

最近の国際会議における構造工学の諸問題

前 田 幸 雄*

1. ま え が き

著者は最近、次のような構造工学関係の国際会議に論文発表や委員会出席のために参加する機会を得たので、これらの会議の中でどのようなテーマが問題になり、その問題解決がどのような方向をたどろうとしているかを述べて、会員諸氏の参考に供したい。

(1) IABSE (国際橋梁・構造工学会)、第1技術委員会主催「構造物の安全性の概念と設計法」に関するシンポジウム、1969年9月、ロンドンにおいて。参加者320名、日本から出席者7名、発表論文2編。

(2) IABSE 第3技術委員会主催「クリープ・乾燥収縮・温度変化に対するコンクリート構造物の設計」に関するシンポジウム、1970年9月、マドリッドにおいて。参加者250名、日本から出席者7名、発表論文7編。

(3) IABSE 第2技術委員会主催「プレートガーダーおよびボックスガーダーの終局強度設計」に関するコロキウム、1971年3月、ロンドンにおいて。招待参加者20名、日本から参加者4名、発表論文6編。

(4) イギリス、カーディフ大学土木・構造工学科主催、イギリス構造工学会後援「橋梁の設計と建設における進歩」に関する研究発表会、1971年4月、イギリス、ウエールズ州、カーディフ市において。参加者300名、日本から出席者4名、発表論文1編。

2. 有限要素法の応用

構造解析の分野において、マトリックス法は任意な形状・荷重状態、複雑な構造物に対しても適用できるような組織的な解析法として、コンピューターとともに発展してきた。とくに連続体を有限個の特性づけられた要素からなるものとみなす有限要素法 (Finite Element Method, 以下 F.E.M. と略称) の概念はマトリックス代数学と変分原理の応用によって、大きく発展しつつあり、静的・動的解析、弾性・塑性・振動・座屈問題など

広い範囲にわたって利用されつつある。この手法は、従来、差分法が用いられていた他の分野、流体力学・熱伝導・電磁気等にも進出しつつあり、近い将来偏微分方程式の有力な数値解法として発達するものと思われる。F.E.M. についての研究として新しい有限要素モデルの開発、F.E.M. の数学的基礎づけ、非線形力学問題への適用、汎用プログラムの開発と設計の自動化等が大いに期待されている。とくに複雑な形状の3次元連続体の要素モデルの取り方と、材料非線形と幾何学的変形による高次の非線形問題への挑戦についての研究は、これから活発になるとと思われる。

カーディフ大学の研究発表会では、Love, Filon, Southwell を生み、また、F.E.M. の先駆的研究とその著者で有名なウエールズの Swansea 大学の Zienkiewicz 教授が活躍しているイギリスであるために、F.E.M. の応用に関する、多くの研究が橋梁工学の分野で発表された。同教授は、この研究発表会の論文の中で、微小変形理論による弾性解析に関する限り鋼橋・コンクリート橋を問わず、版桁橋・格子桁橋・偏心載荷のスラブ、背の低いまたは高い箱断面構造等を含み、ほとんどすべての橋梁に F.E.M. が応用可能であることを多くの例をあげて論じている。事実、全発表論文 38 編中、F.E.M. に関連した 16 編のおもなテーマをあげてみると、単純または連続支持の直線・斜め・曲線の版桁 (RC または PC) および RC 箱桁橋スラブの解析、スラブの柱・橋脚・橋台支承部および集中荷重作用点近傍の局部応力解析、扇形板の解析、箱断面の直橋・斜橋・曲線橋の解析 (折板理論による方法と F.E.M. の比較) 等である。これらの解析結果の妥当性の判断は正解の得にくいものを扱っているため、小型または大型のモデル実験結果との比較によって論ぜられている。さらに、F.E.M. は単に解析の範囲のみに限らず、F.E.M. による解析を組み込んだ設計プログラムの開発が報告されており、たとえばカリフォルニア大学の Scordelis 教授のコンクリート箱桁橋のプログラム等である。

F.E.M. がわが国に紹介されて本格的な研究活動が開始されてまだ 6 年ぐらいいしか経過していないが、F.E.M. を含む構造解析法の普及発展は、まことにめざましいも

* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

のがある。複雑な形状の3次元連続体の F.E.M. 解をその幾何学形状を尊重しながら比較的数少ない要素分割で高い精度を得る努力が行なわれるであろうし、材料非線形問題については、荷重漸増法に基づく弾塑性応力場の F.E.M. 解法、幾何学的非線形問題における不安定現象が生ずる近傍の解析等の研究が今後各国で展開されてゆくであろう。しかし、われわれの注意すべきことは、有限要素解は、いかに精度が高くても数値近似解法であって、その精度の確認をいかに行なうかということと、数字をとおして背後の物理的意味を確実に把握しなければならないということである。ギヨン・マソネ法で有名なベルギーの Massonnet 教授は、「技術者にとって大切なことは、完成したプログラムは、あくまで便利な道具であって、その道具を用いた結果ができるだけ簡潔な設計式の形で提案されることが望ましい」と、カーディフ研究発表会での総括報告の中で述べている。

3. 構造物の安全性と設計の問題

構造工学における最近の重要な研究の一つは「構造物の安全性の概念を確立し、それをいかに公式化して設計の中に導入すべきか」に関して行なわれている国際的規模の研究であって、この見地からヨーロッパ・コンクリート委員会 (CEB) と国際プレストレスト・コンクリート連合 (FIP) の共同研究は高く評価されてよい。この成果を中心として、ロンドン・シンポジウムにおいて議論されたテーマのおもな内容は次のようなものである。

① 設計法の歴史的発展。

② 安全性の概念、安全性の解析と確率論との関係、関連した確率理論と統計的方法。

コンクリート系構造物に対する半確率論的限界状態設計法¹⁾や鋼道路橋に対するアメリカの荷重係数設計法²⁾にみるように、安全性の従来からの決定論的評価はもはや時代遅れで、少なくとも確率論の立場から統計資料に基づいて評価しなければならないことが国際的にもひろく認められるようになった。今後は、アメリカ合衆国イリノイ大学の Ang 教授らの提唱している主観的判断確率係数の採用等の方法によって、客観的資料の裏づけのきわめてとりにくい不確実性をいかに評価して設計の中に取り上げてゆくべきかが問題になってくる。

③ 荷重および作用外力の性質、その統計資料および不利な組合せに対する確率。

風荷重や地震荷重そのものの評価と構造物がかかる荷重を受けるときの挙動の確率論的評価、および活荷重とくに鉄道橋の疲労被害の評価が大切な問題点であって、荷重と外力および、それらの作用を正しく評価するために、統計資料を充実させる努力が国際的共同のものとい

っそう続けられなければならない。

④ 材料、とくにその特性値のばらつき、試験体資料に基づいた特性値の評価。

⑤ 作用荷重と外力の不確実性・材料性質のばらつき、構造物構成要素としての材料の不確実性等を考慮した構造物挙動の予測、また部材、その接合部、さらに全体構造物の使用限界に達する危険度の評価。

たとえば、鋼柱の挙動の予測、連続薄肉ばりの曲げねじり破壊様式、ランダム非線形曲げ挙動の統計的研究、確率論的および推計学的荷重を受ける構造系の信頼性、といった研究が発表されている。

⑥ 以上の諸問題を考慮した設計法、弾性・塑性のような数学モデルの使用、限界状態の定義と選択、安全性概念導入の手法。

コンクリート系構造物に対する CEB-FIP 提案の限界状態設計法³⁾がもっとも注目をあびて活発な討議が行なわれ、さらに同設計法の鋼道路橋への応用についても研究成果が発表されている。

最近、わが国の土木工学の分野でも構造物の安全性に関する統計的・確率的研究がようやく活発化しようとしているが、実際の設計法については、統計的調査資料が不十分である現在では、荷重・材料・構造種類を考慮して半確率論を用いた限界状態設計法が国際的に受け入れられようとしている。この設計法の中に用いられている部分安全率のより確率論的な研究、構造物耐用年の決定、外力・荷重・材料のばらつき、製作・施工の精度、維持・管理の程度、構造物の重要性、上部と下部の関係、経済性等と安全性の問題を総合的に扱う研究の発展が要望されている。かかる研究を推進するために、IABSE の中に 1970 年から新しく構造物安全性委員会が設けられている。

4. プレートガーダーおよびボックスガーダーの後座屈強度を考慮した終局強度

プレートガーダーの終局強度の研究がアメリカ合衆国リーハイ大学において Basler²⁾ によって行なわれて以来、この問題について鋼構造研究者の注目をあびるに至り、多くの実験的・理論的研究が進み、その成果は設計示方書の中に取り入れられつつある。たとえば、1958 年のイギリスの鋼桁橋の設計規準 (BS 153 : Parts 3 B and 4) に終局強度的な考え方が早くから導入され、1963 年のアメリカ合衆国鋼構造協会 (AISC) の建築物設計規準ではさらにより明確な形で発展し、1971 年のアメリカ合衆国鋼道路橋示方書 (AASHTO 示方書) では荷重係数設計法として終局強度に基づいた設計思想を展開している。ロンドン・コロキウムにおいては水平補剛材をも

