有する人材の育成は学会および教育者の責任でもある。

2. 構造設計の現状と問題点

(1) 構造設計の実態

構造設計のための構造解析の大半がコンピュータに依存するようになって久しい。しかも標準的な構造形式であれば自動設計プログラムによって、設計図書、設計図と部材数量表まで作成される。また新しい形式や長大橋梁を対象とした構造解析は計算会社に委ねることが多くなっており、構造の設計技術者が主体的に担う業務は発注者と工場・架設現場および地元の間に生ずる諸問題の調整など管理的内容の割合が増してきている。

このような状況下で、コンサルタントや橋梁メーカーの設計技術者が構造解析に関わる業務から遠ざかる傾向が見られる。構造解析の内容を理解せずに設計業務を行う技術者は、俗に、ブラックボックス・エンジニアと呼ばれる。それでも、成果品としての計画、詳細、製作の各段階における設計書の内容については設計技術者が責任を負っており、適正で誤りのない設計が行われていることの保証が重要である。

さらに、建設コスト縮減に対応するために新しい構造形式、構造材料、施工法の導入が必要とされているが、合理化・省力化工法の採用に際しては、コストばかりでなく、維持管理や環境問題も含めた幅広い知識と評価技術力が要求される。

(2) 我が国の設計照査の概要

成果品の保証の取り方としては竣工検査があるが、設計に関しては唯一“照査”であり、業務を受注した会社における社内照査、施主側の技術担当者による照査のほか、専門能力に長けた第3者による照査を組み合わせた照査システムによるのが望ましい。我が国の現

状では第3者による照査制度はほとんど活用されていない。

公共構造物の設計は計画設計と実施設計に大別される。発注者によっては2つの設計業務の内容が異なるが、前者は形式選定の資料を作成するための予備（概略）設計と構造物の形式を絞り込んだ後、施工計画も含めた課題を抽出する詳細設計とが含まれ、設計コンサルタントが担当することになっている。後者は製作・架設を受注した製作会社の設計技術者が担当し、構造詳細を含めた実施段階の設計と製作設計を行う。

設計照査の重点は上述の設計の種類によって異なるが、計画設計における照査は以下のように行われる。国土交通省設計照査マニュアル〔1〕に準拠して計画設計の各段階における照査は

- ① 設計に必要な前提条件が整備されているか、また必要な関係諸機関との協議が完了しているかについて照査する。
- ② 発注者側調査職員より指示された基本条件、特記仕様書等に基づいて概略検討した1次案について照査する。
- ③ 基礎構造も含めた主要断面を設定し、各種比較項目を総合的に判断して選定された2次案について照査を行う。
- ④ 設計作業終了後、設計条件と設計計算結果および設計計算書と図面、数量計算、施工計画との整合性をチェックリストの対応項目に従い照査する。

このような発注者と設計コンサルタントの間に設定されている照査システムとは別に、設計コンサルタントの社内照査システムが適切に機能していることがISO9000sの認証を受ける際の必要条件となっている。

(3) 構造力学教育の現状

一方、専門高等教育（大学・高専）における構造力学関連教育は1970年頃を境として変貌を遂げてきた。主な変化は以下の通りである。

- ① 土木工学のカリキュラムが多様化したため、構造力学関係の講義科目数が相対的に縮小した。
- ② コンピュータの利用を前提としたマトリックス変位法や有限要素法が実務の構造解析で汎く用いられるようになり、構造力学教育の中にコンピュータ利用を前提とした解析法が導入され、それとともに力学的能力を育むために有効であった古典的構造力学が軽視・圧縮されるようになった。
- ③ 初等構造力学を除く大半の構造力学関係科目が選択科目となり、単位取得のために相応の勉学を必要とするこれらの科目が学生から敬遠されるようになった。

以上の理由により大学卒業生の構造力学能力、とりわけ数多くの問題を手計算で解析することによって培われる力学的直観力が平均的に低下してきているのは冒頭の指導者による指摘の通りである。土木系学科の卒業生が、コンサルタントや橋梁会社あるいは建設会社の設計部門に就職して、構造物の設計業務を担当するには、構造解析技術とともに照査

技術として要求される力学的能力を養成するためのトレーニングが必要である。

3. 倫理的観点からの分析

(1) 構造物の安全性

構造物は耐荷安全性、使用性、耐久性に関する要求性能を満たすように設計されるが、併せて経済性や合理性について厳しい評価に晒される。経済性を追求するあまり、安全性を損なうようなことがあってはならない。また既存の構造物とは著しく異なった条件の下で設計される構造物について、設計者は構造特性の変化に敏感でなければならない。

構造物の安全性が損なわれる原因は、設計に携わる技術者個人、組織および社会システムに内在している。例えば側道2主桁橋の架設時落橋事故（大雲橋、1977）では社会システム（設計照査システム）の有り方が問われた。1970年代、我が国の社会基盤整備に少し余裕が生じてきたことに併せて、幅員の狭い国道における歩行者・軽車両の交通安全対策として道路拡幅による側道の併設が行われた。橋梁部では河川管理の制約から橋脚設置位置は現橋と合わせる事が求められ、側道橋は支間長と幅員の比が大きい平面形状がスレンダーな形式となった。

京都府の由良川を渡る大雲橋の最長支間部では支間長／主桁間隔比が3.6と異常に大きく、床版コンクリート打設時に横ねじれ座屈現象が発生する危険性を孕んでいた〔2〕。発注者、設計会社および製作会社の技術者の誰もがこの危険性に気付かなかった。当時の道路橋示方書にはこの種の橋梁に関する記述はなく、また研究分野においても、この新しいスレンダーな側道橋に対する関心が薄かったことがこの事故の周辺条件として挙げられる。

事故は、最長支間部の床版用コンクリートを既設橋梁上に止めたコンクリートミキサー車から移送し、支間長の90%以上打設したときに発生した。事故の様子は側方変形を伴いながらねじれ、橋梁全体が河川に落下したと現場作業員から報告されている。この事故により側道橋上でコンクリートの均し作業をしていた現場作業員2名が死亡した。裁判の1審では発注者側および設計者側の責任者が共に有罪の判決を受けたが、控訴審では、事故当時にこの種の橋梁の横ねじれ座屈現象を予測する理論や設計式が明らかにされていないという理由で、全員無罪となった。

このように新しく出現した構造に内在する力学的課題に対して、上述の設計照査システムが機能することは稀で、まして行政が素早く対応し示方書に関連条項を追加するのは時間的にも困難である。そこで専門家集団で構成された第三者機関を活用して、実効性のある設計照査システムを構築する必要があるのではないかと考える。設計技術者個人や組織の設計上の過誤が適切に指摘されるような設計照査システムでなければならない。

(2) アカウンタビリティとトレーサビリティ

設計技術者は、構造設計においてどのような根拠に基づいて形式選定や安全性の照査を

行ったのかを、設計図書に明確に記述しなければならない。そのような行為を習慣付けることによって、設計者個人および組織が適正に設計業務を遂行することに対する確信に繋がるし、発注者と設計者間相互の信頼性の確保が可能となる。

同時に、構造設計業務における意志決定が何時、何処で、誰によって行われたのかを明確にすることが求められる。必要に応じて意志決定のプロセスが追跡できることをトレーサビリティと称されている。欧米流のプロジェクトマネジメントシステムの中で、トレーサビリティを確保するための情報管理を専業とする職種（一種のコンサルタント）の参画が認められている。

アカウンタビリティとトレーサビリティは公共事業の倫理性を確保するための基本的条件であると考えられ、このような機能を有する公共工事の推進システムの構築が納税者に対する説明責任を果たすために求められている。土木技術者に求められるアカウンタビリティについては参考文献〔3〕を参照されたい。

4. 構造解析の失敗例

関西道路研究会道路橋調査研究委員会に設計照査小委員会を設置し、橋梁メーカーや設計コンサルタントの若手技術者の方々と、技術者の設計照査能力を向上させるための構造力学の整理と設計照査システムに関する調査を行った〔4〕。その中で、主として構造解析を中心として設計上の失敗例を収集し要因分析を行った。構造解析上（静的弾性解析）の失敗の要因および代表的事例を以下に紹介する。

(1) 初等構造力学の適用限界

初等構造力学の成立仮定を越えた構造に対して、不用意に初等構造力学を適用したことにより、変位や応力を過小評価する例がある。例えば、曲げに伴うせん断変形の影響については一部の構造力学教科書で触れられているが、せん断変形特性については十分説明されていないため、誤ったせん断変形の取り扱いが構造解析モデルの中で散見される。

【事例1】並列桁橋の荷重分配横トラスの等価剛性

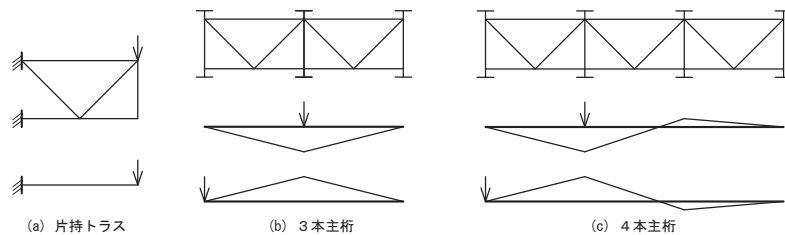
並列桁橋の荷重分配計算のため横トラスの斜材の弾性変形を考慮した等価曲げ剛性の算定式は図-1(a)に示すような片持ちトラスの先端たわみと等しい片持ばりの曲げ剛性として誘導される。このような等価剛性は3本主桁構造や4本以上の主桁構造の外側横トラスに適用できるが、4本以上の多主桁構造については内側横トラスの等価剛性としては不適切である。その理由は内側横トラスの曲げモーメント分布が片持トラスの場合と異なるため、せん断変形の効果が異なることである。

【事例2】トラス桁の固有曲げ振動に対するせん断変形の効果

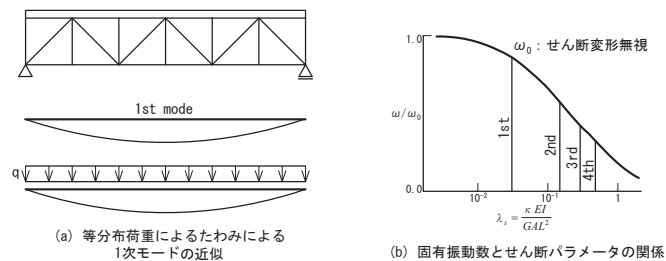
低周波騒音が疑われた高速道路上路トラス橋の動的解析のためにモーダルアナリシスが適用されたが、床版を含むトラスの固有振動解析にトラス桁の斜材の弾性変形を考慮した

等価曲げ剛性を有する梁モデルが用いられた。等価曲げ剛性は1次モードに近い等分布荷重を満載した単純トラスの支間中点のたわみが等しくなるはりの曲げ剛性が用いられた。

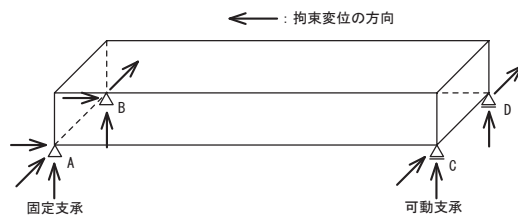
斜材の弾性変形を考慮した等価曲げ剛性の評価法は1次モードに対してのみ適用できるが、高次モードに対する等価剛性としては不適切である。せん断変形の影響は高次モードに対してより重要であり、等価剛性の方法で取り扱うことはできない。せん断変形を考慮した梁モデルとしてモデル化する必要がある。



