

数値解析

2021年7月 岡村 甫 記

1. 実験式の世界から数値解析の世界へ

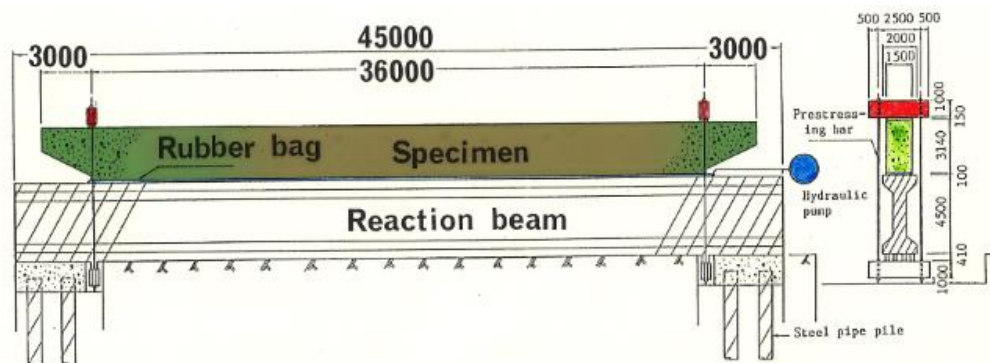
私が大学院に在学していた頃、鉄筋コンクリート部材の破壊や変形を求めるには、種々の実験式が使われていました。実験式の良い点は耐荷力や変形が簡単に求まることですが、欠点は実験式を導いた実験の範囲と異なる条件では使えないことです。

1995年1月に発生した兵庫県南部地震によって、鉄筋コンクリート橋脚が多数崩壊しました。その主な原因は、それらが造られたときに参照したせん断破壊に関する実験供試体と実在構造物の寸法が大きく異なっていることだと思います。

一般の構造物は、地震時には、曲げモーメントが支配的であり、せん断力に対しては余裕があります。そのために地震時の大きなエネルギーを、その塑性変形能力によって吸収できるはずでした。

鉄筋コンクリート部材のせん断破壊は、寸法効果が極めて大きい現象であることが地震発生後の30年程前から指摘され、20年程前にはその分野の研究者にとっては常識となっていました。実在の土木構造物は、実験に供される試験体よりもはるかに大きいために、実際のせん断耐力は、設計に用いた値の二分の一以下となっていたのです。

土木学会コンクリート標準示方書は、1980年の小改訂の際に、他の条項はほとんど変更されなかったのですが、池田尚治幹事の英断によって、コンクリートのせん断許容応力度を従来の約半分に低減しました。これを受けて、鹿島建設と清水建設が共同ではりと円板の載荷実験を行い、少なくとも高さ3mまでは寸法効果が存在することを確認し、それ以後建設する厚さが5m以上のLNG地下タンク底版の設計に採り入れました。





はり実験の様子(前川宏一提供)

すでに建設されていた底版に対しては、その安全率が1.0程度でしたので、周辺の土を凍結することによって、作用せん断を低減させていた処置を厳格に行うことによって安全を確保することとしました。しかし、高速道路や鉄道の既設構造物に対する補強は行われていませんでした。既設構造物の補強は震災後に大規模に行われました。

鉄筋コンクリートはりのせん断破壊に有限要素法による数値解析を適用したのは、1967年にACI誌上に掲載された D. Ngo と A.C. Scordelisによる論文が最初ではないでしょうか。その後、この分野の研究は活発とはいえない状況が続いていました。



日米セミナーに参加した際のSchordelis 夫妻

1973年に、文部省科学研究費補助金による特定研究「複合材料」が国分正胤を研究代表者として開始されました。その一つの課題として、複合材料の力学的挙動を統一的に記述できる解析プログラムの開発が取り上げられ、山田嘉昭の指導の下、

有限要素解析プログラム「COMPOSITE」が開発されました。このプログラムは、各材料の構成則を与えれば、それらを組み合わせた複合材料の挙動が得られるというものでした。

1974年、国分正胤が定年退官、私が35歳の年、コンクリートの世界から実験式を追放することを私の目標としました。そして、鉄筋コンクリートの挙動を統一的な方法で記述することに本格的に取り組みました。研究の開始に当たって、親友の吉田裕に相談しました。有限要素解析に造詣が深い彼の回答は、連続体の力学を対象とする方法をひび割れの発生を前提とする鉄筋コンクリートに適用するのは無理ではないかということでした。この研究課題の向こうにはゴミがある可能性が高いということです。専門家が言うのですから、賢明な研究者は真剣に取り組まないのではありませんかと私は考えました。山の向こうに宝があることに賭け、地道に長く取り組むこととしました。

この研究がある程度目途がついた頃、スイス工科大学のツールマン教授と二人だけで議論する機会がありました。この研究の成果は設計に利用できないのではないかと彼の疑問に対して、設計に直接用いるものではなく、設計されたものの安全性を照査するのに用いることも重要であると述べました。最後には納得していただきました。土木学会コンクリート示方書に照査という用語を用いるようにしたのは、この議論があったからではないでしょうか。設計と照査とを明確に区分している規格は外国ではあまり見られません。

2. コリンズコンペ

1981年デルフトで行われたIABSE主催のコロキウムにおいて、Michel Collins は、コンクリート構造の数値解析分野の発展に関わる重要な提案を行いました。トロント大学で行う鉄筋コンクリート板4体の載荷実験結果を予測するコンペの提案でした。この分野の研究に関わる多数の研究者に対する彼の挑戦です。

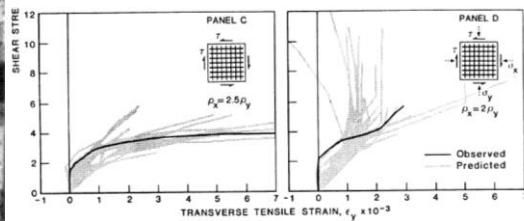
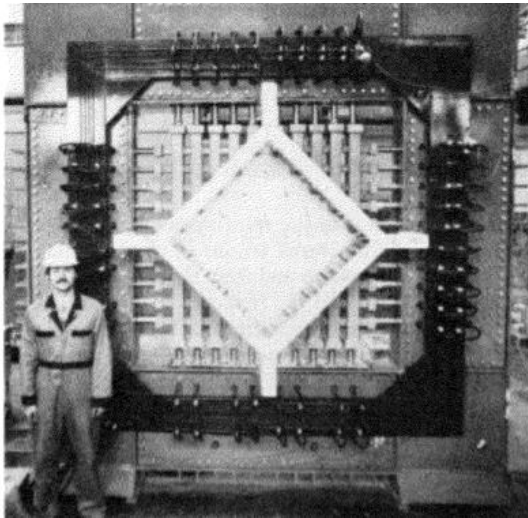


FIG. 11. Scatter in predicted transverse strains (ϵ_x).

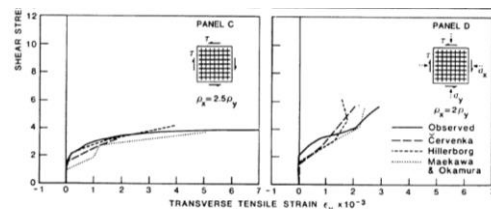


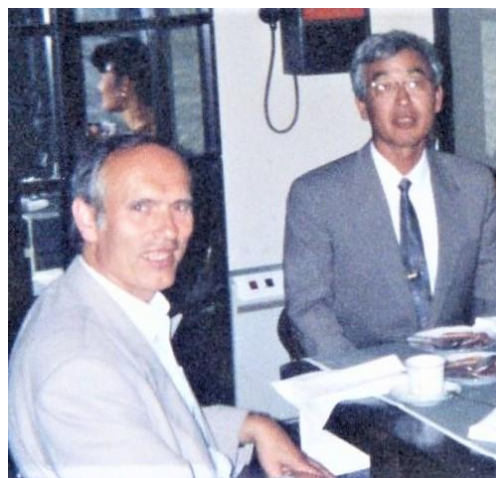
FIG. 14. Transverse strain predictions of three entries.