つ細長比の大きなプレートガーダーおよびボックスガーダーに重点が置かれ、もっとも新しい研究成果が討論された。

そのテーマを分類すると、① 同種、垂直補剛材つきプレートガーダーの終局曲げ強度・終局せん断強度・終局曲げせん断強度（アルミ合金桁を含む）、② 同種、垂直・水平補剛材つきプレートガーダーの終局曲げ強度・終局せん断強度・終局曲げせん断強度、③ 同種、無補剛プレートガーダーの終局曲げ強度・終局せん断強度、④ ハイブリッドガーダーの終局曲げ強度、⑤ 疲労問題、⑥ ボックスガーダーの終局曲げ強度、⑦ 特殊問題（ウニブに開口部をもつ無補剛プレートガーダーの曲げとせん断強度、曲線桁ウェブの応力、 α 型曲りウェブをもつプレートガーダーの弾性安定、ウェブの圧潰）がある。かかるテーマの中の議論のおもな問題点をあげると次のようである。

（１）プレートガーダーの終局曲げ強度

水平補剛材のプレートガーダーの曲げ耐荷力への貢献について、線形座屈理論に基づいた最小剛比 r^* の何倍の剛性を水平補剛材に与えるべきかが討論されて、ベルギーの Massonnet 教授は水平補剛材の位置によって、3~7 倍を提案している。ウェブの面外変形を拘束し、ウェブの平面保持をできるだけ確保するようにするか、ガーダーの崩壊まで直線性を保つようなより剛な水平補剛材を設けるべきか、水平補剛材とその近傍のウェブを有効に働かす柱とみなして、ウェブの平面保持のための剛性のみならず、圧縮柱としての強度にもなることができるように設計すべきか、といった点が今後の研究の問題である。

（２）プレートガーダーの終局せん断強度

写真-1 に示したイギリスの Rockey 教授の実験に現われているように、プレートガーダーのウェブがせん断座屈を生じたあとで、ウェブに斜力場が形成されてさら

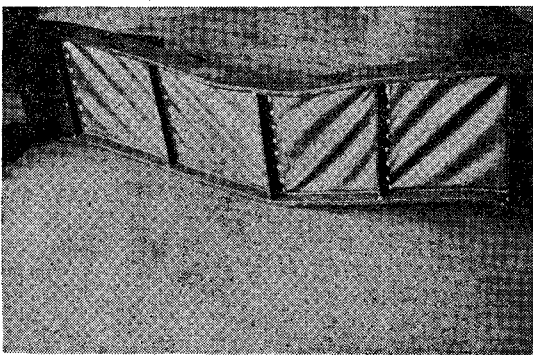


写真-1 斜張力場形成

に大きなせん断力をにうることができることが認められている。フランジの剛性が弱いときには、フランジが斜張力成分のアンカーとしての役割を果たすことができないう Basler²⁾ の理論、フランジの剛性が大で斜張力場が降伏するとともに塑性ヒンジがパネルフランジに形成されて一つの機構になる、というウェブ周辺の骨組作用の役割に注目した理論、さらにフランジが非常に剛な場合にはウェブに完全斜張力場が形成されるとした理論があり、ウェブに生ずる斜張力場の方向と分布幅、斜張力のアンカーとなるフランジの垂直方向の変形、フランジに生ずるパネル塑性ヒンジの位置、フランジの垂直方向の剛性と終局強度の関係から、いくつかの解析モデルが提案されているが包括的な設計式はまだ示されていない。今後の研究課題である。

（３）ボックスガーダーの終局強度

最近、各国で相次いで起こった鋼ボックスガーダー橋の架設時の事故、たとえば 1969 年 11 月 6 日のオーストリア・ウィーンの第 4 Danube 河橋、1970 年 4 月のアメリカ合衆国カリフォルニア・サクラメント河を渡る Bryte Bend 橋、1970 年 6 月 2 日のイギリス・南ウェールズの Milford Haven 橋、1970 年 10 月 15 日のオーストラリア・メルボルンの Lower Yarra 河橋の West Gate スパンの事故の原因の追究に関連して、ボックスガーダーの終局強度の研究発表がロンドン・コロキウムおよびカーディフ研究発表会で行なわれた。写真-2 に示したものは、上記第 4 Danube 河橋の箱桁下フランジの座屈破壊である。縦リブによって補強された一様圧縮を受ける板では、線形座屈理論による最小剛比の下では、現実に補剛材の直線性を保つことができず、したがって、座屈時の節の役割を果たし得ないこと、またプレートガーダーのウェブと異なり、後座屈強度があまり期待できないことが明らかにされ、最小剛比の 3~8 倍の剛性を縦リブに与えるか、または設計の点で架設時の安全率を高くしておくことが強調された。今後の理論的

