第4回
鋼構造物の非線形数値解析と
耐震設計への応用に関するシンポジウム

報告書

土　木　学　会
鋼構造委員会幹事会

08
5
B 1 1 0 8 0 7 0 B
土　木　図　書　館

第４回
鋼構造物の非線形数値解析と
耐震設計への応用に関するシンポジウム

報告書

登録番号	平成22年3月18日
	第　57335　号
社団法人　土木学会	
附 属　土木図書館	

土　木　学　会

鋼構造委員会幹事会

まえがき

本報告書は，土木学会鋼構造委員会幹事会の主催で平成１４年１月１１日および１２日の２日間に渡り大阪大学コンベンションセンターにて行われた「第４回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関するシンポジウム」の報告書である．

本報告書は下記の構成となっている．

・招待論文１編の論文概要

・一般論文３３編の論文概要および質疑応答内容

上記のうち，一般論文３３編の論文ついて，概要は座長の方に執筆いただいたものを，質疑応答の回答は各論文の著者に作成していただいたものをとりまとめたものである．

鋼製橋脚をはじめとした土木鋼構造物の耐震関連の研究は，兵庫県南部地震以降，今までになく活発に行われてきた．その結果，土木鋼構造物の耐震性能に関する有用な情報が多く得られ，それらの研究成果は実際の土木鋼構造物の耐震設計や耐震補強に生かされているものもある．兵庫県南部地震発生から約８年経過し，ある意味当然のことかもしれないが，この分野に関する研究も兵庫県南部地震後間もない時期より少なくなってきている．しかしその一方で，土木鋼構造物の耐震設計や耐震補強を行う上で解明しなればならない問題が未だ多く残されているのも事実である．よって，効率的な研究を行うためには現時点でのこの分野の研究成果を整理してことが重要であると考えられる．その一助となることを願い，論文集だけでなく論文に対する座長の方々の評価やシンポジウムでの質疑応答をとりまとめたものが本報告書である．

最後に，各セッションの司会進行を行っていただい座長および副座長の方々，シンポジウムで発表いただいた方々，シンポジウムに参加していただいた方々，シンポジウムの運営にご協力いただいた方々に感謝いたします．特にセッションのとりまとめ等の絶大なるご協力をいただきました座長の方々には深く感謝いたします．

平成１５年８月

土木学会鋼構造委員会

西村宣男（大阪大学大学院）

招　待　講　演

免震・制震手法による長大橋の安全性の向上

京都大学大学院　教授　　家村　浩和

本論文では，下記に示す論文構成により，従来型の耐震設計法および免震・制震設計法の変遷について述べるとともに，それら設計手法の長大橋への応用事例について紹介している．

１．耐震設計レベルは如何にあるべきか？
２．耐震設計における性能設計法導入の試み
３．耐震から免震・制震設計へ
４．長大橋の免震・制震事例
５．おわりに

道路等の社会基盤施設には，大地震後，多少の機能停止があっても比較的短期間のうちに短期間のうちに復旧することが要求されている．しかし激震動に対して大きな塑性変形を期待した弾塑性設計法を採用すると地震後の残留変位が大きく修復が困難になる可能性が高い．そこで，著者は構造物に作用する地震力そのもの積極的に低減し，地震時の構造物の安全性を向上させようとする免震・制震技術の開発が積極的に進められなければならないとしている．そして，免震・制震技術の橋梁の適用例および長大橋の耐震補強例として，日本では弁天高架橋，港大橋，天保山大橋，アメリカではBenicia-Martinez橋，Coronado橋を取り上げて紹介している．

兵庫県南部地震での橋梁の被害を受け，新しい耐震設計手法や免震・制震技術の開発が今までになく活発に行われ，それらは実際の橋梁の耐震設計および耐震補強に生かされて来た．しかしながら，長大橋の耐震補強等，より高度な設計手法や技術の開発が必要なものも未だ残されている．そのような問題を解決していく上で，本論文は貴重な情報を与えているものであり，橋梁の耐震設計および耐震補強に携わる研究者および実務者等の関係者には是非一読されることをお勧めしたい．