実験の様子と実験結果(前川宏一提供)

前川宏一と私もこのコンペに参加しました。実はこの問題は、数値解析に係わるものではなく、解析に用いる鉄筋コンクリートの構成則の精度を問うものでした。数値解析が得意な参加者の多くはみじめな結果を味わいました。正解に最も近かったのは、博士の称号を得たばかりの若者“Cervenka”でした。我々は、ひび割れ直角方向のコンクリートの引張応力を無視したために、その影響の大きい供試体についての変形を過大に見積もり、彼に次ぐ成績となりました。



1984年 カルガリにて Collins と



1993年 プラハ Cervenka 宅にて

3. 日米科学セミナー

1985年5月21日から24日にわたり、日本学術振興会とNSFの後援を受けて、東京四谷の土木学会会議室において、「鉄筋コンクリートの有限要素解析」と題する日米セミナー(代表:岡村甫とC. Meyer)が開催されました。なお、このセミナーに先立って、「鉄筋コンクリートの有限要素解析に関するコロキウム」を1984年12月に、コンクリート工学協会主催で開催しました。

以下は、岡村 甫・前川宏一・井上範夫著「鉄筋コンクリートの有限要素解析に関する講演会および日米セミナーの報告」、コンクリート工学、1986. 2 を参考にして記したものです。

日米セミナーは日米からそれぞれ10数名ずつの参加者から構成され、一般の聴講は原則として認められていない。ただし、両国以外から、著名な研究者4名の自費参加が認められた。少人数の参加者が膝を突き合わせて密度の濃い議論が展開できるように配慮されたのである。そこで一般の技術者にもセミナーの内容を広く知ってもらうために、セミナーに先立ち、米国側参加者による講演会を開催した。発表された内容が講演者のごく最近行っている研究を中心に構成されており、ここで初めて公表された内容も多く含まれていた。

以下に講演者とタイトルを示す。

- (1) **W. C. Schnobrich:** The role of finite element analysis of reinforced concrete structures for the structural engineer.
- (2) **W.F. Chen:** On constitutive modeling of concrete materials.
- (3) **Z.P. Bazant:** Fracture mechanics and strain-softening of concrete.
- (4) **A.R. Ingraffea:** Analysis of “shear fracture” tests of concrete beams.
- (5) **D. Darwin:** Crack propagation in concrete – study of model parameters.
- (6) **J. Isenberg:** Finite element analysis of reinforced concrete under shock loading.
- (7) **C. Meyer:** Modeling large inelastic cyclic response of concrete.
- (8) **K.J. Willam:** Experimental, constitutive and computational aspects of concrete failure.
- (9) **W. Gerstle:** Invariant formulation of constitutive relations for concrete.
- (10) **R.H. Iding:** Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete in engineering practice.
- (11) **A.C. Scordelis:** Past, present and future developments.

日本側参加者の報告は先のコロキウムで、すでに発表されていたので、ここでは発表しないこととした。この講演会には日本側のセミナー参加者も聴講し、これをもって日米セミナーの米国側参加者の発表に代え、セミナー当日は日本側の参加者からの発表に限った。この方法によって、ス

スケジュールに余裕ができ、議論に十分な時間をかけることができた。セミナーにおける討議は12セッションに分けて行った。セッションごとに日本側参加者が20分の基調発表を行い、その後それに関連する米国側の講演と併せて、質疑応答と討論を行った。なお、日本側参加者と第三国からの参加者の発表もここで行われた。

以下に基調発表者と各発表者の名前を記す。

1. 現状: 井上範夫・白井伸明・塩屋俊幸、W.C. Schnobrich
2. 材料モデル: 前川宏一・田辺忠顕・野村設郎, O. Buyukozturk (Chen, Bazant, Gerstle)
3. 付着: 森田司郎・二羽淳一郎、G. Mehlhorn
4. せん断伝達: 青柳征夫・田辺忠顕・樺 龍哉
5. 温度応力: 田辺忠顕、Z.P. Bazant
6. 数値解析: 山田嘉昭・山崎淳・上田真稔
7. 動的問題: 野口博・井上範夫・外村憲太郎
8. モデルの評価: 岡村 甫・狩野芳一、J. Blaauwendread
9. 設計: 池田尚治・大内一、H.A. Mang
10. 将来展望: 青山博之



開会初日の集合写真(土木学会)



土木研究所と建築研究所見学

この原稿を書くに当たって、本セミナーに参加した方々の 'finite element analysis' に関連した論文を "Google Scholar" で調査しました。参加者がどのような研究をされていたか、また、研究者同士の関係を知りたいと思ったからです。その結果、米国の代表者 C. Meyer がなぜこのような研究者たちを招集できたかの謎が解けました。彼は、A.C. Scordelis の弟子であったのです。このセミナー後も、この分野の研究を続けたのは、W.C. Schnobrich, W. H. Gerstle, A.R. Ingraffea の3名であることも判明しました。

W.C. Schnobrich

1969: A finite element analysis of eccentrically stiffened circular cylindrical shells, with P.C. Kohnke

1970: Finite element analysis of translational shells, with T.C. Chu

1972: A layered finite element nonlinear analysis of reinforced concrete plate and shells, with F.R. Hand Jr. and D.A. Pecknold

1972: Finite element approach for the prediction of inelastic behavior of shear wall frame systems, with O. Yusugullu

1973: Use of nonconforming models in finite element analysis of plates and shells, with C. Choi

1973: Finite element analysis of intersecting cylinders, with S.A. Bakhrebah

1973: Finite element analysis of reinforced concrete, with M. Suidan

1973: Nonlinear layered analysis of RC plates and shells, with F.R. Hand, D.A. Pecknold
1974: Nonlinear response of framed structures to two-dimensional earthquake motion, P. Padilla-Mora
1975: Nonconforming finite element analysis of shells, with C.K. Choi
1976: Nonlinear analysis of intersecting cylinders by the finite element method, with H.C. Chen
1977: Behavior of reinforced concrete structures predicted by the finite element method, with himself
1979: Nonlinear analysis of coupled wall system, with T. Takayanagi
1986: Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete under short term monotonic loading, F. Barzegar-Jamshidi
1988: Nonlinear analysis of plane stress state reinforced concrete under short term monotonic loading, with F. Barzegar-Jamshidi
1990: Nonlinear analysis of cracked reinforced concrete, with H.T. Hu

W.F. Chen

1975: Constitutive relations for concrete, with A.C.T. Chen

Z.P. Bazant:

1979: Surface singularity and crack propagation, with L.F. Estenssoro
1978: Endochronic model for nonlinear triaxial behavior of concrete, with C.L. Shieh
1980: Effect of finite element choice in blunt crack band analysis, with L. Cedolin
1980: Total strain theory and path-dependence of concrete, with T. Tsubaki

C. Meyer:

1982: Nonlinear analysis of RC structures in practice, with K.J. Bathe
1987: Analytical modeling of hysteretic behavior of RC frames, with M.S.L. Roufaei

K.J. Willam:

1974: Recent developments in the finite element analysis of prestressed concrete reactor vessels, with J.H. Argyris
1979: Numerical solution of transient nonlinear problems, with J.H. Argyris, J.S. Doltsinis, W.C. Knudson
1985: Finite element and localized failure, with S. Sture

W. H. Gerstle:

- 1987 Finite and boundary element modelling of cack propagation in two-and three dimensions using interactive computer graphics, with himself
- 1990 Finite element meshing criteria for crack problems, with J.E. Abdalla
- 1992: FEM modeling of fictious crack propagation in concrete, with M. Xie
- 1995: Energy-based cohesive crack propagation modeling, with M.Xie
- 1995: Energy-based automatic mixed-mode crack-propagation modeling, with M. Xie, P. Rahulkumar

W. H. Gerstle and A.R. Ingraffea:

- 1985: Non-linear fracture models for discrete crack propagation, with themselves
- 1985 Non-linear fracture models for discrete crack propagation, with themselves
- 1987 Finite and boundary element modeling crack propagation in two and three dimensions, with L.F. Martha
- 1988 Three-dimensional fatigue propagation analysis using the boundary element method, with themselves

A.R. Ingraffea:

- 1980: Finite element models for rock fracture mechanics, with F.E. Heuze
- 1985: Numerical modeling of discrete crack propagation in reinforced and plain concrete, with V. Saouma
- 1987: Finite-element analysis of the pullout test using a nonlinear discrete cracking approach, with N.J. Carino, W.C. Stone
- 1987: Interactive finite element analysis of fracture processes: an integrated approach, with P.A. Wawrzynet
- 1988: Modeling mixed-mode dynamic crack propagation using finite elements: theory and applicatioons, with D.V. Swenson
- 1989: An interactive approach to local remeshing around a propagating crack, with P.A. Wawrzynek
- 1990: A numerical procedure for simulation of hydraulically-driven faracture propagation in poroelastic media, with T.J. Boone
- 1995: Topology-controlled modeling of linear and nonlinear 3D crack propagation in geomaterials, with Bjarne
- 1996: Quasi-automatic simulation of crack propagation for 2D LEFM problems, with T.N. Bittencourt

David Darwin:

- 1974: Inelastic model for cyclic biaxial loading of reinforced concrete, with D.A. Pecknols
- 1976: Analysis of RC shear panels under cyclic loading, with D.A. Pecknols
- 1977: Nonlinear biaxial stress–strain law for concrete, with D.A. Pecknols
- 1977: Analysis of cyclic loading of plane RC structures, with D.A. Pecknols
- 1978: Nonlinear model for reinforced concrete slabs, with F.K. Bashur

R.H. Iding

- 1974: Identification of nonlinear elastic solids by a finite element method, with K.S. Pister, R.L. Taylor
- 1978: Non–SAP, finite element calculation for nonlinear static and dynamic analysis of complex structures, with K.J. Bathe, E.L. Wilson
- 1988: Prediction of shear failure in concrete structures using nonlinear finite element analysis, with B. Bresler, S.P. Dawson
- 1994: Nonlinear finite element analysis of deteriorated RC slab bridge, C. Van der Veen

A.C. Scordelis:

- 1967 Finite element analysis of reinforced concrete beams, with D. Ngo
- 1970: Computer program for prismatic folded plates with plate and beam elements, with **C. Meyer**
- 1974: Finite element study of reinforced concrete beams with diagonal tension cracks, with D. Ngo
- 1974 Finite element study of reinforced concrete beams with diagonal tension cracks, with D. Ngo, H.A. Franklin
- 1975 Nonlinear analysis of RC shells of general form, with C.S. Lin
- 1975 Finite element study of a reinforced concrete cylindrical shell through elastic, cracking, and ultimate ranges, with C.S. Lin
- 1980 Nonlinear analysis of prestressed concrete frame, with Y.J. Kang
- 1987: Nonlinear analysis of reinforced concrete shells, with E.C. Chan