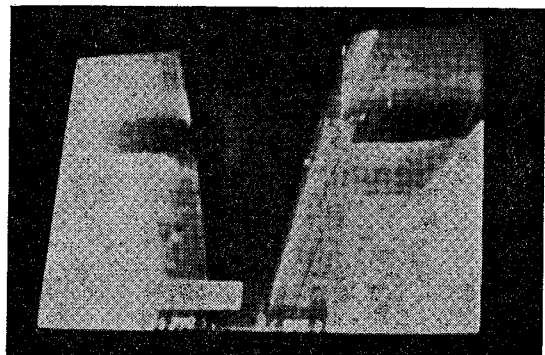


写真-2 ボックスガーダーの座屈事故

および実験的研究の発展が強く要望されている。

(4) プレートガーダーの疲労の問題

ウェブと圧縮側フランジの隅肉溶接の先端に桁軸方向に発生する疲労き裂は薄肉で背の高いプレートガーダー特有のき裂つであって、ウェブ細長比を小さく設計するか、または剛な水平補剛材でウェブの繰返し2次曲げ作用を低くおさえることによって、防止できることが明らかにされた。ハイブリッドガーダー(異種材料の混合材)のこの種の疲労き裂発生の研究の必要性が強調されている。

以上の研究の結果、プレートガーダーおよびボックスガーダーの終局強度について、統一した思想のもとに実験に裏づけされた解析モデルの設定、その理論解、さらに設計式の提案が今後の実際への応用の問題である。

5. コンクリートのクリープ・乾燥収縮・温度変化の影響

最近、コンクリート利用の多様化と複雑化に伴い、コンクリートの特性と環境条件・施工条件に基づいたより合理的な設計を行なう必要性が国際的にも増大しつつある。IABSE のマドリッド・シンポジウムでは、実際の設計や施工への応用性を重視して、实在構造物の測定と観測に関する論文の発表が求められ、その結果さらに設計における理論的扱い方と実用的計算方法が討論されている。

(1) クリープ・乾燥収縮・温度変化の測定と観測

コンクリートのもっとも普通な破損形式であるひびわれにクリープ・収縮・温度変化がどのような影響を与えているかを全体的に評価し、かつ計算仮定の妥当性を調べるために实在コンクリート構造物の常時状態の観測の必要性が強調された。コンクリートの個性を環境条件との関連において正しく把握することが大切であり、たとえば大気中の温度・湿度、その時間的变化、セメントの脱水による初期内部熱の影響、疲労に影響する温度・湿度振幅の変動、直射熱の影響、収縮に対する大気中の炭酸ガスの影響、材料の真のクリープと収縮差の区別、クリープの内部応力または、たわみに対する影響などは、よりいっそう研究がなされなければならない。無筋コンクリート・RC・PC 構造物の視覚観察と変形・変位の測定による、クリープと収縮に基づく変形およびたわみとひびわれ、また大気温度による変形、構造内の熱影響等について、測定方法の改良と重要な実測資料が発表されている。

(2) 設計で考慮すべきクリープ・収縮・温度変化の影響

環境によってコンクリートの性質が変化することを考慮に入れて、その影響の理論解析や実験がより現実的に行なわれるべきことが強調されている。クリープ・収縮・温度の有害な影響を減ずるための施工方法、温度応力の影響を評価する設計式の提案、PC 柱・連続 RC 桁・PC 桁等の収縮とクリープの影響を両者、または単独に考えた変形と応力の解析等について研究論文が発表されている。

(3) 実用的な計算方法

クリープの新しい解析法の応用、内部ひずみ法によるクリープ・収縮・温度変化を考えたコンクリート構造物の設計、アーチダムにおける水圧・温度・収縮の実用計算法、構造物の中の損失計算の実際的方法、クリープと収縮による内部作用の再配分公式、き裂つに入った PC 構造物の中のクリープと収縮変形の計算等がおもな観点である。