一　般　講　演

（Ⅰ-1）　複合構造，炭素繊維による耐震補強

座長：奈良敬，副座長：池内智行

（1）　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

著者：宇井崇，汐待公二朗，西村宣男

この論文は，CFRP板を鋼製橋脚の耐震補強等へ適用するため，CFRP板を接着した補剛圧縮鋼板パネルの強度と変形能に関して解析的な検討を行っている．CFRP板とは炭素繊維と樹脂とを固化させて板状にした複合材料で，鋼板と比較して軽量施工性に優れ，かつ高強度で腐食しないなどの多くの利点を持っている．解析的検討の結果から，縦補剛材の剛比が道路橋示方書に規定されている必要補剛比にほぼ等しい補剛圧縮鋼板パネルに対しては，板パネルを補強するよりも補剛材を補強する方が効果的であるとの有用な知見を示している．今後はさらに高度な解析を実行するため，CFRP板の剥離まで考慮した数値計算手法の開発が期待される．

（2）　炭素繊維シートを用いた長方形断面鋼製橋脚柱の耐震補強方法に関する基礎的実験

著者：松村政秀，北田俊行，林秀侃，谷一成

この論文は，耐荷力の上昇の伴わない，より簡便で施工性に有利な耐震補強方法として，RC橋脚の耐震補強に用いられている炭素繊維シートの貼付方法を矩形断面の鋼製橋脚柱部材に適用することについて検討を行っている．炭素繊維シートの貼付方向・層数を変化させた実験供試体を用いて漸増繰返し水平変位載荷実験を行った結果，強度上昇を伴わないで塑性率を改善できるとを確認している．また，CFSを張付けていない面方向へ座屈が進展する場合には剥離が起こり補強効果があまり期待できないとの結果がでており，この点に関する改善策が今後の課題といえる．

【討議2-1】　前野裕文（名古屋高速道路公社）

炭素繊維シートの効果は剛性変化に伴う座屈モードの変化と考えてよいのでしょうか？

【回答2-1】

炭素繊維シートを貼付する補強効果は，炭素繊維シートを貼付しない供試体と比較すると，補剛板全体の座屈変形の発生を若干遅らせることが挙げられます．

しかしながら，炭素繊維シートの層厚は，１層あたり0.167mmと薄いため，剛性に及ぼす影響はほとんどなく，また，座屈の変形モードを変化させるまでの補強効果は，鋼板の座屈変形が進展すると炭素繊維シートが鋼板の変形に追随できず剥離するために得られなかったと考えられます．

(3)　高張力鋼を含むハイブリッド鋼製橋脚の耐震性について

著者：岡田潤，北田俊行，越智内士

この論文は，断面の一部に高張力鋼を用いるハイブリッド鋼製橋脚について，その構造が耐震上有効であるといえるのかどうかを解析的に検討している．普通鋼からなる鋼製橋脚，コーナー部に高張力鋼を用いた鋼製橋脚，補剛材に高張力鋼を用いた鋼製橋脚，および高張力鋼からなる鋼製橋脚の4ケースについて検討を行っており，最もじん性に富んだ構造は補剛材に高張力鋼を用いた鋼製橋脚であるとの結論を示している．この構造が有効となるパラメータ範囲についてさらに明確にすることが実用化に向けての課題だと思われる．

【討議3-1】　**崎元達郎（熊本大学）**

P28の図-５を見ると性能的（強度＋じん性）には，Ｓ３よりＳ２の方が高いと考えられる．しかしＳ２の製作は経済的に高く実用的でないことも考慮してＳ３が良いとの結論を導かれたのでしょうか？