O. Buyukozturk

- 1977 Nonlinear analysis of reinforced concrete structures, with himself
- 1978: Nonlinear dynamic response of reinforced concrete under impulsive loading research status and needs, with J.J. Connor

1979: Analysis of shear transfer in reinforced concrete with application to containment wall specimens, with P. Leombruni, J.J. Connor

1979 Shear transfer model for reinforced concrete, M.N. Fardis

1980 Shear stiffness of concrete by finite elements, with M.N. Fardis

1980 Research on modeling shear transfer in reinforced concrete nuclear structures, with J.J. Connor, P. Leombruni

1980 Erratum for shear stiffness of concrete by finite elements, with M.N. Fardis

4. ひずみ軟化領域での解の唯一性

日米セミナーで提起された問題の一つが“ひずみ軟化領域における解の唯一性”でした。テキサス大学において数値解析を行って以来私もこの問題に悩まされてきました。私が到達した結論は、実際の現象が不安定であれば、数値解析においても不安定であるということです。

圧縮応力を受けるコンクリートは、最大応力に達したのちに、ひずみ軟化領域に入りますが、その際のひずみと応力との関係は載荷の方法によって異なることが明らかにされています。

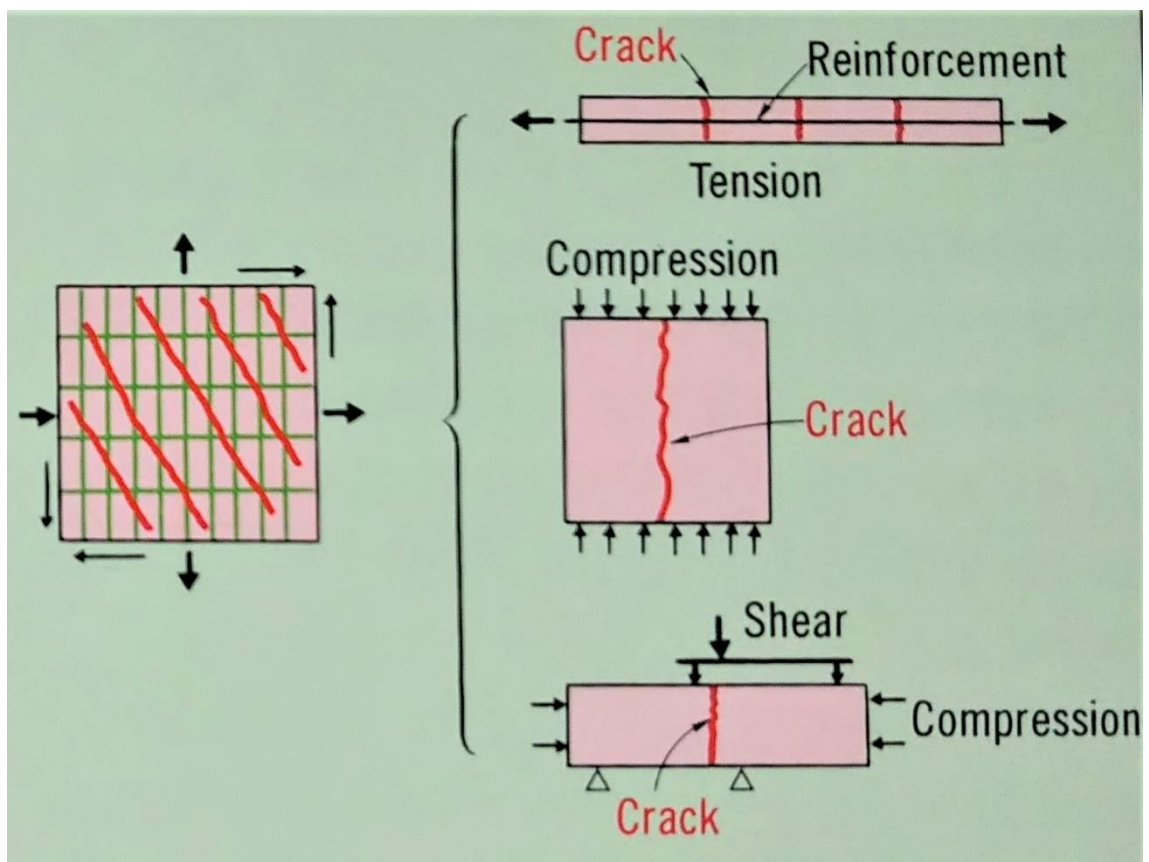
5. 鉄筋コンクリートに関する構成則

コリンズコンペによって、数値解析による結果が思わしくない原因の一つが、コンクリート、特に鉄筋コンクリートに関する構成則にあるということが明らかになりました。コンクリートの構成則と鉄筋の構成則とを単純に組み合わせても、鉄筋コンクリートの構成則にはならないことが私たちには明確になったのです。

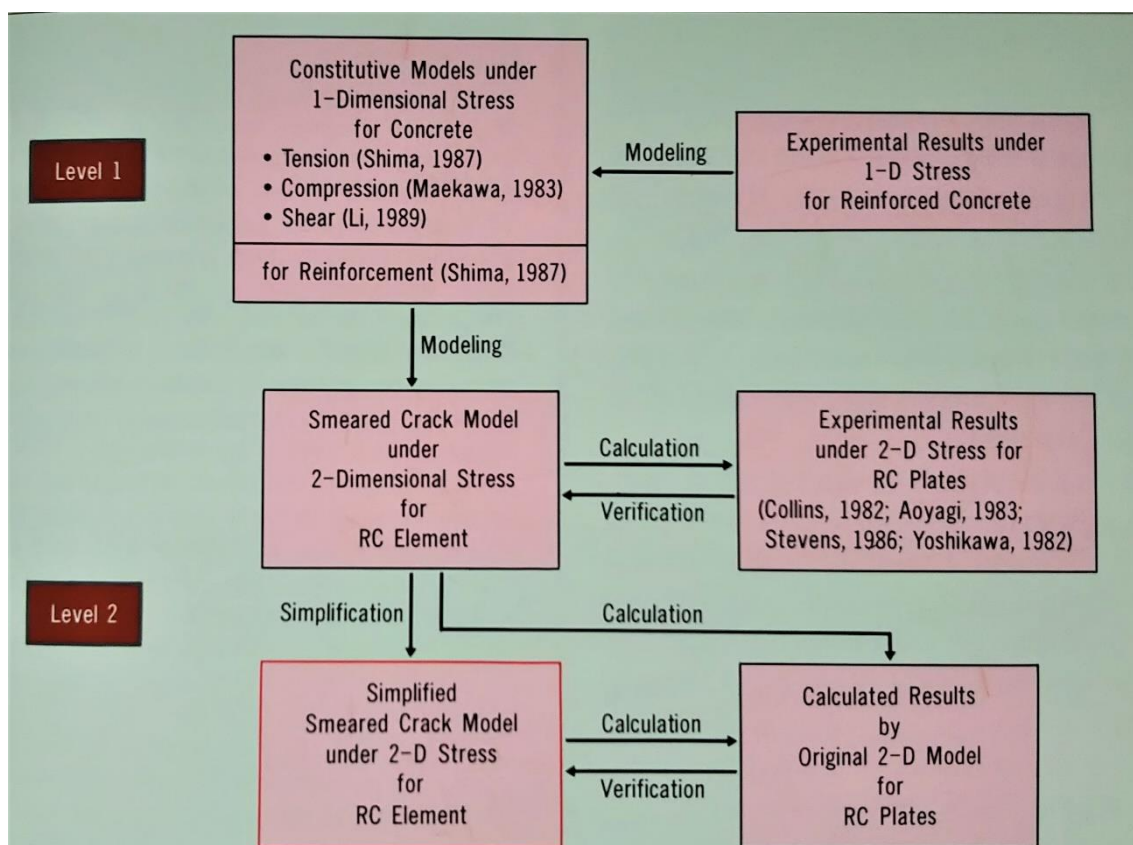
そこで、数値解析に用いる構成則の出発点をコンクリートと鉄筋ではなく、これら二つの材料を組み合わせることができる鉄筋コンクリートの一次元モデルとすることとしました。このことを明確に意識した研究者は当時多くはありませんでした。

もう一つの試みは、除荷と再載荷とを含む正負交番载荷を受ける場合に適用できることでした。このことが鉄筋コンクリート構成則の理解を深めるのに有効でした。構成則段階で、常に正負交番载荷を対象としている研究者はいませんでした。

私たちは、一軸応力下におけるコンクリートや鉄筋の構成則を、単体としての実験結果ではなく、鉄筋コンクリートとしての実験結果に基づいて、作成しました。そして、このモデルを数値解析に用いる構成則の出発点とし、この一次元モデルを組み合わせて、二次元モデル、すなわち、板要素モデルを作成しました。