図ー1 荷重分配横トラスの換算曲げ剛性



図ー2 置換ばりのせん断変形を含む固有振動数



図ー3 立体解析における固定支承の境界条件

(2) 境界条件の誤り

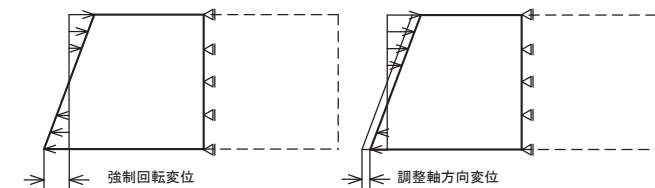
構造のモデル化に際して境界条件が適切に与えられていない例として以下の2つの事例を紹介する。

【事例3】立体変形に対する固定支承の扱い

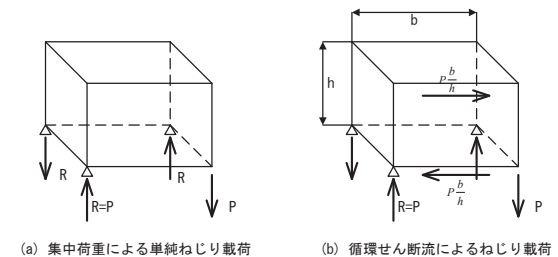
単純支持構造物の立体解析（水平荷重やねじり荷重による変位や断面力の計算）において、境界条件を単純支持構造物ということで水平横方向に対しても両端単純支持と誤った例がある。図ー3の固定支承AおよびBでは桁軸方向変位が拘束されており、鉛直軸回りの曲げによる桁軸方向変位と断面のそり変位の和が0となる。すなわち、面外変位に対しては固定支承側は半固定の状態にある。支点反力、断面力、変位は両端単純支持の場合とは異なる。マトリクス変位法や有限要素法では誤ることは少ないが、桁断面を1つのはりに置換するモデルにおいて誤る可能性が高い。

【事例4】鋼板の面内曲げ強度解析

鋼板の面内曲げ強度のFEM解析において、図ー4(a)のように載荷辺に強制回転変位のみを与えると板のたわみによって軸方向引張力が生じて、極限強度を高めめに評価する誤りを犯す。強制回転変位と共に、図ー4(b)の調整軸方向変位を与えて、軸方向力が発生しないように制御する必要がある。また面内曲げ・圧縮解析を行う場合には強制回転変位と同時に強制軸方向変位を



図ー4 鋼板の面内曲げ耐力解析における変位の制御



図ー5 トラス桁のねじり剛性の評価方法

与えて、所定の曲げ・圧縮比が保たれるように制御することになる。

面内回転の変位自由度を有する要素を用いると面内曲げ強度解析を強制回転変位のみで行うことが可能であるが、その方法では曲げ・圧縮解析は不可能であり、一般性のないモデル化と言える。

（３）ねじり問題の理解不足

【事例５】閉断面桁状構造物のねじり剛性の評価

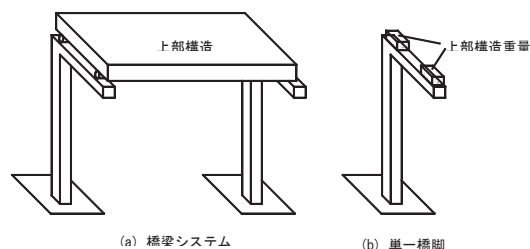
閉断面桁状構造物のねじり剛性を解析や実験によって同定するために、図－５（a）に示すように３隅を単純支持し残りの１隅に鉛直集中荷重を作用させ、荷重作用点の荷重方向変位 δ を求める。構造物のねじり剛性 GJ を $GJ = Pb^2L / \delta$ で評価する方法がある。

構造物の両端断面に剛なダイヤフラムが設けられている場合は良いが、そうでない場合は端部付近の断面変形の影響が含まれないように図－５（b）に示すように循環せん断流に対応した荷重を考慮する必要がある。

【事例６】逆L形橋脚の耐震解析モデル

さるコンサルタントは、逆L形橋脚の橋軸方向地震入力による耐震検討を引き受けた。担当技術者は、解析モデルとして単純化のため単一橋脚を考え、上部構造の重量を支承位置に均等配置したが、橋脚の柱部材に作用するねじりモーメントによるせん断応力が発生応力のかなりの割合となるため、直応力のみを考慮した市販の動解ソフトの適用を断念したと言う。相談を受けた筆者は、この問題では適正な解析モデルと動解ソフトの選択が重要であり、設計会社としての技術力を向上するように進言した。

逆L形橋脚を含む橋梁システムの橋軸方向地震入力に対する耐震検討を単一橋脚モデルで行うのは不適切である。



図－６ 逆L型橋脚の耐震解析モデル

橋脚のねじれ変形は上部構造と隣接橋脚によって弾性拘束されており、単一橋脚の場合に見られるような橋軸方向慣性力による大きなねじりモーメントの発生は防止されている。

それでも橋脚の柱部材にはねじりモーメントが発生するから、立体板構造としてFEMモデルを作成するなら汎用ソフトで解析できるが、骨組要素を用いてねじりを含む３次元非線形動解に対応できるソフトは一部の大学研究室が所有しているだけである。

５．構造力学教育と設計照査の有り方

（１）照査技術能力を育むための力学教育

構造解析結果を照査する技術の基本は骨組の力学にある。土木技術者であれば誰もが初期に学習する初等構造力学の知識を駆使して、構造物の変位や断面力の概略値を算定する方法を模索するであろう。

これに加えて、初等構造力学で無視しているせん断変形の影響などを考慮した骨組理論や薄肉構造理論も初等構造力学の延長線上で理解することが必要である。さらに骨組理論では把握できない応力集中現象〔５〕や薄板構造の格点部における板曲げ応力については多くの事例を収集したデータベースを所有すること、また格点や継手における応力伝達を理解させることが必要である。

勿論、実務設計で用いられる有限要素法などの離散的構造解析手法の高度化に対応できるように、局部応力解析のための高次要素、動的解析手法、構造安定解析手法などを理解すると共に、設計照査に対する技術力を高めるために、離散化解析法と初等構造力学の知識ベースとしての融合が重要である。

（２）継続教育への期待

現状の大学における土木工学教育カリキュラムの中に上述の設計照査用の構造力学科目を加えることは時間的制約から容易ではない。そこで構造設計に関係する高度構造解析技術、構造設計論、設計照査用構造力学などは、社会人を対象とした継続教育の中で系統的に提供する方策を、企業・教育機関および学協会の連携によって確立する必要がある。

最近、幾つかの大学が都市中心部のサテライトキャンパスを利用して社会人向けの夜間研修コースの開設を計画している。また学協会は学識経験者の支援を受けて、継続教育システムを立ち上げているが、その中に上述の構造解析、構造設計に関する講習会を組み込むことが望まれる。

（３）照査技術とシステム

前述のごとく、現行の設計業務においても設計照査は重要視されている。我が国では、設計業務の受注会社における内部（社内）照査と発注側の担当者と受注者間における外部照査の２段階が行われている。内部照査は設計全般についてチェックされるが、外部照査

工 学 倫 理 講 義 (平成 15～16 年度)

では行政的課題の点検が中心であり、技術的課題に対する照査は担当者の力量に左右される。過去に発生した橋梁建設中の事故例や不具合は２段階の照査をすり抜けて、問題点を孕んだまま建設工事が進められた場合である。

このようなケースを回避するには第３者による照査システムを制度化するのが望ましい。第３者とは照査技術に長けたスペシャリストの個人ないしは集団であり、例えば土木学会認定上級技術者または特別上級技術者（鋼・コンクリート分野、設計分野）が所属組織を離れて公正中立な立場で担当する制度が考えられる。

6. あとがき

有限要素法の講習会で技術者倫理を語れと依頼されたとき、一瞬戸惑いを覚えたのは、有限要素法という無機質な手段と人間の行動規範である倫理との関連の薄さであろう。しかし、有限要素法を用いて構造設計などを行う際や設計システムの中で人間性が深く関わっていることに想いを馳せるとき、そのような行為に技術者倫理が問われる局面が多々あることに気付いた。そこで表題のように“構造設計と技術者倫理”について、構造力学の教育者として筆者の日頃の考えを述べた。

また土木教育委員会倫理教育小委員会の一委員として、教本「土木技術者の倫理」の編纂にも参画したが、筆者の本業である構造力学を実務設計に役立たせる上での倫理的対応には生涯関って行かなければならないと思っている。

参考文献

- 〔１〕 建設省：設計照査マニュアル，１９９５．
- 〔２〕 小松定夫・西村宣男・中田憲正：横構・対傾構で連結された２主桁橋の全体横ねじれ座屈荷重の簡易算定式，土木学会論文報告集，No. ３４１，１９８４．
- 〔３〕 土木教育委員会倫理教育小委員会：土木技術者の倫理，土木学会，２００３．
- 〔４〕 関西道路研究会道路橋調査研究委員会：設計照査小委員会報告書，照査のための構造力学，１９９８．
- 〔５〕 西田正孝：応力集中（増補版），森北出版，１９９３．

工学倫理講義（その1）

一般論

1. 講義の形態（標準）

課題の説明（教官）	30 分
倫理的解釈に関するディスカッション（受講者）	30 分
解説と助言（教官）	10 分
レポート作成（受講者）	20 分

この科目の可否はレポートによる。期末試験は行わない。

2. 応用倫理学の紹介

（加藤尚武：応用倫理学入門）

一、ガイドラインの作り方

- ・ガイドラインの実例
- ・異論，異説を枚挙する
- ・見せかけの論証を批判する。
- ・禁止の理由は他者危害
- ・自己危害の規制
- ・社会的合意は必要条件であって充分条件ではない。

二、生命倫理学

- ・古典的自由主義の限界
- ・エボバの証人の輸血拒否
- ・信仰上の輸血拒否の成立条件
- ・性転換手術の倫理
- ・不妊手術の類型
- ・細胞工学の安全性

三、環境倫理学

- ・人口の定常・変化・定常
- ・食糧危機
- ・温暖化の帰着
- ・環境倫理学の3原則
- ・高レベル核廃棄物
- ・生物保護の理由
- ・超微量廃棄物
- ・環境会計