【回答3-1】

P28の図-5より，強度に着目するとコーナー部に高張力鋼を用いた解析モデルS2が補剛材に高張力鋼を用いた解析モデルS3よりも優れています．しかし，じん性に着目すると，パラメータd_{95}/ d_{max}(水平荷重-水平変位曲線がピークを過ぎのちの低下率を示す指標で，d_{95}はピークをすぎ$0.95\times H_{max}$まで低下した点の水平変位を，d_{max}はH_{max}における水平変位)の値から，補剛材に高張力鋼を用いた解析モデルS3が最も優れているとの結果が得られています．本研究におきましては，仮に橋脚基部において局部座屈が発生したとしても，その耐荷力の低下を緩和できる構造として，断面の一部に高張力鋼を用いるハイブリッド鋼製橋脚を対象とし，解析的な検討を行っています．すなわち，鋼製橋脚のじん性に着目した研究と言えます．そのため，今回行った4ケースのうちでは，解析モデルS3(補剛材に高張力鋼を用いた鋼製橋脚)が最も良い構造であると結論づけています．

（4） 動的応答解析によるインテグラル複合ラーメン橋の耐震性能に関する検討

著者：高木優任，本間宏二，藤川敬人

本論文では，インテグラル形式の特徴である裏込土が耐震性能に与える影響を把握するために，裏込土の剛性をパラメータとして，実橋をモデルに時刻歴応答解析を実行している．この解析結果をもとに橋梁本体の応答は裏込土の挙動に影響されるものの，十分な耐震性能を有することを明らかにしている．近年，上部工，下部工，ならびに基礎を一体化したインテグラル複合ラーメン橋が中小スパン橋梁の経済化に有効な橋梁形式として注目されており，その普及が期待されている．今後のインテグラル橋の普及･発展に対して非常に貴重なデータを与える論文である．

【討議4-1】　北田俊行（大阪市立大学）

1．裏込土とＲＣ橋脚の分離はどのように考慮されましたか？

2．地震とは関係ありませんが，温度差による脚の検討はされたのでしょうか（特に桁が温度で縮む場合）？

【回答4-1】

1．裏込土と橋台の界面には，圧縮力は伝達するが，引張力が発生した場合には力の伝達を行なわないジョイント要素を導入した．なお，早い段階で剥離がおきることのないよう，ジョイント要素の初期応力として土圧による作用応力を考慮した．

2．今回の解析は，裏込土が橋台の耐震性能に与える影響を調査することに主眼を置いた基本検討が目的なので，パラメータを絞り込むため，温度変化の影響は考えず，すべて基準温度(20℃)という前提で解析を行なった．温度変化は，耐震解析における橋梁の初期応力の状態に大きく関連してくるので，これらの影響に対する検討は必要と考える．これらは今後の課題としたい．

【討議4-2】　陵城成樹（(株）ニュージェック）

ＲＣ部材（側壁）における軸力変動は解析時に考慮されているのでしょうか？

【回答4-2】

今回の解析では，前述のように裏込土の影響を調査することに主眼を置いたため，橋台の軸力変動は考慮しなかった．今後，より厳密な評価を行なうためには考慮するのが望ましいと考える．ちなみに，解析結果における橋台の軸力の変動率は，最大で死荷重による軸力の20%程度であった．

（I-2） 橋梁システムの耐震

座長：北田俊行，副座長：宇井崇

（5） 多層鋼製ラーメンロッキング橋脚を含む高架橋全体系の動的挙動を考慮した落橋防止システムの設計

著者：前野裕文，稲垣了史，後藤芳顯，水野清明，平山博，吉澤努

この論文は，多層鋼製ラーメンロッキング橋脚を含む高架橋全体系の地震時の挙動を，隣接橋をも考慮した非線形動的解析を行い検討し，その結果に基づいて落橋防止システムの設計を行った内容について取りまとめたものである．対象とする地震によってその挙動は大きく異なると考えられる．したがって，このような大規模な解析によって，起こり得るすべての地震に対して有効な落橋防止システムを設計することは，困難と思われる．しかし，機会あるごとに，このような解析を行うことは，高架橋の地震時挙動を明らかにする上で，有益と考えられる．