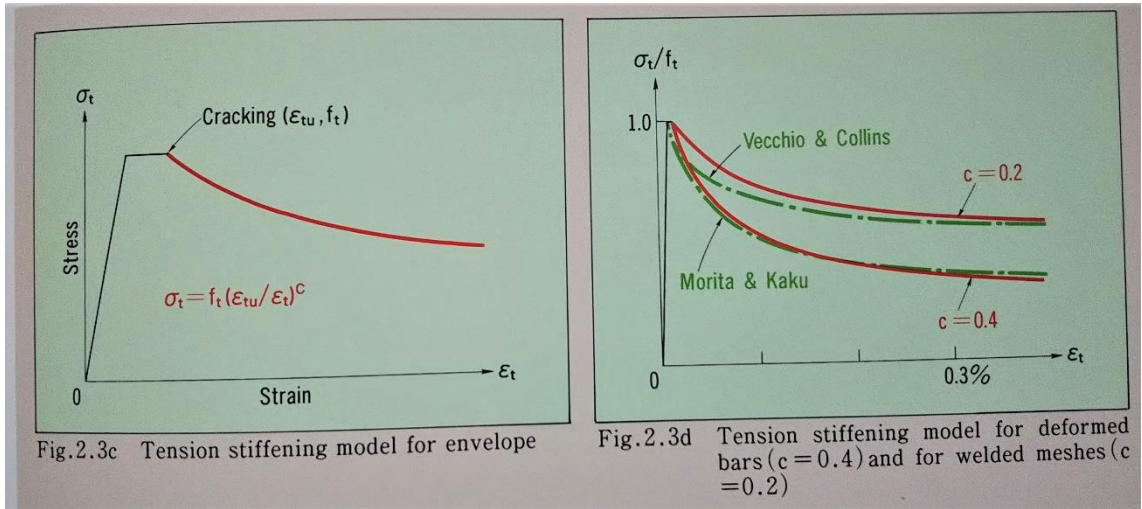


この分散ひび割れモデルでは、構成則は要素内の平均応力と平均ひずみとの関係で与えられます。このモデルの妥当性を、一様応力下にある既往のRCパネルの実験結果によって検証しました (Collins, M.P. and Vecchio, F.J. : The Response of Reinforced Concrete to In-plane Shear and Normal Stresses, University of Toronto, 1982; Aoyagi, Y. and Yamada, K: Strength and Deformation Characteristics of Reinforced Concrete Shell Elements Subjected to In-plane Forces, Proc. of JSCE, No.331, 1983;)。数値解析の精度と適用性は、このレベルにおけるモデルの精度に大きく依存しており、このレベルでの検証は極めて大切だからです。



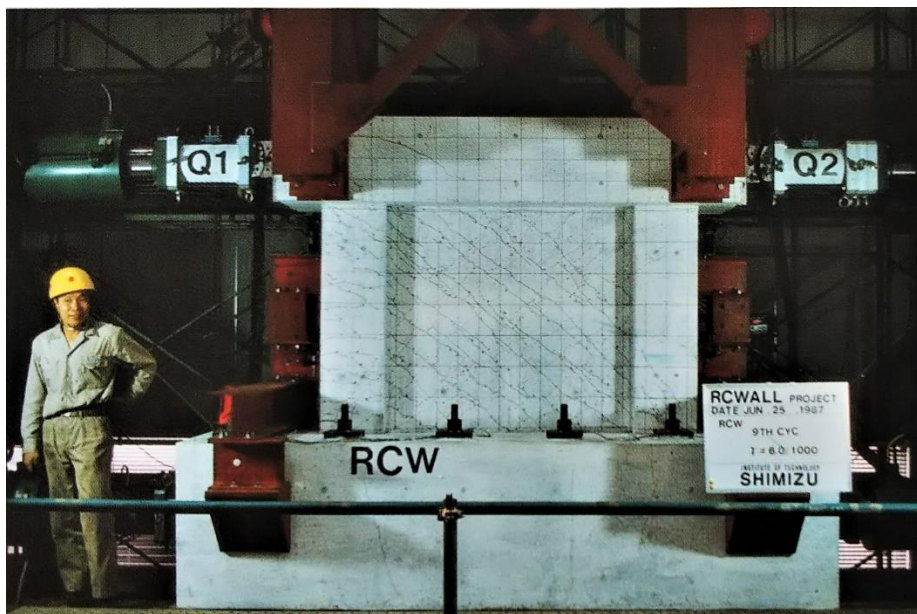
しかし、このモデルは、力学挙動を忠実にモデル化したものであるために、そのままの形で有限要素解析に用いるのは不便でした。そこで、このモデルを用いて、数多くの解析を行い、精度の良い簡単な分散ひび割れモデルを開発しました。このモデルは、このレベルの実験によって検証されたものであるのは言うまでもありません。この板要素モデルを組合せれば、はりや壁などの部材の解析ができることになります。

トロント大学で行われた板の実験 (M.P. Collins and F. Vecchio, 1982) を解析している時に、全ての供試体について引張剛性が幾分高いことに気がきました。実験供試体に網鉄筋が用いられていることに気が付き、ホッとしました。通常の異形鉄筋よりも付着力が大きくなっているのがその原因でした。



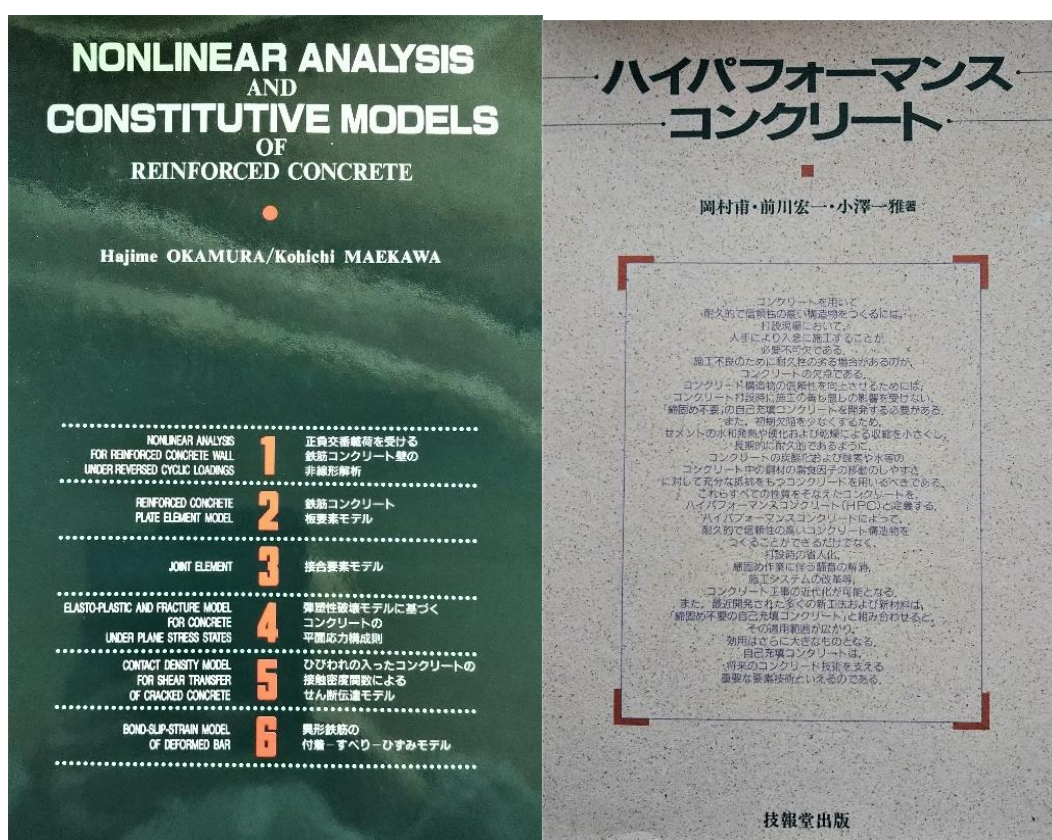
板要素に正負交番載荷する解析をしている時に、奇妙な現象に気付きました。二回目の載荷時には、実験と同様に、一回目の最大荷重に到達しないのです。すべての構成則は、載荷・除荷の繰り返しのによって、変化しないモデルだからです。それにも拘らず、このようなことが起こるのが不思議でした。私が到達した結論は、損傷が起こらなくとも正負交番載荷を行えば、あたかも損傷を起こしたような挙動を示す可能性があるということでした。このことは、後に確かめられました。

最終の検証のための実験を、清水建設研究所の塩屋さんにお願ひしました。清水建設が当時開発していたガラス繊維強化プラスチックを補強筋に用いる実験をも行うという名目でした。実験開始前に、荷重変位曲線の予測図を示しておき、実験中にその値を記入する方法を採った初めての実験でした。実験結果は予測と一致し、この数値計算法の検証は終わりました。



1985年に前川宏一が長岡技術科学大学から東京大学に戻った頃から急に展望が開け、1988年には正負交番載荷を受ける鉄筋コンクリート要素の2次元挙動を精度良く追える構成則を導き、それらを壁に適用することができました。

1990年に、私たちの研究成果を「鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則」と題して、前川宏一との共著で、技報堂出版に出版していただきました。出版に当たって、図面をカラー化すること、英文と和文の二か国語とすることを条件としました。当然経費が多く、売れることは期待できません。大部分は、私たちが購入すること、売れることが期待できる「ハイパフォーマンスコンクリート」を出版することを約束し、納得していただきました。