- ・放任型自然主義と理性型管理主義
- ・耐用年数と文化

四、企業倫理学

- ・株主アプローチ
- ・利害関係者
- ・雇用問題
- ・セクハラ
- ・土壌汚染と企業の責任
- ・内部告発

五、情報倫理学

- ・情報とは
- ・情報の価値
- ・情報社会の倫理的危機
- ・情報犯罪の分類
- ・情報の所有権
- ・通信傍受法
- ・情報社会のペナルティー

六、発表文の作成の仕方

3. 工学倫理の定義

第1章 技術者倫理の定義（札幌順金工大教授）

1.1 人類の危機的状況と日本における技術者倫理の現状

- ・人口爆発に対応するために科学技術の重要性が増している。
- ・現状ではオウム真理教によるサリン事件，薬害エイズ，高速増殖炉もんじゅ事故，東海村臨界事故など技術に関する問題が多発
- ・組織への責任や個人的利害が，一般社会に対する責任よりも優先した
- ・社会的条件が変化しているにも拘らず前例踏襲による安易な行為
（技術者倫理の現状）

土木分野 1938 土木技術者の信条および実践要綱，1999 土木技術者の倫理規定

他分野：1996 情報処理学会、電気学会、日本建築学会、日本機械学会等に倫理規定

1.2 技術者倫理とはなにか

行為の科学：人類の利益に資するための行為

技術者倫理とは「研学・経験・実務を通して獲得した数学的・科学的知識を駆使して、人類の利益のために自然の力を経済的に活用する上で必要な行為の善悪，正不正や，その他の関連する価値に対する判断を下すための規範体系の総体，並びに，その体系の継

統的・批判的検討。さらに、この規範体系に基づいて判断を下すことができる能力」

1.3 技術者倫理の特殊性

技術は人間にとって可能な行為を拡大する。新しく可能になった行為について、その善悪を問う必要がある。

例えば、クローン技術等

土木技術で巨大で複雑な構造物をもたらす技術については世代間倫理の問題が生ずる。

1.4 技術者集団の倫理綱領とその機能

第1機能：社会契約説の立場に立ち、プロフェッションとしての行動規範を示すこと。

第2機能：プロフェッションとしての向上目標を示すこと。

第3機能：倫理的判断を下すにあたり意思決定をするためのガイドラインを示すこと。

第4機能：専門技術者教育において人格的資質や倫理的徳目が求められることを明示する。

1.5 技術者はなぜ特別な責任を負うのか

現代社会の特質として、

- 1) 現在の人類は、科学技術文明の中にあり、当面の間、科学技術への依存度を増大させることはあっても、減少することはない。
- 2) 個人生活の多くの面で既に技術やその他の分野のプロフェッションに依存しており、人間の存在に不可欠な基本事項についても他者の専門的能力に依存せざるを得ない。
- 3) 科学技術は急速に自己増殖的に発展を続けているので、その最先端の状況は専門家に頼らざるを得ない。
- 4) 法律や規制などの外的規範の制定は、科学技術の発展に追いつけない。

これらの前提に立つと、高度技術社会において、公衆は各分野のプロフェッショナルの内的規範とその規範に則った行動を行う倫理的判断能力に依存せざるを得ない。

1.6 技術者倫理教育の必要性

科学技術の発展に比べ、それらの技術を「何のために」、「どのように」使うかという価値判断、すなわち技術倫理的考察の蓄積ははなはだ貧弱である。

ABET(The Accreditation Board for Engineering and Technology)では技術者教育のあるべき姿について、「Engineering Criteria 2000」という認定基準を定めた。

- ・工学系教育課程の卒業生が持つべき能力の共通基準
- ・技術のプロフェッショナルとしての責任と倫理的責任の理解
- ・技術者資格の国家間相互承認
- ・JABEE（日本技術者教育認定機構）の大学評価

1.7 技術者倫理教育の目的と方法

技術者倫理教育の目的

- 1) 道徳的想像力を刺激すること、
- 2) 倫理的問題点を認識できるようにすること、
- 3) 倫理に関する分析能力を伸ばすこと、
- 4) 責任感を喚起すること、
- 5) 倫理問題に関する意見の不一致や曖昧さを受け入れられるようにすること。

技術者倫理教育の方法論

- 1) 事実関係を調査・分析するレポート
- 2) 各自の意見を表明する小論文
- 3) グループ討議
- 4) PD

工学倫理講義（その2）

橋梁架設中の事故（その1）広島市新交通システム桁架設中の落下事故

（1）事故の概要

平成3年3月14日、都市計画道路高陽沼田線の道路空間に広島市が建設中の新交通システム上部工事における第6工区その2の鋼製箱桁（2径間連続非合成RC床版箱桁橋）が、架設工事中に、橋脚上より車道上に落下した。

当該工事は、図-1に示すように工区の南側に設置される鋼製箱桁G1は3箇所の橋脚上において横取り工法により所定の位置に移動完了しており、桁G1を支承を介して橋脚上に固定するためジャーナルジャッキ等を用いて降下作業を行っていた。

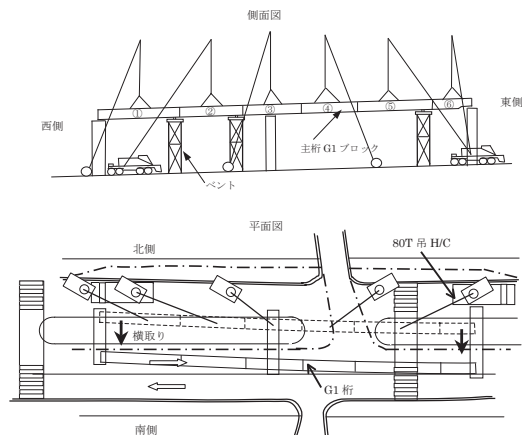


図-1 桁落下現場の見取り図

この事故による死者は14名、負傷者は9名で、そのうち車道上に停止中の自動車内の一般市民9名が死亡、6名が負傷、また作業員5名が死亡、3名が負傷した。

（2）事故の背景

新交通システムはアジア競技大会会場への基幹アプローチとして計画されており、建設期間が短期間であった。このことは異種工事の並行施工を余儀なくされた。

工事の管理者である広島市に鉄道建設の経験者は皆無であり、建設省および大阪市より指導者が出向していた。工事の細部にわたる施工計画において安全対策等に遺漏があった。桁降下という確実な安全対策を必要とする工事においても、高架下道路の通行止めが

実施されておらず、また床版型枠工事の同時施工が行われていた。

全線12.7km中の鋼構造工事の50%および25%はそれぞれ地元の2社に発注され、残りの25%が橋梁建設業協会の多数の会社に分割発注された。事故が発生した現場の工事規模は鋼重135.3tonと小規模であった。

事故が発生した箱桁はA公園駅（島式ホーム）から一般路に向かって橋梁幅が縮小する区間にあたり、桁G1の平面形状が曲線を成し安定性に乏しい構造であった。

（3）事故の直接原因

桁降下作業は、揚程125mmのジャッキ（揚力25ton）複数台をH形鋼（100×100×500）、鋼板、鋼製ライナーと組み合わせて、230～405mmの予定降下量を逐次降下するものである。H形鋼は鋼材屋から購入したもので補剛材は取り付けられておらず、ジャッキの受け台として使用するには不適切なものであった。（図-2）

橋脚上に足場用のパイプが配置されておりジャッキの受け台を井桁に組むスペースがないためH形鋼を並行に3段重ねて使用したり、井桁にしても安定性に乏しい組み方であった。またジャッキの先端で鋼桁ボトムプレートの補剛材部分でなく局部変形を生ずる部分を直接支持した形跡があり、ジャッキを転倒させる横方向力が作用した。

これらの複合効果によりジャッキが倒れ鋼桁は不安定状態となり転倒落下した。

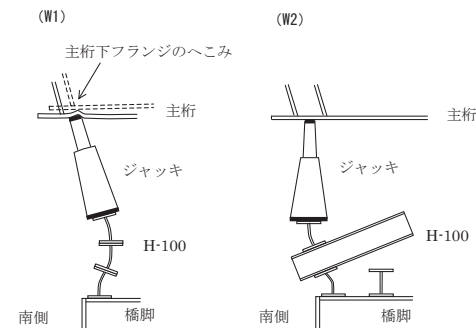


図-2 事故の直接原因となったジャッキ

（4）参考

A公園駅の反対側もほとんど同じ構造であったが、現場責任者の判断で2本の桁を連結して安定性を確保した後、桁降下作業を実施して問題は生じなかった。

（5）解説

事故発生後直ちに編成された事故調査委員会では、事故の直接原因となった技術的問題

に焦点を絞り、実験等の検討を踏まえて

- ・無補剛の H 形鋼をサンドルとして使用したこと.
- ・H 形鋼サンドルを井桁ではなく縦に積み重ねて使用したこと.
- ・箱桁下フランジの補剛材から外れた個所にジャッキであてがったため、下フランジに局部変形が生じ、ジャッキに横力が作用したこと.

を挙げた。一般に建設工事では受注者が安全に工事を遂行すること（責任施工）が求められるので、技術委員会の結論は妥当なものであった。

しかし、この事故では上記の原因以外に事故発生を誘引したりあるいは事故被害を大きくするような多くの間接原因が複合していた。

1) 受注者側の責任で配慮すべきであった項目

- ・現場責任者の技術レベルが低く、安全な工事遂行のための適切な指示が行われなかった.
- ・工事に不慣れな作業員で組織されていた.
- ・足場の取り付け方法が不適切でサンドルを井桁に組むスペースが取れなかった.
- ・景観を重視した橋脚形式の採用により桁降下作業の自由度が制約されていた.
- ・惜しみ装置などの安全対策が講じられていなかった.

2) 発注者側と受注者側との協議により検討すべきであった項目

- ・桁降下作業箇所真下の公道の通行止めを行わずに工事した。前方交差点に信号があり事故時に信号待ちで一般車両が連なって停止していて、そこに乗車していた一般人が犠牲となった.
- ・工事期間が短いため並行作業が行われ、桁降下作業の時に、床版型枠工事が並行して行われており、その作業員が犠牲となった.
- ・施工計画全般の調整不足により並行作業が無作為に行われたり、工事中の交通規制などに齟齬をきたした.

3) 発注時に発注者が配慮すべきであった項目

- ・地元企業優先発注により、一般企業への細切れ発注が行われており、一部企業については、現場スタッフの技術水準低下の原因となった.