（6） 鋼製橋脚－地盤間の連成効果を考慮した連続高架橋の地震時挙動

著者：葛西昭，宇佐美勉，河村康文

この論文は，2本の橋脚で支持された3径間連続桁橋を，支持地盤をも含むシステムとしてモデル化し，その強地震時挙動を非線形動的解析により明らかにしている．このようなシステムの地震時挙動は地盤と橋梁との剛性・強度の評価の仕方により大きく変化することが予測される．特に，地盤に関しては，未知のファクターが多く，その機械的性質の評価精度も上部構造と大きく異なる．したがって，このような研究は，橋梁本体の解析に強い研究者のみではなく，地盤の専門家・研究者との共同研究が必要な気がする．しかし，共同研究の前に，このような研究を行っておくことの意義は大きいと考えられる．

【討議6-1】 北原武嗣（群馬工業高等専門学校）

1．地盤の場合，地表面観測波を基盤に引き戻す際に，地盤特性はどのように設定されているのでしょうか？

2．地盤一体モデルにおいて，橋脚間の地盤応答加速度が増幅されるという結論がありますが，この応答加速度と自由地盤による地表面応答加速度は，どちらの値が大きいのでしょうか？

【回答6-1】

1．N 値＝５に対応するように道路橋示方書より，地盤物性値（S 波速度等）を算出しています．また，非線形性については，論文中にあります文献 15)にて，実測値に基づく推定式から，せん断剛性－せん断ひずみ関係，減衰定数－せん断ひずみ関係を求め，これを地盤物性として取り扱っています．その際には，当然のことながら，拘束圧も考慮の上で算出しています．

2．橋脚の固有周期等によっても異なりますが，解析を行った範囲内においては，ほとんどのケースで自由地盤における地表面加速度の方が大きくなっていました．ただし，パラメータによって，自由地盤よりも大きくなっていたケースは，最大加速度が短時間に発生するスパイク的なものであり，これが応答に影響を及ぼす可能性が低いことは明らかであり，さらに検討を要す部分であります．例えば，数値計算上の発散を意味している場合も考えられるため，今後の課題とさせていただきます．

【討議6-2】中島章典（宇都宮大学）

異なったタイプのモデルで結果的に例えば１次振動モードの固有振動数およびモード減衰定数の値がわかれば教えていただきたい．

【回答6-2】

橋脚部分の固有周期にほぼ依存する形となり，例えば，地盤固定モデルで0.5秒程度の１次振動モードとなる場合，地盤一体型モデルでは，0.6秒程度になります．これは，橋梁部分の固有周期がどの場合でも同様の傾向を示し，約0.1秒程度地盤を考慮したモデルよりも長周期になっています．従って，橋梁部分の１次振動モードが卓越的であることが分かり，これがモード比例減衰定数にも現れています．本研究では，橋梁部分に相当する部材には0.05の減衰定数を仮定しています．従って，１次のモード比例減衰定数は，ほぼ0.05で橋梁部分と地盤部分との固有周期にずれがあるにつれて0.05から小さくなる傾向にあります．ただし，以後の研究で，地盤に与える減衰定数の妥当性について検討を行っているので，その研究成果がまとまり次第，より詳細なコメントができるものと思われます．

（７）　地盤と局部座屈の影響を考慮した鋼製橋脚の地震時動的応答解析手法

著者：奈良敬，村上茂之，石田剛

この論文も上の(6)の論文と同様なテーマを対象としている．そこで，述べたように，このような研究は，橋梁本体の解析に強い研究者のみではなく，地盤の専門家・研究者との共同研究が必要と思われる．さらに，橋脚と地盤との連結構造であるフー

チングも精度よくモデル化することが必要と思われる．また，将来は，この研究の成果として，このような複雑な解析をしなくてもよいようにするには，どこを早く壊したらいいかなどを明にして，できるだけ簡単な設計法で耐震設計ができるようにしていただきたい．