温度・湿度の変化と分布、およびクリープから生ずる作用力について、危険な場合を考え、より十分な考慮を払うよう設計法を改良することが試みられており、たとえば、イギリスの BS 規準の 1969 年の構造用コンクリートの新しい指針では、限界状態法の考え方をを用いて、環境の温度と湿度の変化の影響とクリープに基づく破損に対して、構造物を安全に設計できるように部分安全率を定めることを規定し、かつ構造物挙動の観測による基礎資料を示して RC 構造物のたわみ制限に新しい実験公式を与えている。今後、コンクリートの常時挙動の観測と構造物の変形と変位の測定を進め、コンクリートが環境条件の変化にいかに対応してゆくかの評価に役立つよう研究が発達することが期待されている。

6. 近く国際会議で予定されているテーマ

(1) 構造一般の分野

① 構造物の強度と変形に及ぼす材料の塑性と粘性の影響、② 構造物の後座屈挙動の解析、③ 構造設計理論および方法の新しい開発を目的とした实在構造物の実験的研究と模型解析、④ 設計の自動化と最適化、⑤ 動的荷重を受ける構造物の終局強度と安全性、等である。

(2) 鋼構造物の分野

① 鋼構造の量産に関する問題——生産技術、設計の考え方および量産部材の橋梁への応用、② 異種材料ま

たは異種部材の組合せにおける相関問題, ③ 長径間屋根構造——ケーブルによる吊屋根, 空間骨組構造, シェル構造, ④ 初期不整をもつ柱材の屈座, 等である。

(3) コンクリート構造の分野

① 高架橋の設計と施工の相互関係, ② 塔構造の諸問題, ③ 3軸応力を受けるコンクリート構造物の問題, ④ コンクリート構造物の破損, 等である。

7. あとがき

ここに概要を述べた国際会議において発表された日本

の研究は高く評価されており, 1976年の日本での IA-BSE の第10回大会では, さらにすぐれた多くの会員諸氏の研究発表が行なわれることが期待されている。

参考文献

- 1) 前田幸雄: 構造物の限界状態設計法, 土木学会関西支部編・構造物設計法の最近の進歩と問題点, pp. 49~61, 1971年3月.
- 2) Basler, K.: Vollwandträger—Berechnung im Überkritischen Bereich, Schweizer Stahlbau-Vereinigung, Zürich, Juni 1969.

(1971.7.16 受付)

水理公式集 46年改版

B 5・630 ページ(予定)・予価 3600 円・
46年10月末日出版予定

読者欄

1 First International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology というのが 1971.9.20~24 Berlin で開かれる。原子炉工学における構造力学についてはじめての国際会議である。構造力学と云っているが、対象はずいぶん広い。この発表者のうち、日本人をひろい、筆頭者のみをあげると、つぎのようである。

竹内(静大工・機械), 水町(東芝・機械), 瀧美(東北大工・機械)

安藤(東大工・造船), 黒田(電発・建築), 松本(大林組・建築)

秋田(石播・造船), 久田(元建研・建築), 武藤(武藤研・建築)

津島(竹中・建築), 秋野(原子力研・建築), 佐藤(東大生研・機械)

柴田(東大生研・機械)

このうち、黒田らは、「可変ひずみ要素を用いる有限要素法による PC 圧力容器(PCVP と略称)の応力解析」を、松本らは、「PCPV の動的解析」を、津島らは、「炉を入れてある建屋の耐震設計」を講演する。これを見て、いかに、わが国の土木工学の関係者が炉工学の方面に関心がないかわかるであろう。建設業関係からは、大林組、竹中工務店から出かけている。この原因

はどこにあるであろうか。東海村の日本原発の発電所建設のときに耐震問題で立遅れたのが今日まで尾をひいているものと思われる。土木学会の原子力土木委員会は他の学会で取り扱えない立地問題、放射性廃棄物の処理が中心であろうかと思われるが、コンクリート委員会と協力して、もう少し PCPV (プレストレストコンクリート圧力容器で原子炉本体をつつむもの、従来は高張力鋼でつくっていた。最近、欧州では PC が用いられている)の研究に積極的にのり出していただきたいと思う。

(名大工・成岡昌夫)

2. 有限要素法の各分野での応用がますます盛んになっている折から、土木工学者および技術者がもっと活躍すべきはずの土木工学の分野に、機械工学や建築学の研究者が入りこんで、かなり手をつけている感じを、最近ますます強くする。土木工学だけの専門的な問題ではないかも知れないが、もっと土木技術者が手をつけ、研究や技術開発に力を入れなければならない問題、もっと強く言えば、土木技術者が先頭にたって研究を進めるべき問題が多くあるように思う。たとえば、上記の PCPV、圧密現象を含む土質力学の問題、地中埋設物の静的動的の問題などがある。

(名大工・川本眺万)