(6) 実習課題

上で上げた事故の背景には技術的な原因の他に多くの間接原因あるいは遠因が含まれている。このような事故の発生を回避するためには、発注側担当者の立場として、受注側責任者の立場として配慮すべき要点を互いに議論することにより、技術者倫理に関わる考え方を整理すること。

工学倫理講義（その 2）資料 橋梁事故に見る技術者倫理（その 1）

ドキュメンタリー（広島新交通株式会社建設部長との交流）

平成 3 年 3 月 8 日（金） 新大阪駅にて芦田大蔵氏と出会う

筆者は、土木学会論文編集委員会（土木学会本部）の帰路、新大阪駅にて大阪市交通局の芦田大蔵君（昭和 4 2 年大阪大学構築工学科土木コース卒）に出会う。駅近くの居酒屋にて近況を聞く。半年前から広島市に出向し、新交通システム株式会社の建設部長として、建設全般の指導を行っている。広島市には都市鉄道施設建設の経験者は皆無で、工事全般の進め方について問題があり苦労しているとのことであった。種々の苦労はあろうけれど都市鉄道の先駆者である大阪市を代表して出向しているのだから頑張るように激励して分かれる。

平成 3 年 3 月 1 4 日（木） 事故発生

広島新交通建設現場に於いて桁落下事故が発生、死傷者多数でた模様との新聞情報。

平成 3 年 3 月 1 8 日（月） 調査委員会への参加要請

芦田大蔵氏より広島市の事故対策技術委員会への参加要請があり、これを受諾。委員長は大村裕教授（広島大学）、委員は萩原達朗氏（建設省都市局）、近藤豊太郎氏（阪神高速道路公団）、佐伯彰一氏（建設省土木研究所）、佐々木道夫氏（新日本技研）、佐藤誠助教授（広島大学）、藤原稔氏（建設省土木研究所）、および西村であった。

建設省から広島市に出向し、広島新交通株式会社の社長を務めていた秀松氏は昭和 4 0 年広島大学土木工学科の卒業であるが、同窓に筆者の高校時代の同級生が数名おり、筆者が事故対策技術委員会に参加したことを知り、電話で秀松氏を助けるように依頼があった。

平成 3 年 3 月 2 4 日（日） 第 1 回事事故対策技術委員会

第 1 回事事故対策技術委員会の開催に先立ち、事故現場の視察を行い、現場状況、落下した鋼桁の損傷状況、橋脚上部の接触傷の確認した後、市役所に戻って委員会を開催し、事故発生までの工事の経緯、主桁架設工法の詳細の説明を受け、今後の委員会の進め方について打ち合わせる。

夕刻のテレビで委員会の現場視察状況が映像で流れる。体が大きい委員が目立つ。

平成 3 年 4 月 2 1 日（日） 第 2 回事事故対策技術委員会

事故の証拠品として広島県警に押収されていた物品、損傷したサンドル、ジャッキなどの開示があり、事故発生時の配置と照らし合わせて損傷具合を確認する。その後、事実関

係調査結果の報告、構造解析結果の報告を受け、原因究明のための詳細検討方針を審議する。

報道機関数社からインタビューの申し入れあるも、原因究明作業中であるとの理由で断る。

平成3年5月26日（日） 第3回事故対策技術委員会

前回委員会における詳細検討課題に対する回答説明があり、事故に到るシナリオの概要を明らかにした。確認のための実験計画を審議した。

委員会終了後、広島在住の同窓生と芦田氏を慰労するため小宴を催す。

国土開発技術センターにおける実験とは別に、大阪大学で3段組サンドルの耐荷力実験を自主的に行い、基本的な耐荷力情報を参考資料として委員会に提出することとした。

個人的に報道機関（朝日新聞社）のインタビューを受け、委員会の方向性、委員会の審議以外にもこの事故の背景として多くの問題があることを説明した。

平成3年8月19日（月） 第4回事故対策技術委員会

平成3年10月5日（土） 第5回事故対策技術委員会

構造解析結果、耐荷力実験結果について審議を行い、事故に到るシナリオの精度向上に勤めた。

平成3年11月2日（土） 第6回事故対策技術委員会

構造解析結果、耐荷力実験結果と事故のシナリオの整合性を確認し、事故原因調査報告書の文言について審議した。

平成4年3月 事故原因調査報告書の公表

事故原因調査報告書が公表され、委員会は解散した。当時の平岡広島市長より委員会に対する感謝のための小宴が催された。

平成15年5月 土木技術者の倫理出版

土木学会土木教育委員会倫理教育小委員会の編集により「土木技術者の倫理」が編集され、社会問題となった事故の例として、広島新交通システム桁落下事故を解説した。この本を芦田大蔵氏に寄贈したところ、広島新交通における事故の背景は本の記述の通りであること、事故による犠牲者の慰霊のため、事故現場（慰霊碑が建立されている）に通路姿で詣でたとの連絡を受けた。

工学倫理講義（その3）

橋梁架設中の事故（その2）大雲橋の架設中に生じた落橋事故

（1） 事故の概要

京都府の由良川中流域で同川を渡る個所に架けられていた大雲橋は2車線の道路橋で、橋梁形式は単純支持された鋼並列3主桁橋である。幅員が狭い上、橋長は450mと長いいため歩行者・軽車両専用の側道橋が本橋に併設されることになった。この種の交通安全対策は1970年代後半から幅員の狭い国道を中心として全国的に展開されていた。

大雲橋の橋梁形式は、側道橋として多用されてきた対傾構と下横構で連結された鋼2主桁橋であり、最長スパンは低水敷上の64.25m、有効幅員2.5m、主桁間隔1.7mであった。

1977年、事故は最長スパン橋梁の床版コンクリート打設時に発生した。床版コンクリートは既設橋梁上にコンクリートミキサー車を止め、側道橋上の床版型枠内に連続的に移送する方法で行われ、スパンの90%程度打設したとき、大きな側方変位を生じ、やがて河川内に落下した。床版コンクリートの均し作業のために側道橋上に居た作業員2名が橋と共に落下し、死亡した。

（2） 落橋事故の背景

河川管理者は河川の中の構造物による流れの閉塞を重視している。従って、既設橋梁に平行して新たに建設される橋梁のための橋脚位置は、閉塞率を増やさないため原則として既設橋梁の橋脚位置の真横に限定される。このことは、2車線程度の幅員を有する既設橋梁と同一のスパン長を歩行者・軽車両専用の側道橋にも要求することになる。2主桁橋の架設系ではスパン長と主桁間隔比が安定性の評価にとって重要なパラメータである。

大雲橋以前に架設された同形式の橋梁のスパン長は50m以下であり、床版コンクリート打設時に安定性が問題視された例は皆無であった。大雲橋のスパン長と主桁間隔比は37程度であり、その異常な大きさに発注者・設計技術者は気づくべきであった。

（3） 原因調査技術委員会

発注者である京都府は、事故原因調査のための技術委員会（委員長 岡田清京大教授）を編成して、多方面からの調査を開始した。

事故当時、スレンダーな薄肉部材の横ねじれ座屈理論がBurugermeister¹⁾やVlasov²⁾によって示されていた。これらは、不等フランジI形断面はりの横ねじれ座屈強度の評価に適用されていたが、2主桁橋への適用は考えられていなかった。

調査委員会の検討資料は担当コンサルタントによって作成されたが、2主桁構造の座屈現象を解明するには不十分な内容であった。委員会の審議は事故を起こした橋梁を完成させるための工法に力点が置かれ、鋼桁の架設は従来通りで床版コンクリートの打設工程を

調整するだけで、不安定現象を回避できるとの結論に到達した。すなわち、橋梁の両側支点部分の床版コンクリートを先行打設し、コンクリートの硬化により 2 主桁構造のそり変形が拘束された後、残りのコンクリートを打設する。

事故を起こした橋梁では床版コンクリートが全スパンに亘り一挙に打設されており、事故責任は床版コンクリート施工業者にあると言わんばかりの結論であった。

実際完成した橋梁もこのような方法により床版コンクリートが施工されたが、安心のため主桁（フランジ幅および板厚）のサイズはランクアップされた。現地でみると重車両の走行する既設橋の主桁フランジより歩行者・軽車両のための側道橋のフランジが大きく、異様な感じがする。

調査委員会のメンバーであった小松定夫大阪大学教授の指示により、筆者（西村）は薄肉 3 次元構造の弾塑性有限変位解析ソフトを開発して、2 主桁橋の架設系の不安定現象を詳細に解析すると同時に、2 主桁構造の架設系における弾性横ねじれ座屈を説明するためと設計時に使用できる横ねじれ座屈の簡易算定式を誘導するために 1 次元化理論を発表し、以下のような新しい知見を提示した。3)、4)、5)

- ① 大雲橋の事故は、両側主桁と下横構で構成する溝形開断面構造の弾性横ねじれ座屈に対する強度不足により発生した。
- ② 単一部材の場合とは異なり、橋梁構造では固定側支点における面外変位が半固定になっている境界条件を適正に評価しなければ、正確な座屈強度が与えられない。また横構の弾性変形の考慮も必要となる。
- ③ 実橋梁では鋼桁の断面変化により、剛性、死荷重の大きさ、死荷重の作用位置が橋軸方向に変化する。このことを考慮しないと正確な座屈荷重を求められない。

(4) 裁判の経過

京都府土木部の技術委員会と並行して、京都府警および検察側の鑑定が開始された。検察側の鑑定人としては京都大学工学部機械工学科の教授が採用された。その鑑定では上項の①と同様、両側主桁と下横構で構成する溝形開断面構造の弾性横ねじれ座屈現象であるとされたものの、橋梁構造特有の問題や設計時における座屈強度の推定法については触れられていない。死亡事故は当然のこと刑事事件として取り扱われ、発注者側の京都府の担当者および橋梁会社の設計部長を被告人とする裁判となった。

1982 年に第 1 審の判決が下された。この落橋事故の原因となった横ねじれ座屈現象は鑑定人の証言のように、この橋梁の設計時にすでに予見可能であり、それを見逃したとして二人の被告は有罪という内容であった。この判決に対して、被告人側は直ちに控訴し、第 2 審の審議が始まった。

この間に、筆者の研究成果が土木学会論文集や構造工学論文集に相次いで掲載され、第 2 審の判決に大きな影響を与えた。実際の橋梁構造の特性を考慮して座屈強度を推定する方法は当該橋梁を設計した時点では世の中に明らかにされていなかった。もしその時点で

2 主桁橋の横ねじれ座屈現象を適切に評価する方法が提案されていたなら、筆者の論文は土木学会論文集のような権威のある専門誌に掲載されることはなかったと考えられる。このような状況で 1988 年に下された第 2 審の判決では両被告人は無罪となった。

(5) 工学倫理の観点からのまとめ

橋梁全体の横ねじれ座屈という現象が生じた例は極めて珍しい。おそらくタコマナローズ橋のフラッター現象による落橋に匹敵する。側道橋のような特異な条件の下で、アスペクト比（スパン長・主桁間隔比）が異常に大きな構造が出現する可能性がある。その時点の技術が具体的な不安定現象を正確に予想できるレベルに無くとも、熟練した技術者は危険性を察知できる能力を持たなければならない。

(6) 工学倫理演習課題

大雲橋の落橋事故に関連して京都府の事故調査技術委員会が果たした役割について、工学倫理の観点から論ぜよ。

参考文献

- 1) Burgermeister,G., Steup,H., Kretschmar,H.:Stabilitatstheorie, Akadernic-Verlag, 1966.
- 2) Vlasov,V.Z.(奥村敏恵(ほか訳): 薄肉弾性ばりの理論, 技報堂, 1967.
- 3) Komatsu,S.,Nishimura,N.,Ohno,M.:Effects of local deformation on ultimate strength of ladder like plate girder bridges,Technology Reports of Osaka University,1982.
- 4) 小松定夫, 西村宣男, 中田憲正: 横構・対傾構で連結された 2 主桁橋の全体横倒れ座屈荷重の簡易計算式, 土木学会論文報告集, 1984.
- 5) 小松定夫, 西村宣男, 中田憲正: 側道 2 主桁橋架設系の全体横倒れ極限強度式と補剛設計, 構造工学シンポジウム論文集, 1984.