【討議7-1】中島章典（宇都宮大学）

図-１の解析フローにおいて減衰マトリックスを２回定めているように思うのですが，その点がわからないので教えていただきたい．

【回答7-1】

図-１の解析フローにおいて減衰マトリックスを定めているボックスが２つありますが，これは地盤の構造モデルと橋脚の構造モデルに分けて記述しているためです．２回定めているわけではありません．

（8） コンクリート充填鋼管を主桁および主塔とする複合斜張橋の非線形地震応答解析

著者：羽野暁，劉玉擎，彦坂熙，中村俊一

コンクリート充填鋼管を主塔に用い，主桁は軽くして，地震時には遊動円木のようにケーブルで吊って長周期化できる免震構造にするのがよいように思われる．しかし，この研究を通じて，コンクリート充填鋼管の剛性と強度とを正確に評価できる有限要素モデルを開発していただき，その要素を用いて，斜張橋ならコンクリート充填鋼管をどこに用いるべきか，また耐震部材としてコンクリート充填鋼管を適切に利用できる新しい構造の開発なども行っていただきたい．

【討議8-1】崎元達郎（熊本大学）

試設計の手法についてもう少し説明して欲しい．例えば降伏した断面はどのような設計法（外力）に対して断面を決定したのか．単に自由に試設計をして安全だ，危険だといってもこの側面のみにとって意味があっても論文の一般性がないのではありませんか？論文の主旨も含めて説明してください．

【回答8-1】

試設計は許容応力度法に基づき，主荷重に対して構造および断面諸元を決定し，震度法による耐震設計を行った．

本論文の主旨は，コンクリート充填鋼管を主桁および主塔とする新しい構造形式の複合斜張橋を提案し，大規模地震動に対する１つの照査法を提示した点にある．１つのケーススタディーだけからこの橋梁形式の一般的耐震性能を論じる意図はなく，このスパンで競合するPC斜張橋との施工性，経済性，耐震性等の比較を研究目的としたものである．

(9) ゴム支承およびＰＣケーブルの非線形特性を考慮した連続高架橋の動的解析

著者：木納利和，森下宣明，前野裕文，野中哲也，折野明宏

この論文では，ゴム支承および落橋防止構造としてのＰＣケーブルの非線形性を考慮した連続高架橋の地震時挙動を，隣接橋をも含めた大きなシステムとしてモデル化した非線形動的解析により検討している．用いる地震波，システムの各要素の特性評価，桁端部の遊間など設計図と実際の状況との差異などが，大きく挙動に影響すると考えられる．しかし，発生する地震の特性の把握，構造要素の機械的性質の正確な把握，コンピュータの高性能化が進むにつれて，少しづつではあるが，このような複雑なシステムの地震時挙動が明らかにされていくであろう．その意味でも，このような研究の今後の発展に期待したい．

（Ⅰ-3）　動的耐震解析法(1)

座長：後藤芳顯，副座長：前野裕文

(10)　鋼構造物の動的耐震照査法に関する検討

著者：宇佐美勉，森下邦宏，阪野崇人

動的荷重を受ける薄肉鋼構造物の終局限界状態を照査するには，シェル要素を用いた非線形動的解析によるのがより厳密であるが，膨大な計算が必要になることから，実設計への導入は適当ではない．本論文では局部座屈を無視したはり要素を用いた非線形動解で危険部材セグメントの平均圧縮ひずみを算定し，局部座屈を考慮して設定された破壊ひずみに到達したときを終局状態とする実用的な手法が示されている．破壊ひずみは単柱式鋼製橋脚の単調載荷解析および繰り返し載荷解析での結果を考慮して95%耐力点に対応するものが設定されている．繰り返し荷重が作用する場合，破壊ひずみは本来荷重履歴の影響を受けるものであるが，本論文では陽な形で荷重履歴の影響は考慮されていない．提案された照査法の妥当性は単柱式鋼製橋脚を対象とした準静的繰り返し実験およびシェル要素による動的解析により確認されているが，任意の荷重履歴に対して有効であるか否か，また，より複雑な構造系に対して適用できるのかについてはさらなる検討が望まれる．任意の構造に適用可能な実用的な動的照査法の確立は急務であると考える．