この本の序文を以下に引用します。

文部省科学研究費補助金の特定研究「複合材料」が恩師國分正胤先生を代表者として1974年から開始され3年間続いた。その一つの大きな課題として、複合材料の力学的挙動を統一的に記述できる解析プログラムの開発が、山田嘉昭先生の指導の下で行われ、その成果は有限要素解析プログラム「COMPOSITE」として結実した。「COMPOSITE」は、各材料の構成則を与えれば、それらを組合わせて用いた構造物の挙動を解析できるプログラムであって、材料の構成則の開発が各研究者の役割であった。幹事として、その開発作業に参加したのがこの本を書く端緒となった研究の始まりである。私自身は、鉄筋コンクリートの力学挙動を統一的に記述できる解

析プログラムの開発を目指したのである。

最初は、「COMPOSITE」に、コンクリートと鋼の構成則を与え、鉄筋表面の凹凸とコンクリートの微小ひび割れの発生を考慮に入れて、異形鉄筋とコンクリートとの付着応力分布を求めようとした。この研究は、梅原秀哲の卒業論文として行われたが、はかばかしい成果を得られなかった(1977年)。現時点においても難しい問題である。

次に、せん断補強鉄筋をもたない鉄筋コンクリートばりのせん断問題に適用することを試みた。この研究は、山崎淳の指導の下に、野村卓史の修士論文として行われ、その成果は野村によって、コペンハーゲンで行われたIABSEコロキウムで発表された(1979年)。この研究を通して、多くのことを学ぶことができたが、この問題は、ひび割れの発生、進展および鉄筋とコンクリートとの付着特性が重要な問題であって、有限要素解析にとって最も不得意な分野であることを痛感した。

この問題の延長として、デュープ・ビームの耐荷力算定を試みた。この研究は、二羽淳一郎の修士論文として行われたが、その一部すなわち、圧縮—引張の二軸応力下におけるコンクリート構成則の改良は前川宏一の卒業論文として行ったものである。この成果は、二人によって、デルフトで行われたIABSEコロキウムで発表され、好評を博した(1981年)。なお、この解析は、非線形プログラム研究会(國分正胤会長、山田嘉昭代表幹事)が開発した「FEMN」を用いて、卒業生の石川浩、井上晋一により行われた。この研究を通して、離散化ひび割れの進展の問題、多軸応力下におけるコンクリートの構成則、コンクリートの圧縮軟化域における解析上の問題など多くの問題点が明らかになると共に、コンクリート構造の挙動を解明するために必要な研究課題が明確になったのである。このことが、鉄筋コンクリートの有限要素解析を試みた最大の収穫であった。

デュープ・ビームの耐荷力については、二羽淳一郎の学位論文として、有限要素解析による力の流れに基づく精度の良い算定式が導かれた(1983年)。この論文は、有限要素解析とマクロな設計用の算定式とを、結びけるアプローチを示す好例であって、設計に使いやすい形にして、土木学会示方書に採用された。

この解析には、「FEMN」を基礎として、前川宏一が開発した鉄筋コンクリート用有限要素解析プログラム「COMM2」を用いている。このプログラムに用いた2次元下のコンクリート構成則は、前川が新たに開発した「弾塑性破壊モデル」(1983年)である。なお、ひび割れ平行方向のコンクリート圧縮強度を一律80%とし、ひび割れ発生後のコンクリート引張剛性は考慮していない。そして、ひび割れ面におけるせん断剛性は山田・青柳モデル(1983年)を用いている。これらの構成則を用いて、コリンズコンペに参加した。

これを契機として、ひび割れ発生後のコンクリート構成則の研究を本格的に開始した。ひび割れ直角方向の鉄筋コンクリートの剛性を、鉄筋およびコンクリートそれぞれの平均応力—平均ひずみの関係を重ね合わせることによって、鉄筋の降伏後まで、また、除荷・再載荷を含む正負交番載荷に適用可能な形で、定式化できた。この研究は、玉井真一の修士論文(1987年)、島弘の博士論文(1987年)および出雲淳一の博士論文の一部をなしている。ひび割れと平行方向

のコンクリート構成則については、川上泰司の卒業論文(1986年)および宮原長久の修士論文(1987年)によって、前川の弾塑性破壊モデルの破壊パラメータの修正という形で定式された。一方、ひび割れ面でのせん断伝達は、李宝祿の博士論文(1988年)で「接触密度関数に基づくせん断伝達モデル」として定式化された。

我々が開発したこれら構成則を組み込んで、正負交番の面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデルが開発され、検証されたのである。この研究は、出雲淳一によって、博士論文に纏められている(1988年)。

鉄筋とコンクリートとの付着に関する構成則は、周礼良(1984年)と山尾芳秀(1985年)の博士論文にまとめられた研究成果を発展させて、島弘がいかなる境界条件においても、また鉄筋降伏後においても、適応可能な「付着—すべり—ひずみモデル」として、きれいな形に定式化できた。

このモデルとせん断伝達モデルおよびコンクリートの圧縮モデルを組み合わせ、部材接合部の局所変形を表現するための接合要素を、申鉉穆が開発した。申は、この接合要素と鉄筋コンクリート板要素とを組み合わせ、正負交番載荷を受ける鉄筋コンクリート壁の挙動を解析するプログラム「WCOMR」を作成した。この研究は、申の博士論文(1988年)として、各構成則の開発と並行して行われたが、これによって有限要素解析に必要な各種構成則の開発が有効に行われたのである。

次いで、前川宏一による序文を引用する。

1978年春、山崎淳先生による鉄筋コンクリートの講義に触発され、また、恩師岡村甫先生の元でコンクリートに関する勉学を始めたのが、1979年夏のことである。以来、今日に至るまで、主にコンクリート工学に関する研究教育に携わってきたことになる。光陰矢のごとし、が現在の偽らざる実感である。この10年間、「鉄筋コンクリートのあらゆる挙動を解析的に予見しうる技術を確立する」という、大きな旗印と目標を岡村先生より与えられ、研究活動を今日まで継続できたことは無上の喜びであり、若干なりともこの目標に貢献できたことは、私の誇りでもある。

本書で取り上げられた構成則の開発において常に注意が払われた点の一つは、材料挙動の経路依存性とその合理的な表現にあったといえる。任意の荷重履歴を対象とする上で、経路依存性は不可欠な要素であり、モデルの精度のみならず、同時に種々の数理上の配慮を払う必要がある。開発の過程で、何度となく組み立てた構成則もこの条件を満たさないがために、俎上に上っては消えていった。幾つかの構成モデルが、恩師の容赦ない一言「詳細はさておき、このモデルはともかく美しくない」で、即刻、ごみ箱行きになったことは、今日でも鮮明に思い出される。しかし、あらゆる状況に対しても適用できる概念とモデルの模索が、有意義な実験に繋がり、真に現象の理解を深めるべく、研究を方向付ける結果となった。私の力量不足ゆえ、多くの無駄と回り道を繰り返し、本書に係わった多くの共同研究者にも迷惑を掛けた。今もって、多くの問題が未解決のままである。しかし、この間に受けた恩師の助言とその研究姿勢、また先輩同僚諸氏との議論を通じて、実験・解析両者の意義とそれに基づく研究の方法論を、自分ながら模索する機会を得たことは、最大の収穫であった。

この間、コンクリート工学協会のせん断および有限要素解析に関する委員会に参加する機会を得、当該分野の先駆者である野口博先生他、多くの委員の方々から触発された。当該研究の初期段階において、1981年のデルフトコロキウムで、先輩の二羽淳一郎先生と共に発表の機会を得た。ホテルの一室で缶詰になって発表の準備に追われたのが思い出深い。1985年に開催された鉄筋コンクリートの有限要素解析に関する日米セミナーでは、井上範夫博士と共に幹事を仰せつかり、貴重な経験を積む機会を得た。また、非線形解析研究会に参加して、有限要素プログラミング手法に関して桜井達美氏から、鉄筋コンクリート構造解析に関して、塩屋俊幸氏、大内一氏、上田稔真氏ら多くの先輩諸氏から受けたご指導と議論は、大変意義深く、少なからず、私の今日に影響を与えている。また、大学院修了後、長岡技術科学大学で過ごした3年間は、丸山久一先生のもとで研究教育に携わる一人として出発し、また、本書の内容が軌道に乗りかけた時期であり、思い出深いものがある。紙面を借りて、先輩同僚諸氏にお礼申し上げる次第である。

6. 寸法効果を表現できているか？

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震発生1週間後に、土木学会第二次調査団の一員として、現地に入りました。調査は、被害を受けた構造物だけではなく、被害を受けなかったものにも着目して行いました。

阪神高速神戸線では、単柱式の円形橋脚が最も一般的でした。

- (1) 橋脚の下部付近に、橋脚直角方向に水平ひび割れが発生したものの、
- (2) さらに進んで鉄筋の降伏が認められたもの、
- (3) 2段配筋の内側鉄筋の段落とし位置において軸方向鉄筋が引張り降伏して伸び出し、橋脚が逆方向に変位した時にそれらの鉄筋が圧縮力を受けて座屈し、かぶりコンクリートを剥落させると共に、定着が不十分な帯鉄筋がばらばらになったもの、