工学倫理講義（その3）資料
橋梁事故に見る技術者倫理（その2）

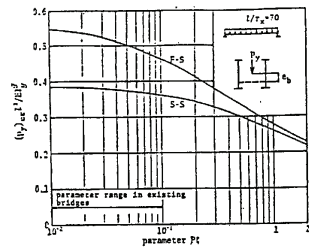


図-12 座屈荷重に対する境界条件の影響

表-1 比較計算例1（境界条件 S-S）

No.	e_b/r_x	P^*	Equal end moment			Uniformly distributed load at centroid			Uniformly distributed load at upper flange		
			Eq. (15) A (mm)	BUCK-PG B (mm)	A/B	Eq. (17) A (mm)	BUCK-PG B (mm)	A/B	Eq. (17) A (mm)	BUCK-PG B (mm)	A/B
1	0.4	0.014	2356	2436	0.971	6.091	6.161	0.989	4.242	4.351	0.975
2	0.7	0.014	1640	1679	0.977	4.182	4.250	0.984	3.172	3.256	0.974
3	1.0	0.014	1245	1277	0.976	3.178	3.233	0.983	2.554	2.619	0.975
4	0.4	0.05	2254	2300	0.971	5.749	5.814	0.989	4.108	4.212	0.975

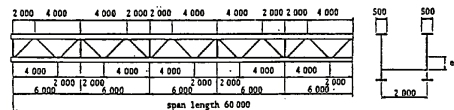


図-5 比較計算モデル1の諸元

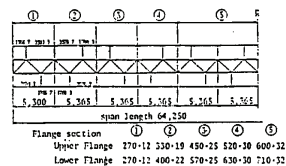


図-6 比較計算モデル2の諸元

表-2 比較計算例2

Method	Support Condition	F-S	S-S
BUCK-PG	Variable Section	3.615 t/m	2.878 t/m
Simplified Formula Eq. (16) or Eq. (19)	Center Section	4.120 t/m (1.140)	3.190 t/m (1.108)
	Arithmetical Mean Section	2.977 t/m (0.824)	2.291 t/m (0.796)
	Mechanical Mean Section	3.546 t/m (0.981)	2.819 t/m (0.979)

Numerical values in (): Simplified formula/BUCK-PG

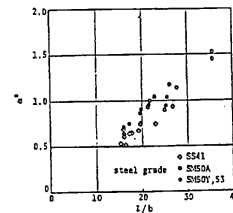


図-13 実橋における α^* と l/b の関係

バーチャル法廷

登場人物 被告人A：地方自治体土木局道路課長
被告人B：橋梁メーカー設計部長
参考人C：床版工事会社社長
鑑定人D：京都大学教授機械工学科（検察側）
鑑定人E：設計コンサルタント社長（弁護側）
検察官F
弁護人G
裁判官H

第1 審法廷

検察官F：大雲橋の落橋原因について鑑定人Dより意見陳述を求める。

鑑定人D：スパン長に比べて桁間隔が小さく、平面プロポーシオンがスレンダーな桁橋の床版コンクリート硬化前の架設系は開断面より特有の横ねじれ座屈現象が発生する可能性があり、Vlasov や Burgermeister などによって提案されている座屈公式を適用することによって、事故の可能性を予見できたと考えられる。

弁護人G：大雲橋の設計当時、道路橋示方書にこの種のスレンダーな橋梁において横ねじれ座屈現象が発生する可能性を示唆する記述はなく、発注者および設計者が予見することは困難であり、両被告人に責任を問うことはできないと考える。

検察官F：道路橋示方書に記述がないからと言って、側道橋という特別な条件の下では一般橋梁には見られないスレンダーな橋梁が出現する可能性があり、専門家はそこに注意して設計施工を行う必要がある。道路橋示方書に記述がないことが免罪とはならない。

弁護人G：本橋の設計当時、側道橋において横ねじれ座屈現象が生ずる可能性を橋梁技術者がどの程度認知していたのかを明らかにする必要がある。鑑定人Eより意見陳述を認めて頂きたい。

鑑定人E：橋梁技術者はスレンダーな側道橋に横ねじれ座屈現象が生ずる可能性を予見できた。床版コンクリートが硬化すれば開断面の高いねじれ剛性が期待できるので、床版コンクリートの打設方法が問題であった。

初期に橋梁の両端付近のコンクリートを打設し、その部分のコンクリートが硬化した後に残りのコンクリートを打設しておれば、今回の事故は回避できたと思われる。

裁判官H：参考人Cの陳述を求める。京都府の担当者から床版コンクリートの打設方法について特記仕様書が出されていたのか。

参考人 C：発注者から特別の指示は無かったので、大雲橋の既設の径間と同様に一端から他端へ連続的にコンクリートを流し込み、均し作業を行っていた。

検察官 F：鑑定人 E の意見は詭弁である。検察は被告人 A および B の両名を有罪として立件する。

裁判官 H：大雲橋の事故は鑑定人 D の陳述にあるように、横ねじれ座屈現象によることが明らかである。橋梁技術者は示方書に記述はなくとも、特殊な条件の下で発生する可能性がある不安定現象を予見し、安全対策を講じなければならない。作業員 2 名の尊い人命が失われたことに対して、発注者側の責任者 A および設計製作者側の責任者 B を有罪とし懲役刑に処する。（執行猶予付き）

弁護人 G：先に述べた通り、設計当時この事故の原因である横ねじれ座屈の危険性がどの程度認識されていたのかが不明であり、控訴することを表明する。

第 2 審法廷

弁護人 G：この裁判の論点は横ねじれ座屈の可能性が予見されたととしても、その安全性を正確に評価する方法が大雲橋の設計当時確立されていたか否かにある。

Vlasov や Burugermeister の座屈公式は一定断面の単一部材に関するものであり、橋梁構造を対象としたものではない。

検察官 F：長大橋梁や新形式橋梁を建設する場合、不測の現象が生じないことを技術委員会による学識経験者の審議や実験による確認を行うのが一般常識ではないか。側道橋というスレンダーな橋梁構造の問題があるのに、大雲橋では何故このような対策が行われなかったのか。

弁護人 G：側道橋の建設は幅員の狭い国道を対象として、歩行者や軽車両の交通安全対策として補助事業として行われているもので、建設費から実験費用を捻出できる大型橋梁の場合とは異なっている。
ここに側道橋の横ねじれ座屈現象に関する新しい論文を参考資料として提出する。

裁判官 H：弁護人の主張する裁判の論点に関わる資料であれば参考資料として認める。

弁護人 G：参考資料として提出した論文は、本裁判の第 1 審の判決後に土木学会論文集に掲載されたもので、大雲橋と同種の側道橋の床版コンクリート打設時を対象とした横ねじれ座屈強度の算定式を示すと共に、橋梁構造における横ねじれ座屈強度に影響を与える各種要因を詳しく述べている。それによると

（１）橋梁構造の境界条件は面外方向には理想的な両端単純支持ではなく、固定支承の条件と可動支承の条件を区別しなければならない。

（２）剛性と荷重強度および荷重の作用高さについて Vlasov や Burugermeister のような一定分布では精度が悪く、実際の分布を考慮できる計算法を使用する必要がある。

検察官 F：確かにこの論文があれば大雲橋の事故は回避できたと考えられるが、そのことと大雲橋の設計に関わった技術者はどのような関係にあるのか。

弁護人 G：このような詳細な情報が大雲橋の設計時には明らかにされていなかったことは、この論文が最も権威のある土木学会論文集に新規論文として掲載されたことから明らかである。大雲橋の設計当時、一般の橋梁技術者に橋梁の横ねじれ座屈に関する高度な技術情報が与えられていなかった。

裁判官 H：大雲橋の落橋事故は、歩行者等の交通安全対策として建設された側道橋に生じた不幸な事件であった。橋梁形式としては一般的な桁橋であるが、支間長が河川管理上の理由により旧橋のそれに拘束され、幅員が狭いことから架設時においてスレンダーで横ねじれ座屈現象を生ずる可能性が明らかにされた。

橋梁建設におけるこの種の不安定現象は国の機関において専門家の助言を活かして事前に情報が整理されるべきであり、弁護人の主張するように当該橋梁の設計者個人を有罪とすることは不適切と認め、1 審の判決を破棄し、両被告人を無罪とする。

工学倫理講義（その４）

橋梁架設中の事故（その３）本州四国連絡橋来島海峡第３大橋架設桁の落下事故

（１） 事故の概要

本州・四国を連絡する３本の高速道路の最後に開通した“しまなみ海道”の南端に位置する来島海峡第３大橋の架設現場において、１９９８年６月、北側側径間の補剛桁架設用支持桁の解体工事中に、作業台車もろとも一部の支持桁が落下し、作業台車で解体作業に従事していた技術者・作業員７名中６名が地上に落下して死亡、１名は補剛桁上に落下して重傷を負う事故が発生した。

支持桁の降下作業の手順は以下の通りであった。

- ① 先ず支持桁を５ブロックに分ける。
 - ② 補剛桁に敷設したレール上の作業台車の４隅に設置したクランプ装置から垂らしたワイヤーで支持桁ブロックを吊るす。
 - ③ 作業台車を降下位置まで水平移動する。
 - ④ クランプ装置を操作して１ｍずつワイヤーを伸ばして支持桁ブロックを降下させる。
 - ⑤ 適当な降下量を越えようとクレーンに盛り変えて支持桁ブロックを地上まで降ろす。
 - ⑥ クランプワイヤーを作業台車上に巻き上げ、次の支持桁ブロックの降下に取り掛かる。
- 事故は第２支持桁ブロック降下の④の段階で発生した。

（２） 事故調査委員会

本州四国連絡橋公団では、事故発生後直ちに有識者で組織した事故調査技術委員会（委員長 福本大阪大学名誉教授）が編成され、現地調査、桁落下のシナリオの特定、クランプ装置の性能確認実験、事故原因の特定、安全な桁降下方法の検討などについて数回の会議を行った。

現地調査により落下した作業台車、クランプ装置、支持桁ブロック、ワイヤーの状況およびワイヤーによる補剛桁の傷を丹念に調査して、事故発生から落下に到るシナリオについて各委員は意見を述べ、一致点を確認するとともに、相違点について議論を戦わせた。

この事故における落下物の最大の特徴はクランプ装置の上端でワイヤーがキンク（瘤状に巻きついた状態）していることであり、これはワイヤーが高速でクランプ装置内に引き込まれる時に発生するものである。クランプ装置が正常であればワイヤーが高速で引き込まれることはありえない。上下クランプが同時に開放されたときのみ支持桁ブロックの自由落下によってワイヤーがクランプ装置内に急速に引き込まれる。このことからオペレーターは操作ミスにより４つのクランプ装置の上下クランプを同時に開放してしまったことが結論付けられた。

もしワイヤーがクランプ装置を通過して支持桁が地上まで落下すると作業台車は補剛桁

上に留まる可能性があり、台車上にいた技術者や作業員まで地上に落下することはなかったが、上述のキンクの発生によりクランプ装置を抜け出たワイヤーの長さは１０～２０ｍ程度であり、衝撃的な支持桁ブロックの停止によりワイヤーに大きな衝撃力が作用し一部のワイヤーが破断した。作業台車はバランスを失い、補剛桁上から引きずり落とされた。