(11)　橋脚の弾塑性地震応答性状に及ぼす複合非線形性の影響に関する２，３の検討

著者：中島章典，福田淳，斉木功，岩熊哲夫

はりモデルを用いた鋼製橋脚の複合非線形動的応答解析に及ぼす幾何学的非線形性の影響，直応力による鋼材の降伏へのせん断応力の影響，さらに初期たわみの影響について２種類の単柱式鋼製橋脚を対象とした剛体バネモデルによる解析をもとに検討されている．その結果，幾何学的非線形性と初期たわみの影響は無視できないが，降伏へのせん断応力の影響は比較的小さいという興味深い知見が得られている．ただ，著者も述べているように検討結果は２種類のモデルに限られているので，より詳細な検討が望まれる．すなわち，これらの影響を支配するパラメータを明らかにし，パラメータと影響の大きさとの定量的な関係が得られれば実務においても有用な情報となろう．

【討議11-1】　後藤芳顯（名古屋工業大学）

１．本論文では塑性係数（効果係数）がゼロの場合を扱ってますが，塑性係数が通常用いられるようなE/100程度を用いた時も，直応力とせん断応力の連成の影響

は小さいのでしょうか？

2．本論文では直応力とせん断応力の連成の影響について扱われているのですが，本論文の結果からせん断変形の影響が小さいというような誤解を与える可能性もありますので，誤解を与えないようにしていただれけば幸いです．

【回答11-1】

1．申し訳ありませんが，これまではそのような検討は行っておりませんので明確な回答はできません．ただし，同様に影響は小さいだろうと予想しておりますが，今後，検討させていただきたいと思います．

2．本研究ではあくまでも，鋼材の塑性化へのせん断応力の考慮が，鋼製橋脚の弾塑性挙動に及ぼす影響が小さいと述べているのであり，ご指摘のように，せん断変形の考慮が鋼製橋脚の弾塑性挙動に及ぼす影響が小さいことを意味していません．

(12)　動的複合非線形解析による鋼アーチ橋の座屈性能照査方法に関する考察

著者：為廣尚起，大塚久哲

動的複合非線形解析における鋼構造物の座屈安定照査という重要な問題が提起されている．本論文では２種類の座屈照査法の提案がなされている．一つは接線剛性行列を用いた保存力下の座屈照査法である．今ひとつはニューマークの 法による解法で増分変位量を求める際の係数行列の値が零となる点として座屈点を同定する方法である．本構造系は非保存力である動的荷重が作用するものであるから保存力下の座屈照査法については適用範囲外であり，その精度については明らかでないと考えられる．一方，ニューマークの 法の係数行列を用いる方法についても時間分割を十分小さくすれば，行列式の値は零にならず座屈照査は難しいと考えられる．一般性のある動的不安定の照査法の適用も検討されるべきであろう．

【討議12-1】　後藤芳顯（名古屋工業大学）

1．動的現象を静的問題に置き換える場合，慣性力が非保存力となるため，保存力に対等した静的な座屈判定手法（式(2)）は適用できないと思いますが？

2．式(4)では時間分割を十分小さくすればdet［Ke］は常に正になります．従って特異性は現れません．Det［Ke］≦0となるは単に数値計算での時間分割が大きいことによるものと考えます．式(4)の［Ke］による判定は不適当ではないですか？

【回答12-1】

1．非線形動的解析における瞬間の応力状態は，一般的に死荷重状態を初期値として，これに各時刻ステップで求められた増分応力を当該時刻まで逐次累加して求められます．これは地震動というトータルでは非保存的な外力を解析ステップにより細分化し，個々のステップにおける増分外力を（当該ステップ内に限り）保存力として扱っていることに相当すると考えます．