がいずれも数多く認められましたが、ほとんど被害が認められないものも存在していました。しかし、崩壊した例は見受けられませんでした。この形式は、比較的細長比が大きく、曲げ抵抗に比してせん断抵抗が大きいため、曲げ降伏をした後に相当大きな変形を生じて、崩壊には至らなかったものと思われる。



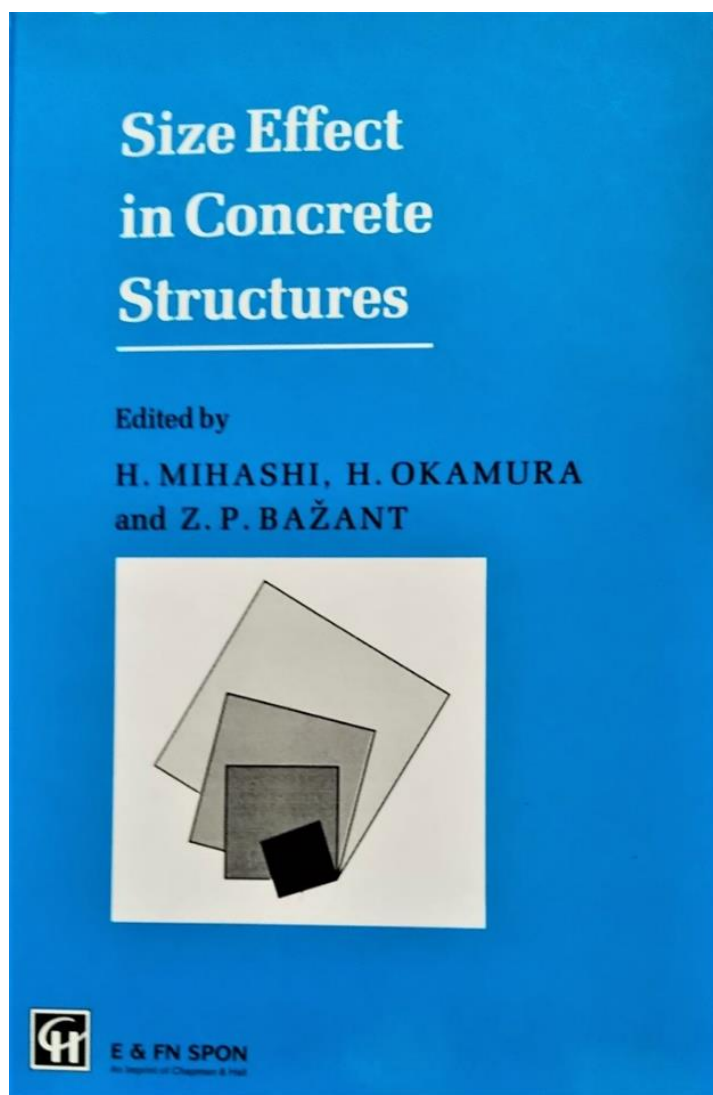
ピルツ橋脚は上部構造と一体となった構造で、全部で17脚が連続して配置されていましたが、全て橋脚直角方向北側に倒壊していました。すべてが崩壊している場合には、観察によって倒壊過程を明らかにするのは難しいので、1990年には開発できていたプログラムを用いて応答解析を行いました。その結果、単柱式橋脚と同様の過程で倒壊に至ったと推定されました。

しかし、ここで私には疑問が浮かんできました。我々が開発したプログラムは寸法効果を表すことができるか？ということです。同じメッシュを用いると同じ結果が出るのではないかという疑問です。ところが、前川宏一は寸法効果を表せるというのです。メッシュの大きさが異なるとひび割れ進展に要するエネルギーが異なるからだというのです。私の理解を越えていました。

そこで、清水建設研究所で行われた「はりの寸法効果を表す有名な実験」(井畔瑞

人、塩屋俊幸、野尻陽一、秋山暉著：等分布荷重下における大型鉄筋コンクリートはりの実験的研究、土木学会論文集、第348号/V—1, 1984.8)を解析して、寸法効果が表れることを私に示して欲しいと頼みました。その結果、確かに寸法によって解析結果が異なることが示されました。しかし、寸法効果は実験の半分程度でした。

この問題に安雪暉が取組み、見事に解決してくれました(X.An, K.Maekawa and H.Okamura, “Numerical Simulation of Size Effect in Shear Strength of RC beams”, J. Materials, Concrete Struct., Pavements, 1997.05”)。せん断破壊実験に供したはり試験体は、腹部が無筋状態であり、鉄筋コンクリートとしての条件を満たしていないことに気づき、それを解析に採り入れたのです。この結果は、私が持っている多くの知識に一致していました。鉄筋コンクリート壁のせん断強度は、ほとんど寸法の影響を受けません。縦横に鉄筋が配置されているからです。コリズが実験した板も同様です。スターラップが配置されたはりも同じではないでしょうか。



寸法効果に関して、1993年東北大学で行われた “International Workshop on Size Effect in Concrete Structures” が思い出深い。

このワークショップのAdvisory Committee メンバーは、Z.P. Bazant, V. Cervenka, M. Elices, J.K. Kim, S. Morita, H. Okamura, Y. Ozaka, G. Pijaudier-Cabot, J.G. Rots, V.E Saouma, J.C. Walraven とこの分野の有力な研究者を網羅している。彼らの参加によって、この分野のエポックメイキングなワークショップとなりました。

Principal Lecture は “Reinforced concrete design and size effect in structural non-linearity” と題して前川宏一が行い、以下の項目について38編の発表がありました。

- 1) Experimental Aspects and Mechanism of Size Effects : 11編
- 2) Theoretical Model and Analysis of Size Effect : 10編
- 3) Numerical Analysis of Size Effect : 5編
- 4) Code and Design : 6編
- 5) Summary of the Workshop on Size Effect in Concrete Structures : 6編

仙台からの帰りの列車の中で、J.C. Walraven とV. Cervenka に自己充填コンクリートについて話したところ、大変興味を持たれ、時間の経つのを忘れて説明しました。ところで、特許はどうなってるかとの質問を受けたことが今でも印象に残っています。

7. 地下構造物の解析

兵庫県南部地震によって、大開駅など地下構造物が無残に壊れたことは多くの研究者にショックを与えました。土木学会第一次調査団の委員は、鉛直振動による影響ではないかとの見解を述べており、新聞にも掲載されていました。大開駅は天井を支えている中央の柱が倒壊し、柱の上にある天井が1メートルほど下がっていました。構内の4隅を見ると、隅角部内側の鉄筋が降伏していることが確認できました。このことは、水平方向の地震波による通常の地震の結果である証拠です。柱はせん断破壊した後、上部荷重を支えきれなくなって、崩壊したと判断できました。

この時期に、3方向の地震波を入力すれば、鉄筋コンクリート部材の地震時の時刻歴応答が精度良く出力できるようになっていました(A. Shawky & K. Maekawa, "Computational Approach to Path-dependent Nonlinear RC/Soil Interaction", J. Materials, Concrete Struct., Pavements, 1996.02")。

そこで、前川宏一に電話し、至急解析するよう頼みました。解析結果は予想通りでした(X.An & K.Maekawa, "Failure Analysis of Underground RC Frame Subjected to Seismic Actions", J. Materials, Concrete Struct., Pavements, 1997.08")。このプログラムの開発に当たっては、次項8. に述べる実験結果を検証に用いています。

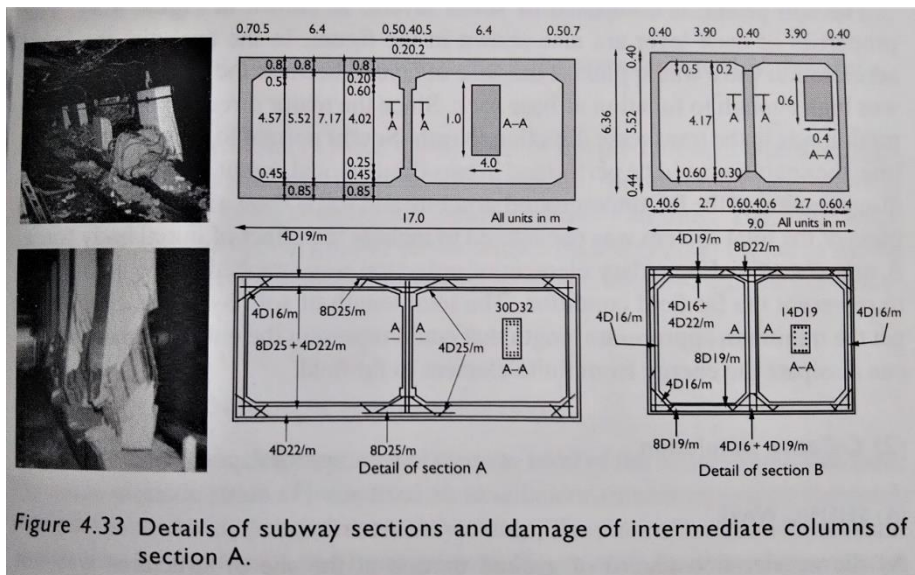


Figure 4.33 Details of subway sections and damage of intermediate columns of section A.