このような技術委員会の下した落下シナリオの妥当性を検証するため、特にワイヤーがクランプ装置を高速で通過するときにキンクが発生する可能性を確認するための再現実験が行われ、予想通りの現象が確認された。

引き続いて、工事の再開のために大型クレーンを使った桁降下作業方法の安全性を審議して、事故発生から３ヵ月後に工事は再開され、予定通り１９９９年５月に“しまなみ海道”は開通した。

（３） 労働基準局およびマスコミ対応

この事故は“しまなみ海道”完成予定のほぼ１年前に発生した。犠牲者の数の多さ、開通に向けての地元の期待などから事故原因に対するマスコミの関心が深く、事故調査委員会の動向はマスコミの監視下にあった。委員会では審議の経過に応じて委員全員の同意を得られた知見について公開することを原則とし、審議の終了後に委員長による会見を実施した。

また本州四国連絡橋公団の事故調査技術委員会とは別に、労働省労働基準局の事故調査委員会がスタートした。工事再開には労働基準局の同意が必要であり、本誌公団の事故調査技術委員会の審議内容は労働基準局の事故調査委員会に報告され、大筋について賛同を得たことも工事の早期再開に繋がった。

（４） 工学倫理の視点からの考察

事故調査技術委員会での審議により、支持桁落下事故の直接原因は、オペレータの操作ミスである可能性が高いことが明らかにされた。機械の取り扱いに習熟した専門技能者であっても、ミスの発生確率が０ではない。万が一に備えた安全対策を施すことが施工JVの技術責任者に課せられる責務である。このクランプ装置４台と操作盤を組み合わせた桁降下作業システムにはオプションにより安全装置を取り付けることが可能になっている。

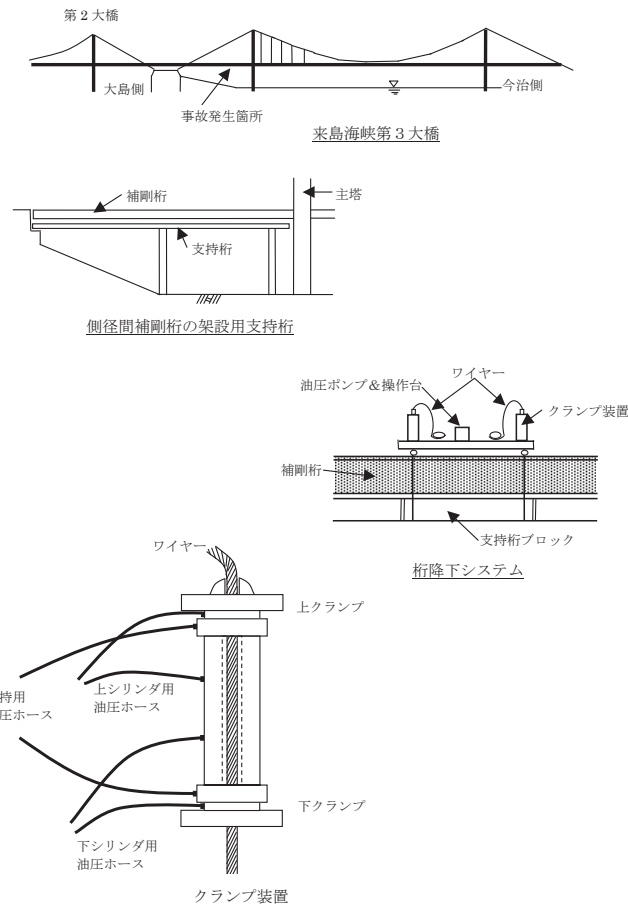
これはクランプ装置の上下のクランプを同時に開放できない油圧回路をシステムに組み入れるものである。明石海峡大橋のキャッツウオークの解体にもこの装置が採用されたが、そこでは安全装置が組み込まれたシステムであった。

この事故の教訓は、例え専門技能者が操作する場合でも操作ミスが重大な事故に繋がると予測される場合は、安全装置を取り付けることにより操作ミスによる事故を回避する努力が必要であることを示唆した点にある。

(5) 工学倫理演習課題

施工JVはわが国の有数の重工業会社であり、桁降下装置のレンタル料にオプションで安全装置を追加する僅かな出費を削るような企業ではない。では何故この現場で安全装置を付けなかったのであろうか。その理由を考察し倫理上の判断を下しなさい。

なお技術委員会では安全装置の存在と当該現場のシステムには採用されなかったことの確認は行ったが、採用しなかった理由については議論にならなかった。



工学倫理講義（その4）資料 橋梁事故に見る技術者倫理（その3）

来島海峡大橋馬島高架架設桁落下事故
ドキュメンタリー（マスコミ対応）

本四連絡道路3ルートのうち、尾道ー今治ルート（しまなみ海道）は最初に着工された（因島大橋）が多々羅大橋と来島海峡大橋の着工が遅れ全線開通は最後となった。1999年春の開通を目指して、多々羅大橋と来島海峡大橋の建設が鋭意進められていたが、1998年6月来島第3大橋（最も四国よりに位置する）の北側側径間の架設用支持桁の解体作業中に、作業台車ごと一部の支持桁が落下し、台車上で作業を行っていた技術者および作業員6名が地上に転落し死亡する事故が発生した。以下は事故対策委員会に参加していた筆者とマスコミとのやりとりを中心に、事故対策の経過を記録したものである。

平成10年6月x日 事故発生

愛媛新聞社より事故発生の報が入り事故原因に関するコメントを求められる。事故の詳細が分からないと言うと、現地で配布された資料がFAXで送られてきて再度意見を求められたので、当たり障りのない意見、多分ジャッキの安全性の検討が必要であることを述べた。翌日の朝刊に大阪大学教授（西村）の見解として報道された。

平成10年6月X+1日 事故発生の翌日

愛媛新聞社に引き続き毎日新聞社・朝日新聞社からもコメントを求められたが、詳細な資料が無いのでコメントできないと断った。朝日新聞の新米記者（千里高校ー東大）はかなり食い下がり、そのことがこの記者との腐れ縁を生み、この事故に関係したマスコミ対応に影響を与えた。

平成10年6月Y日 事故対策委員会への参加要請

関西道路研究会の視察旅行（名古屋地区）の最中、本四公団より事故対策委員会への参加の要請があり受諾した。研究会の幹事の携帯電話に再三連絡が入り、その週の日曜に現地集合が決まった。

事故対策委員会の委員長は福本教授（福山大学、大阪大学名誉教授）、委員は佐伯理事（本四公団）、佐藤助教授（広島大学）、岡原部長（建設省土木研究所）と西村であった。

平成10年6月Z日 第1回事故対策委員会

本四公団第3建設局（尾道）に集合し、直ちに船で瀬戸内海を渡り事故現場である馬島に到着、事故状況の調査を行った。筆者には、散乱している4本のクランプ装置を一見しただけで事故原因がクランプ装置の上下クランプを同時に開放するというあつてはならな

い操作ミスによることが理解できた。移動の途中は報道記者に囲まれ、特に委員長は大変であった。第3建設局に帰り、今後の委員会の進め方等について打ち合わせを行った。なお委員会の最後に委員会の審議内容でマスコミに開示する範囲について合意を採り、委員会終了後、委員長会見が毎回行われることになった。

平成10年7月 第2回事事故対策委員会

2週間ほどおいて第3建設局において第2回事事故対策委員会が開催され、主として事故のシナリオに関する各委員の見解を披露し、意見交換を行った。筆者はクランプ装置の操作ミスにより支持桁が落下し始め、ロープのキンク発生による作業台車の不安定化、ロープの破断、支持桁の地面との衝突を時系列的に説明するイラストを提出した。このシナリオは本四公団佐伯理事とほぼ同意見であった。

委員会が終了し、新大阪駅に帰ってきたところ改札口の柱の陰から例の朝日新聞の記者が現れた、委員長会見の内容は即刻携帯電話で彼の耳にも入っており、今更筆者から取材しても新しい情報はでないと言ったが聞き入れない。ついには我が家にまで上がり込んで取材する始末であった。そこで記事には載せないと約束して、委員会へ提出したイラストのコピーを渡したところやっと帰って行った。

平成10年7月 朝日新聞のスクープ記事

翌日の朝日新聞朝刊に来島事故のシナリオをイラストしたスクープ記事が載った。後日例の記者が語ったところによると、編集長の命令で筆者が渡したイラストを裏面からトレースしたもので、そのまま記事にしたのではないという言い訳であった。この記事により記者は社内表彰を受けたと語った。直ちに朝日新聞社以外の数社から、朝日新聞のスクープについてコメントを求められたが、まーあんなものでしょうと答えておいた。

数日後、また朝日新聞記者が研究室に現れ、事故でなくなった遺族に対する会社の対応を非難する声が遺族から出ていると話していった。筆者は事故を起こしたIHIの技術のトップとは知古の間であり、直ちにIHIに連絡して亡くなったIHIの社員はもとより関連会社の作業員に対する対応を迅速且つ丁寧に行うよう要請した。幸いにもIHIは適切に対応されたため、本四公団やIHIの遺族対応がマスコミに取り上げられることは無かった。

平成10年7月 第3回事事故対策委員会

前回の委員会でクランプ装置の上下クランプが操作ミスにより同時に開放されたこと、そのことによりロープが高速でクランプ装置に引き込まれるが回転慣性によりクランプ装置の入り口付近でロープが巻き付きいわゆるキンク状態が発生することを実験的に確認することになった。実験はIHIの呉工場で行われたため、尾道より事故現場を経由して呉まで船で移動した。実験は推定通りの結果であった。

平成10年8月 第4回事事故対策委員会

前回の実験も含め事故発生理由と支持桁の落下を説明するシナリオが固まったので、工事再開のため現地に残されている支持桁の撤去方法に関する審議を行った。

委員会が終了して新大阪駅に到着すると改札口でまた例の朝日新聞記者が待っていた。委員会が一応の決着を見たこともあり、今夜は酒を飲んで帰ると言う、記者も付いてきた。しばらく顔を見せなかったなと言うと、和歌山のカレー殺人事件の取材応援に派遣されていたとのことであった。事故発生以来この3ヶ月のマスコミ対応について話し合った。

平成10年12月 最終事故対策委員会

最終委員会が本四公団の本社がある神戸で開催され、事故報告書について確認した後、解散した。

平成11年5月1日 しまなみ海道開通式当日

重大事故があったにも拘わらず、地元の期待に応じて予定通り5月1日、しまなみ海道の開通式が大々的に挙行された。筆者も開通式に招待されていたが、その前日、日本道路公団四国支社の橋梁架設工事に立ち会うことになり、伊予大洲に行き、その夜は道後温泉に宿泊した。5月1日朝、松山から今治に移動し、しまなみ海道の開通によりその日が最後の運航となる今治―尾道間の巡航船からしまなみ海道の橋梁群を見届けようと計画していたので、巡航船乗り場に行ったところ1時間以上の待ち時間があった。手持ち無沙汰でしかたなく待合室で缶ビールを飲んでいたところ、不意に横から「西村先生、何でこんなところにいるのですか」と声を掛けられた。例の朝日新聞の記者であった。数日前に松山支局から今治支局に異動となり、しまなみ海道開通の陰の部分取材しているとのことであった。