地下構造物の地震による安全照査ができるプログラムは、この時点では他にありませんでした。地震後に土木構造物の地震に対する安全性を評価する際に、このプログラムが活用されることになりました。

8. 土が地中にあるコンクリート構造物を壊せるか？

原子力発電所に配置される“非常用取水設備”は、地震時に、取水口から必要量の取水ができ、取水路、ポンプ室、海水管支持機能を維持できること、および、地震後原子炉が完全に停止した場合に、安全停止状態を維持する機能をもつ必要があります。

海水管ダクト、取水ピット等は、地中に全部あるいは一部が埋設されているので、地中コンクリート構造物としての設計手法の体系化が求められていました。そこで、全電力会社の共同研究として、土木学会に検討部会を設け、1987年から4年間にわたって検討しました(岡村 甫・青柳征夫・片平冬樹:原子力関連施設とコンクリート、コンクリート工学、1989.04)。

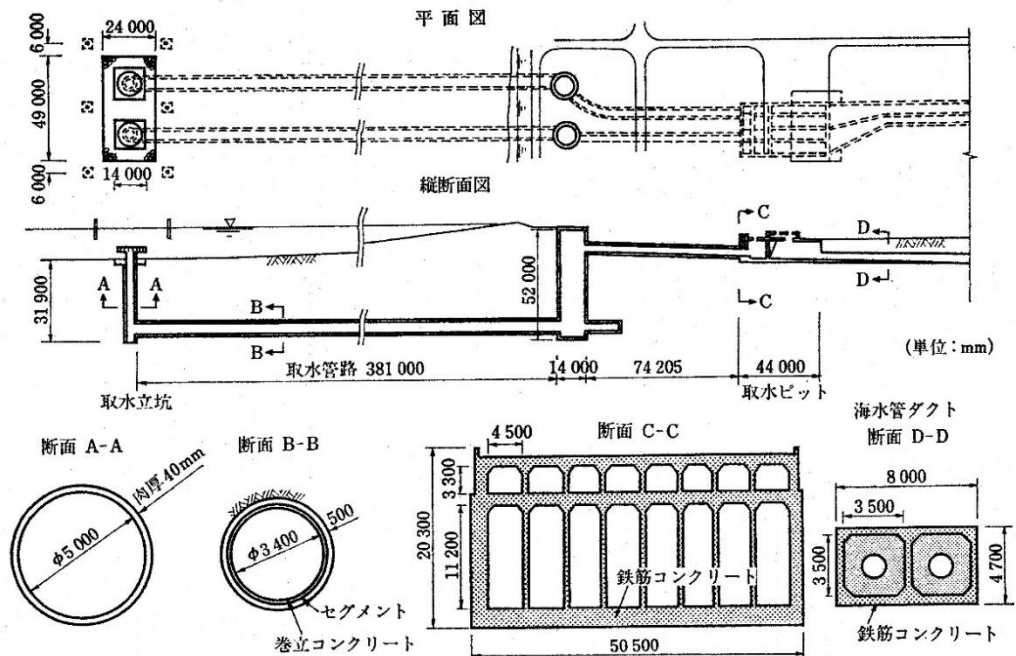


図-1 非常用取水設備の概念図(例)

この研究の一環として、電力中央研究所において、土槽中に鉄筋コンクリート製のダクトモデルを置き、土槽に正負交番载荷するという画期的な実験が行われました(遠藤達巳、青柳征夫、片平冬樹:鉄筋コンクリート製地中構造物への限界状態設計法の適用に関する実験 - 地盤と構造物との非線形連成実験とその解析 - 地震工学発表会講演概要、1991)。当時土質関係の部会メンバーの多くは何故かこの実験を行うことに反対でしたが、コンクリート関係の部会メンバー全員がこの実験を行うことに賛意を表しました。地中コンクリート構造物が土から作用する力で壊れるかどうかに対する疑問についての一つの解が得られると期待したからです。

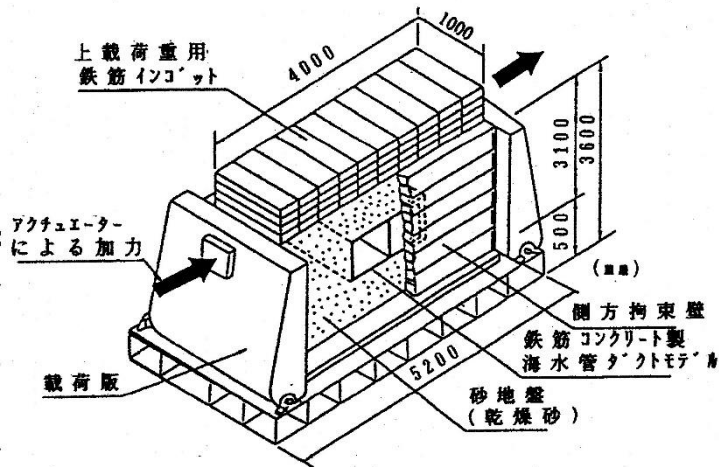


図1 実験装置の説明図

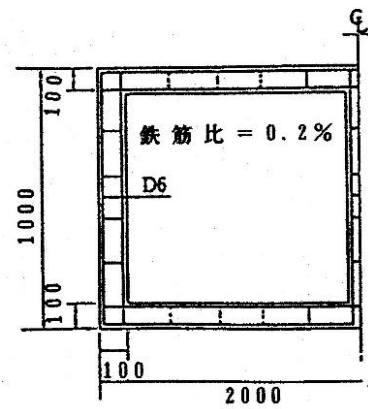


図2 試験体配筋図

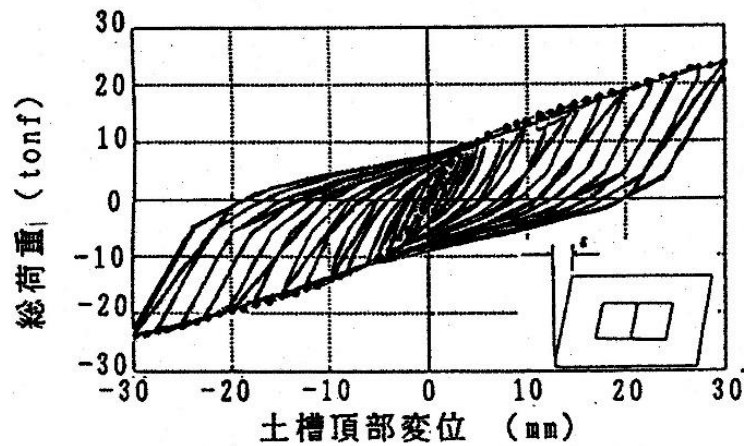


図3 荷重と土槽頂部変位の関係

実験では、土槽頂部変位8mm時点で最初の鉄筋降伏が隔壁に生じ、変位30mmまでに全ての隅角部において鉄筋が降伏しました。しかし、断面の破壊には至りませんでした。鉄筋比が小さく、曲げ降伏する鉄筋コンクリートは、土では破壊できないという感想を私は持ちました。この実験が数値解析法の進歩に寄与したのは疑いありません。

9. 骨組み構造の解析

山陽新幹線の間接ばりを有する3径間連続ラーメン高架橋も兵庫県南部地震によって被害を受けていました。最も被害が著しかったのは、上ばりまたは中間ばりの真下に発生したせん断ひび割れが発達し、コンクリートが剥落して自重に耐えられなくなり、破壊した位置から上の部分が橋軸直角方向北側にずれて崩壊したと推定されました。柱の曲げモーメントを低減するために設けた中間ばりが、柱の細長比を小さくしてせん断耐力と曲げ耐力の比を小さくし、せん断破壊から崩壊に導いたのです。



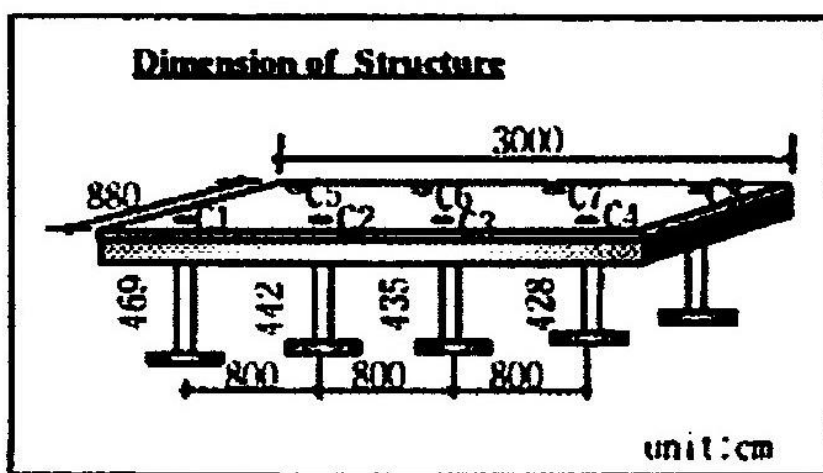
中間ばりの無い場合には、柱の上端ハンチ直下で曲げ降伏を起こしたものと、曲げ降伏後にせん断ひび割れが生じたものがそれぞれ相当数見受けられました。しかし、崩壊した例はありませんでした。また、被害の無いものも多く見受けられました。中間ばりが無いために、柱の細長比が大きく、曲げ降伏後もせん断抵抗に余裕があったためであると思います。