なお、JH四国支社のジャッキアップ回転工法による宿茂高架橋の架設工事のクライマックスは同年9月に行われ、多数の報道陣が集まったが、朝日新聞社のみヘリコプターによる上空からの取材を行ってくれた。今治で記者と出会ったときにこの工事のパンフレットを渡し宣伝しておいたことが役立った。しかし、新聞記事の解説に「奇抜な工法」と書かれたのは心外であった。

工学倫理講義（その5）

都市再生の名の下に第2のバブル到来

1. 都市再生とは

小泉内閣が発足して2年を経過した。この内閣は聖域なき構造改革を標榜し、まず公共投資の削減に手を付けた。高速道路の建設と管理を担当してきた道路4公団（日本道路公団、首都高速道路公団、阪神高速道路公団、本州四国連絡橋公団）の分割民営化に取り組むと共に、ガソリン税の道路関連特定財源枠を外して、一般財源算入を決定した。

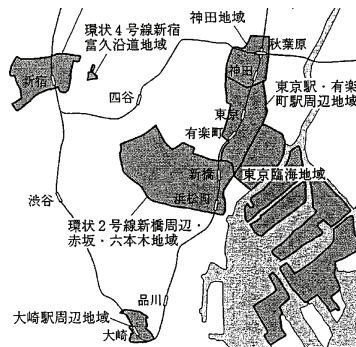
高速道路の建設は総量が規制され、不要不急の地方高速道路の建設を先延ばしして、大都市周辺の環状道路や連絡道路を優先的に建設する方向に軌道修正するべく準備が始まっている。このような政策は小泉首相を本部長とする都市再生本部で議論され、実行に移されようとしている。

これまでは経済の活性化を図るために補正予算が注入され、その中に必ず道路建設費が含まれていた。単年度会計の原則に従うと用地の取得しやすさや道路建設反対運動の少ないことを条件として候補地を選定すると、それは投資効果の少ない地方であった。一方、大都市周辺では放射状の高速道路はほぼ完成したものの、それらをネットワークとして機能させるための環状道路や連絡道路の建設が都市化に追いつかなかったために遅滞し、大都市圏の交通渋滞に拍車をかけることとなった。言うまでもなく、大都市圏の土地代の高騰と周辺住民の道路建設反対運動とによる。大都市圏におけるこのような閉塞状態を放置することは都市機能の低下、ひいては国際競争力の低下をもたらすことが懸念される。これを打破するための都市再生に異論を唱える人は少ないであろう。特に土木技術者は、建設中および開通後の道路環境問題を解決できる新技術の開発に努めなければならない。

都市機能の再生のための建設投資に限るなら小泉改革の陽の部分として評価できるのではないだろうか。

2. 建築無法時代

ここ2、3年、東京へ行く度に、品川駅東地区、汐留地区、東京駅北口付近、六本木周辺の再開発事業の急速な進展に驚かされる。開発事業の中心はオフィス用および住居用高層ビルである。これらの新しい再開発ビルの特徴は敷地面



図－1 東京圏の都市再生緊急整備地域

積に比べて容積が大きいこと、言い換えると高層ビルが密集していることである。この種の再開発は上に挙げた例に留まらない。図－1に示すように東京圏では7カ所、

東京駅・有楽町駅周辺、環状2号線新橋周辺・赤坂・六本木地域、秋葉原・神田地域、東京臨海地域、新宿駅周辺、環状4号線新宿富久沿道地域、大崎駅周辺地域

これ以外に、大阪圏で8カ所、横浜および名古屋にそれぞれ1カ所、合計17カ所が、都市再生特別措置法（2002.3）に基づいて2002年7月に都市再生緊急整備地域に指定された。さらに2002年10月に政令指定都市を対象として28カ所が都市再生緊急整備地域として2次指定された。

都市再生特別措置法の主要点は以下の通りである。

- ・ 閣議決定で発足した都市再生本部を法的に認定する。
- ・ 同本部は都市再生緊急整備地域を政令で指定する。
- ・ 民間業者は、地権者の3分の2以上の賛成があれば公共工事を伴う再開発事業などを民間都市再生事業として提案でき、それを国土交通大臣が認定する制度を創設する。
- ・ 都市再生緊急整備地域の中で実際に再開発提案が行われた地域を都道府県が都市再生特別地区として定め、ここで用途地域、容積率、斜線制限、高度制限、日陰制限など都市計画法や関連法規で定められた規制を適用除外する。
- ・ 認定事業に対しては、無利子融資、社債の保証などの金融支援を行う。
- ・ 都市計画、事業の認可手続きなどの大幅な短縮を図る。

これまで都市における建築物は都市計画法、建築基準法および都市開発法の規制を受け、妄りな再開発事業には一定のブレーキが掛けられてきた。これは日照権に代表される市民の健康や住み易さを維持するための規制であった。古い町並みの景観を守ったり、日照権を奪う高層建築の排除は都市再開発と対立するものであった。このような規制は1960年代から徐々に緩和されてきたが、小泉内閣の構造改革によって都市再生緊急整備地域では大幅な規制緩和により、先に述べた様な高層ビルの建設ラッシュが始まったのである。

一般に再開発によるビルの建設は不動産会社（ディベロッパー）、建設会社、地権者で構成された協同組合の形で行われる。地権者には多数の地元民間人である場合や地方自治体である場合もある。容積率の大幅な緩和によって再開発される建物では、増加した容積に見合う空間を分譲や貸室として活用できるから不動産会社にとってこれほど旨い話はない。地権者は再開発前に所有していた敷地面積より遙かに狭い面積を再開発ビルの中に与えられることが多い。

再開発による高層ビル群の出現は建物の建設に留まらず、道路を始めとしたインフラの建設も必要とする。インフラの建設費用の内再開発協同組合が負担する割合は多くない。大半は地方自治体が負担することになる。将来に亘る固定資産税での回収位では地方自治体の投資額を回収することは不可能である。

マスコミで「2003年問題」が注目されている。東京圏における相次ぐ都市再開発による高層ビル群の建設によって、オフィス面積およびマンション面積が需要を上回ること

が、色々な社会問題を引き起こすことが懸念される。

例えば神田、日本橋界限は中層のオフィス街であり多数の優良企業が入居している。これらの会社が新しく建設された都市再開発ビルに移転したり、都市再生緊急整備地域の特権を活用して自社ビルを建設し移転する動きが目立っている。中層のオフィス街では新たに入居する企業がないため、オフィスの賃貸料が低下し、貸しビル業の経営が行き詰まってきた。旧国鉄跡地などこれまで住民が居なかったところに建設されるマンションに入居者が急激に増えると、地区の小中学校などの公共施設が対応できない場合もある。

前述のように、都市再開発は2003年以降も次々と計画されている。最早オフィスビルもマンションも供給過剰となり入居者を確保することが困難になろうとしている。容積率の規制緩和により増加した可処分面積を販売することで利益を上げようとする再開発計画は第2のバブルと言えるであろう。

3. PFIのまやかし

都心部の高層ビル群に留まらず、多くの社会基盤施設の建設や改築がPFI（Private Financial Initiation）制度を活用して推進されようとしている。国の財政が逼迫しているので、民間企業の財力に頼って建設を進める際に、民間企業は必ず投資に見合うインセンティブを要求する。容積率の規制緩和により増加した可処分面積を企業が得て、その販売により利益を得ることができるような物件や営業収入が望めるような施設であればPFIの成立は可能であろう。今、行政が志向している大学等の改築へのPFIの適用が本当に可能だろうか。

郊外に立地する大学は容積率に余裕を持っているので都市再生緊急整備地域の指定が無くても改築する建物の容積率を増やすことは不可能ではない。しかし増加した面積を民間等に販売したり賃貸することはできないので、PFIを引き受けた企業にメリットはない。また大学は授業料以外に営業収入が無いのでこれも、授業料の大幅な値上げなしには企業にメリットはない。唯一の可能性は、政府が建設費とそれに見合う利子を含めた債務を引き受けることであるが、赤字の累積した政府に余力があるようには思えない。結局、形を変えた赤字国債の発行と同じではないか。

4. 都市再開発における倫理

筆者は再開発無用論を唱えているのではない。むしろ都市機能の再生を願い、技術的支援を行ってきた。例えば平面交差点において斬新な工法の採用により、極めて短期間に立体交差橋を完成させる技術の指導（北花田誇道橋）や、半地下道路への鋼製構造の適用による急速施工と道路環境の改善の指導（JH東名阪自動車道）などである。

しかし現在急速に進められている都市再生プロジェクトはその殆どが民間ディベロッパーと建設会社に利益が集中する高層ビル建設であり、その陰で地元住民、自治体に負担を強いるものとなっている。

工学倫理講義（その6）

工学（技術者）倫理が求められる社会的背景

近年、工学倫理教育の必要性が声高に論ぜられる社会的背景を振り返って見よう。加藤尚武の応用倫理学における分類に準じて生命倫理学、環境倫理学、企業倫理学（以上第9週）、情報倫理学および建設倫理学（以上第10週）について述べる。

〔生命倫理学〕

北摂地区におけるバイオサイエンスは小泉内閣の都市再生本部が認定した関西の研究・産業開発拠点であり、その中心に位置する大阪大学は生命倫理学に対して最大限の関心を払わなければならない。20世紀の最後の四半世紀におけるDNA、遺伝子の解明と生体工学への応用技術の発達は医学と工学の垣根を限りなく低くした。医工連携の初期はCTスキャンや超音波探査等診療機器の開発における共同研究であったが、今日では遺伝子治療等に見られるように治療そのものに共同研究が関わってきている。

研究者・技術者の野望のために、十分な安全性の確認のないまま、新しい技術を使用してはならない。遺伝による疾病者に遺伝子治療を施して病から開放することは許されるけれども、不妊の人にクローン技術により子供を授ける治療は許容されない。クローン人間問題では「人間の尊厳」について人類の共通認識が形成されることなしに、この技術開発に着手してはならない。工学の発展によって技術者は極めて誘惑的で危険な状態に立たされている。

〔環境倫理学〕

全世紀の後半、我が国では急速な工業化の副産物として、種々の公害が発生し、自虐的に公害先進国と称していた。代表的なものに水俣病がある。化学工場の廃液に有機水銀が含まれていて、未処理のまま水俣湾に排水されていた。湾内の魚介類の食物連鎖により有機水銀は大型魚に蓄積し、これらを常食としていた漁民を中心として水銀中毒が蔓延した。工場廃液と水俣病との因果関係が公式に認定されるまで30年近くの間訴訟があり、被害者の苦痛は計り知れないものがあつた。訴訟の途中で因果関係を説明するための統計データが学識経験者（大阪大学工学部教授）によって評価された。その統計モデルは杉山モデルと称されたが、それによると因果関係は希薄であると解釈され、一層の混乱を招いた。