この種の骨組み構造では2次元解析は適当でなく、3次元解析が不可欠であることが私にも理解できました。そこで、通常の骨組み構造解析(線の力学)における剛性を弾性体ではなく、鉄筋コンクリートの構成則を一次元に落とし、各断面に発生する曲げモーメントとせん断力とを計算できるように、前川宏一に頼みました。比較的短時間で作成できたプログラムを用いて、Ickhyun KIM が解析しました。彼の論文(Ickhyun KIM, Hajime OKAMURA, Koichi MAEKAWA, "Method for Checking Seismic Performance of Concrete Structures and its Effectiveness", J. of Structural Engineering Vol.44A, March 1998)を簡単に説明します。

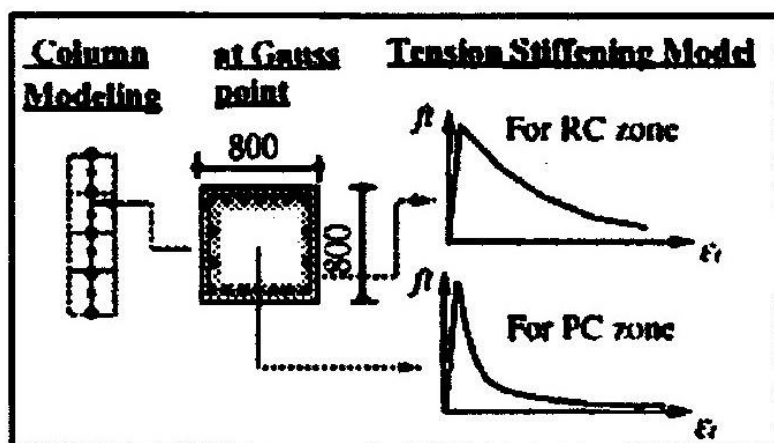
1) 構造モデルは、上スラブと柱(橋脚)を持つ3次元モデル(図A)とする。

- 2) 柱断面に用いる鉄筋コンクリートの構成則は、一次元モデルとする(図B)。
- 3) せん断破壊の包絡線を楕円とする(図C)。
- 4) 地震動は橋軸方向と橋軸直角方向の加速度(図D)とし、柱下部に作用させる。
- 5) 柱に作用するせん断力ベクトルと時刻との関係の一例を図Eに示す。
- 6) 柱に作用するせん断力と破壊包絡線の一例を図Fに示す。
- 7) 柱断面の応答加速度と変位履歴の一例を図Gに示す。

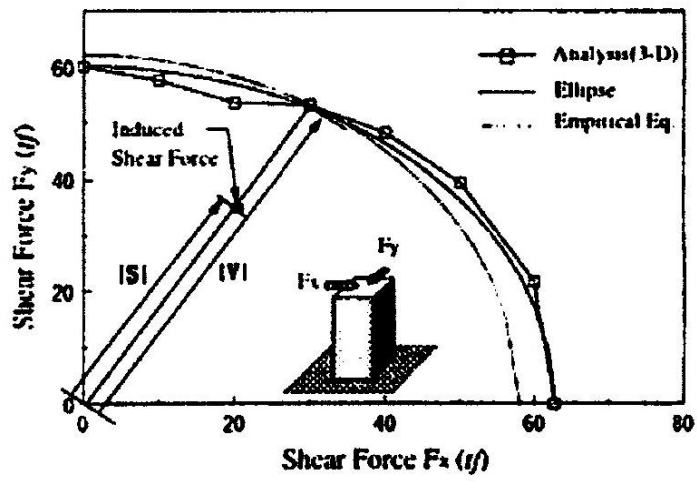
これらの結果から、この種構造物の耐震性能を評価するのに、この方法は極めて有用であると私には思えました。



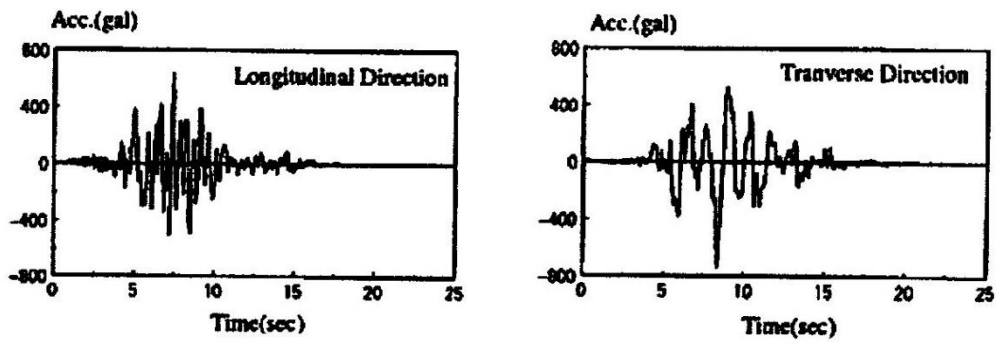
図A 構造モデル



図B 柱断面に用いる鉄筋コンクリートの構成則

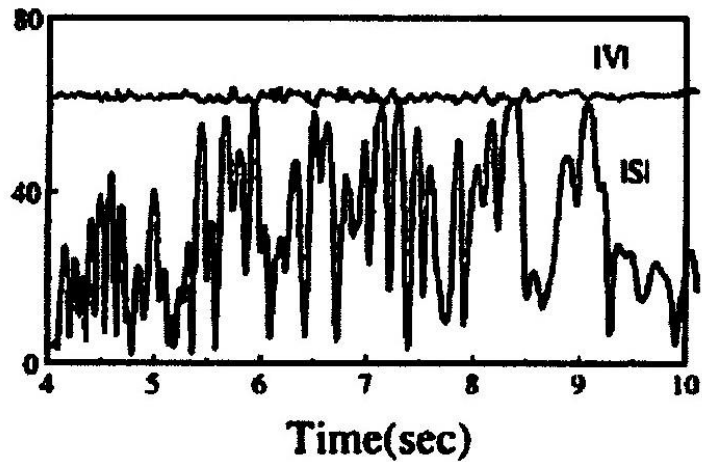


図C せん断耐荷力モデル

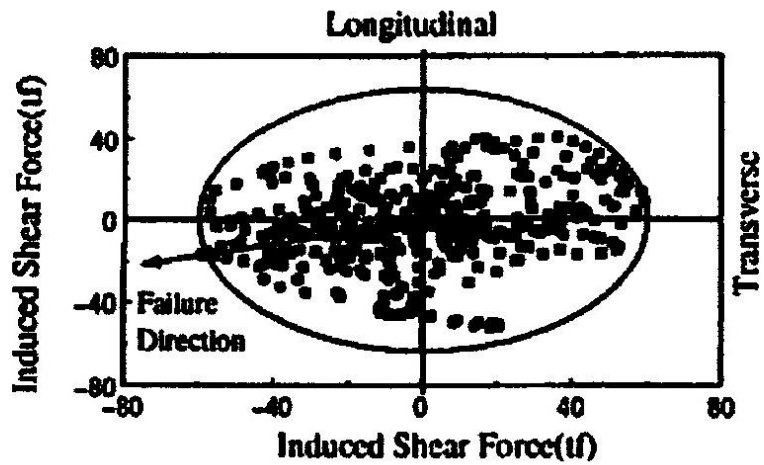


図D 入力地震動加速度（左：橋軸方向、右：橋軸直角方向）

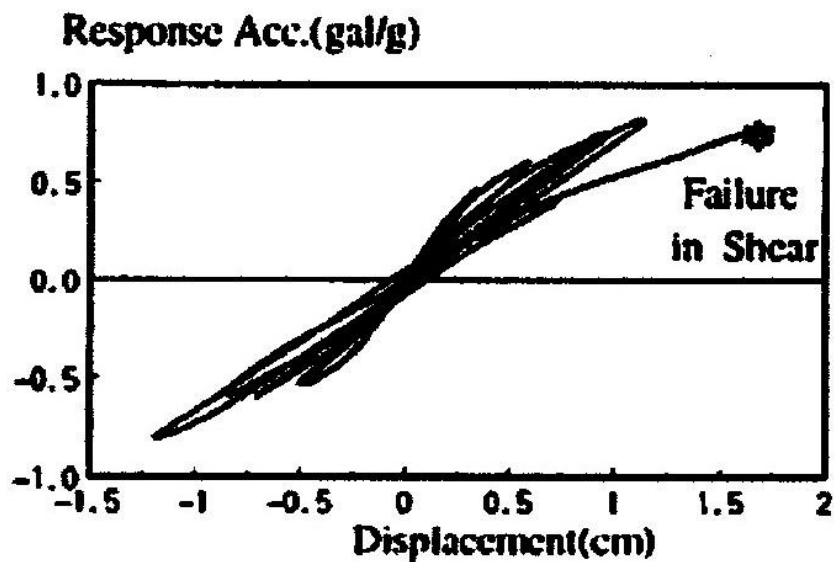
Shear Force & Capacity



図E 応答せん断力ベクトルとせん断耐荷力



図F 応答せん断力とせん断破壊の方向



図G せん断破壊した場合の応答加速度と変位(橋軸方向)

おわりに

1874年に「鉄筋コンクリートの挙動を統一的な方法で記述すること」に本格的に取り組み、1999年に著書「鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則」を発売するまで、私の関与できる仕事は終わり、後は前川宏一に託しました。彼は、土との連成問題に適用すると共に、計算機の進歩を見越して、3次元に拡張しました。

以上