四日市や尼崎・西淀川の公害訴訟は大気汚染によるもので、工場排煙と自動車の排気ガスの複合汚染である。不特定多数が原因に関わっている自動車排気ガスの問題は因果関係の立証に長期間を要し、訴訟の解決は非常に難しいものとなっている。

技術者はこのような公害を防止するために何を成すべきであろうか。

1) 燃焼ガスや排水に含まれる物質が公害を発生させる可能性を注意深く調査する。

2) 公害物質を排ガスや排水から除去する方法を開発する。

3) 公害物質の原因となる原料を使用しない無公害製品を開発する。

また、一般人として、自動車の使用を禁止することはできないので、移動原単位あたりの公害発生（エネルギー使用）を押さえる行動を取る姿勢が大切である。（都市においては乗用車より公共交通機関の選択など）

この他、ダイオキシン・微量化学物質の健康に対する影響の解明が急がれている。

工学倫理とは外れるが、最近の IWC の捕鯨禁止問題に触れておく。2003 年 6 月、IWC は調査捕鯨禁止を採択した。この案に賛成の国の代表者は「鯨の住む海は地球環境のバロメータであり、捕鯨行為は地球環境の保全に反する」と言う。しかし商業捕鯨が禁止されて以来四半世紀の間に、世界中の海で鯨は増殖しており、彼らの餌となる小型魚類を巡り漁民とのトラブルが発生している。人類の漁獲量のおよそ 5 倍の小型魚類を鯨は消費するようになっている科学的事実を欧米の捕鯨禁止論者は理解しようとしなない。ヒステリックに鯨は見るもので食べるものではないと叫んでいる。

〔企業倫理学〕

企業倫理は工学倫理の範疇にない。加藤尚武によると「企業は法的には私的人格であるから私的人格としての民事的な責任を課せられるだけであるが、社会的な影響という点では一個人とは違う影響を持つ。企業の法的に認められた私的性格と現実的に機能している公共的性格のギャップを埋めることが企業倫理の課題である。」。多くの技術者は企業に雇用されているので、工学倫理と企業倫理との衝突に困惑することになる。

企業倫理として取り上げられる課題は以下の通りである。

贈収賄、性差別、環境責任、雇用問題、安全管理、知的所有権、インサイダー取引、内部告発、サービス残業と過労、単身赴任、談合

このうち下線部は工学倫理の関係する課題であり、工学倫理は社会的な影響に基礎を置いていて、私的性格を持つ企業の倫理と衝突する訳である。

工学倫理演習

最近、国内で土壌汚染の問題がニュースとして取り上げられている。

- 1) 茨城県神栖村の住宅地における旧日本軍によって埋設投棄された化学爆弾成分の漏出による人体被害
- 2) 大阪市此花区の工場跡地を再開発した住宅街における有毒化学物質の漏出による住民の健康被害

これらの汚染対策の参考になるのはアメリカにおける事例である。

ニューヨーク州ナイアガラフォールズ郡ラプカナル市に生じた汚染事件は 2 度に亘る大統領の非常事態宣言が発せられたことで有名である。化学会社であるフッカー社は 1947 年から 1952 年に掛けて、同地区の運河跡に化学廃棄物を投棄した。総投棄量は 2 万トンでダ

イオキシンを含む危険な物質を含んでいた。1953 年フッカー社は、化学廃棄物から生ずる一切の賠償責任を負わない条件で同地区を市の教育委員会に売却した。同委員会は小学校を建設し残りの土地を開発会社に転売した。開発会社は住宅を建設して市民に販売した。1970 年代の中頃、同地を記録的豪雨が襲い、地下水量が増加し、土中に漏出していた物質が地表面に押し上げられた。1978 年、州政府等の調査により漏出物質の人体への影響が明らかになり、さらに同地区での非常に多くの流産件数が報告された。カーター大統領は非常事態宣言を行って連邦政府の支援を表明し地区の浄化計画に着手した。1980 年 EPA の調査により住民の一部に染色体異常が報告され、地区に残った住民をパニックに陥れた。カーター大統領は 2 度目の非常事態宣言を行い、地区内の数百個の住宅を買収する協定を公表した。

アメリカにおける土壌汚染問題に対する対応を参考にして前記の我が国における土壌汚染に対する対応を考察せよ。

〔情報倫理学〕

情報化社会を迎えて、国民総ネットワーク化が進んでいる。携帯電話の機能がパソコン並みになり、インターネットが各家庭まで普及する中で、情報を獲得することが生活上有利となる現象が広まって来ている。情報化に乗り遅れた人にとっては由々しい問題である。

卑近な例を挙げると、列車や航空チケットの予約が携帯電話やパソコンから可能となっている。混雑時にはネット予約の方がチケット発売窓口で購入するより遙かに確率が高いし手間も省ける。中にはネット予約にディスカウントの特典が付いている場合もある。新入社員募集をインターネットで行う企業が増えている。これに対応する若者は情報弱者ではないが、高齢者の再就職のための情報に関して情報弱者は不利益を被る。圧倒的に多数の国民が情報技術にある程度対応できるようになれば、情報弱者に対する過大な配慮がコストに影響するとの理由で等閑にされるであろう。

情報倫理の必要性は情報弱者の救済ではなく、以下のような観点で重要である。

- ・情報犯罪の防止－ハッキングの防止、コンピュータウイルス防止、サイバーボルノの規制
- ・プライバシー保護

情報技術の発達によって、ネット上を情報が一人歩きする可能性がある。子のような技術に関わる者は、他者の危害にならないことを絶えず心がけなければならない。

〔建設倫理学〕

この項目は加藤尚武の応用倫理学には含まれていない。しかし社会基盤施設の計画と建設には住民の意見が十分は反映されなければならないが、これまでの公共事業は行政側の

一方的な計画により行われてきており、住民参加の方式について十分な経験がないことから、倫理問題をベースとして解決すべき課題が多い。そのような理由で建設倫理を一つの項目として加えた。

ビッグプロジェクトの推進に関わる行政技術者の倫理

本州四国連絡橋、関西国際空港、東京湾横断道路などのビッグプロジェクトは政界・産業界・建設業界の連携により推進される。基本計画は国土交通省で周辺の既存施設や将来計画と整合性を考慮して立案され、建設に対する国民の同意を得て、公団等において詳細な実施計画・実施設計を検討し、更に財務省との間で財務計画の調整が付けば着工の運びとなる。

土木技術者の役割は基本計画・実施計画設計を通じて、安全性・経済性・利便性を工学的手法を用いて評価することにある。大規模な施設の建設に対しては財務省が受け付ける段階で相当厳しい財政的障害が提示される。積算工費の見積や建設国債を活用する際の償還計画の重要なデータとなる利用予測などは、いづれも土木技術者の能力と裁量にかかっている。ビッグプロジェクトの建設は複数年度の亘る。一度あるプロジェクトに対して建設費が付くと、途中で打ち切られることはほとんど無いので、当初工費を安く見積もっておき、継続年において不足分を上乗せするような方便、あるいは利用予測を過大に見積もり甘い償還計画を立てて予算獲得を有利に導くような恣意的な行為は技術者倫理から非難されなければならない。

- ・関西空港埋め立て地の沈下予測値を少なめに見積もった関西空港株式会社の技術者
このことによって建物の嵩上げ工事費の増加、滑走路・誘導路の嵩上げ工事量の増加、空港施設に対する塩害の増加など維持管理費に負担が掛かっている。
- ・本四3ルートや東京湾横断道路の予想交通量の甘い見通しにより建設国債の償還計画が大幅に狂いを生じた、本四公団に対しては1兆6千億円もの税金の投入が必要となった。

責任施工に携わる建設技術者の倫理

この項については橋梁の架設中に生じた事故例で述べた。

架設工事は請け負った業者の責任において安全に遂行することが求められる（責任施工と言う）。このことを前提として工事における安全性、完成した施設の品質保証が確保されなければならない。これに反する行為は技術者倫理に照らして糾弾される。

異業種間の技術情報の伝達に関する倫理

土木施設は複数の異なった業種の会社が参画して施工される。橋梁に例を取れば、まず基礎を建設するゼネコンが入り、橋台と橋脚までを建設する。続いて橋梁上部構造のメーカーあるいは架設会社が橋梁を架設する。最後に床版工事会社・舗装業者が入り仕上げを行う。

このような異業種間の情報伝達に遺漏があるとき、技術者倫理問題が発生した例を述べる。

- ・橋梁下部工の施工会社と上部工（鋼橋）の製作会社との情報伝達不足

橋脚上に支承のアンカーボルトを埋め込むための穴の位置が不適切で、上部工の架設業者は穴の位置を修正しようと試みたが、鉄筋が邪魔になりアンカーボルトの必要長さの穴を開けられなかった。そこでアンカーボルトをガス切断し短くして施工した。このことが同業者からマスコミへのたれこみにより表沙汰となった。アンカーボルトの埋め込み長さは引き抜きに対する抵抗力に関係するので、アンカーボルトの長さを短くすると巨大地震時の安定性を欠く場合もある。

- ・開断面桁橋という経済的な橋梁形式が最近比較的多く採用されている。この形式橋梁は床版コンクリートが硬化し、開断面材としての特徴が発揮される前は開断面材の特徴によりねじれやすい構造である。上部構造の製作会社と床版工事会社間の情報伝達が不十分で、床版コンクリートを一気に打設したため、非常駐車帯によるねじり荷重により橋梁全体に無視できない傾きが生じた。

このような異業種間の情報伝達が不十分であることにより、しばしば不適切な工事が行われている。このような不具合を防ぐには行政側の技術者を中心として異業種の技術者を集めた事前検討により、情報管理を確実にすることが重用である。

建設プロジェクトに対する住民参加

社会基盤施設の建設や維持管理は市民が安全に安心して生活するために行われるのであるが、行政や建設業界のために行われるものではない。専門性が問われるだけに、一般市民が建設や維持管理に直接参画するのは適切ではない。とは言え一般市民が社会基盤施設の計画に際して、意見や希望を表明することは拒まれるものではない。意見や希望を行政に対して伝達する方法論に関して我が国と欧米ではかなり異なっている。

一つのやり方としては、選挙で選ばれた議員を通じて市民の意見や要望を行政に伝達する方法が我が国では主流を占めてきた。政権側の議員は特定の市民からの要望を恰も市民を代表するものとして行政や建設企業と協力して、事業を推進してきた。最近のように無党派層が一般市民の半数を越えると、政党政治は必ずしも民意を反映したものとは思えない。

そこで今ひとつのやり方として建設プロジェクトごとに審議会を設置して、メンバーに市民の代表者を加えて採否を問う方式があり、欧米ではこのような審議会方式が良く行われている。市民の代表者の選び方によってこの方式の評価が異なる。社会がこのような方式について十分な経験を積み、倫理的にみて適正な人材が選定されるようなシステムを構築して行かなければならない。

工学倫理演習

ここに挙げた情報倫理および建設倫理は建設技術者の卵の内から日常的に関わる可能性がある。今期の工学倫理の講義を踏まえ、将来建設技術者として様々な活動に参画する際の決意を簡単に述べよ。