固有方程式 $([Kt]+\lambda[\Delta Kg])\{u\}=\{0\}$ （本文の式(2)）が対象としているのは，個々の解析ステップ区間であり，動的解析中に求められた

①ある解析ステップの平衡状態（これによりKtが評価される）

②その直後のステップの増分応力分布（これによりΔKgが評価される）

を逐次使用しますから，保存力を対象とした式(2)の適用範囲を逸脱していないと考えます．

従来の式(2)の用いられ方と本報の提案との差異に関して，さらに３点補足しておきます．

(1)動的解析中の②を擬似的に静的に発生したものとして式(2)を適用している点について

②が１ステップの増分という，比較的小規模な量であることから，動的解析の各瞬間に座屈の危険性にどの程度近づいたかを検証する手法としては，この仮定でも十分有効と判断しました．

(2) 動的解析において②を発生させる動的荷重の分布形は一定ではない点について

各時刻の固有値は，「毎回異なる基準状態からの固定的でない増分外力分布に対する倍率」になりますが，一般的な動的解析の各ステップは一定のΔtで拘束されますから，「Δt間に変化した事象に対する倍率」という，静的問題への適用時とは異なる共通尺度を持って，各時刻の固有値を評価することができます．

(3) 動的解析における②は応答に伴い増減を繰り返す点について

式(2)はある瞬間の①と②の関係のみを用いて，その瞬間の座屈への接近具合を固有値の絶対値の大小や符号の正負によって明白に示します．固有値の正負について本文中では簡単にしか触れませんでしたが，ここでの固有値の符号は，式(2)の解法に，絶対値で最小の固有値から求めていく「逆反復法」を用いて，各時刻で（接近しつつあるか離れつつあるかに関わらず）最も近傍にある座屈点を探査した結果におけるものです．②が最も近傍の座屈点に接近する方向である場合の固有値は正，離れる方向である場合は負になります．離れつつある状態を危険視する必要はないと判断し，本文では正の固有値に着目しました．

２．外力が非保存的であると，不安定のタイプは一義的でなくなり，静的不安定が起こるかも知れないし，動的不安定が起こるかも知れないとされていますが1)，その後の検討で，本報で提案した手法は，非保存力作用中の静的不安定を評価する手法として有効であるという認識に至っております．

したがって，式(3)のKtと式(4)のKeについては，現在我々もご指摘の通りKeは適当ではなく，Ktを用いるべきと考えております．

本報内では両方の条件で解析を実施し，Ktを用いた結果を評価した方がベターと判断して，解析例は全てKtを用いたものを載せてはおりましたが，この時点では上記の認識が曖昧であったといわざるを得ません．

【参考文献】

1) V.V.ボロチン著，関谷・杉山共訳，「非保存的弾性安定問題」（培風館）

(13) 断面力表示構成則による軸力－２軸曲げ相関関係を考慮した地震応答解析手法の提案

著者：森下邦宏，井上幸一，増田伊知郎，上平悟，山本利弘

ファイバーモデルとほぼ同等の精度でしかも計算時間の低減を目的として軸力－２軸曲げ相関関係を考慮した立体骨組の断面力表示構成則の提案が行われている．さらに計算例からほぼファイバーモデルと同等の解が得られることを示している．断面力表示構成則の場合，塑性理論との類似性を仮定する定式化の理論的根拠は乏しいが，ファイバーモデルのように断面分割を行う必要が無く，モデル化の簡便さ，計算時間が短いことなどの点で優れている．本モデルでは，ねじりモーメントの連成を考慮していないが一般の立体骨組へ適用するにはこれを考慮する必要がある．断面力表示構成則の定式化は複雑で，ねじりモーメントを考慮するとさらに難しくなるので，一般の立体骨組解析への適用性についてはさらなる検討が必要であろう．

【討議13-1】　後藤芳顯（名古屋工業大学）

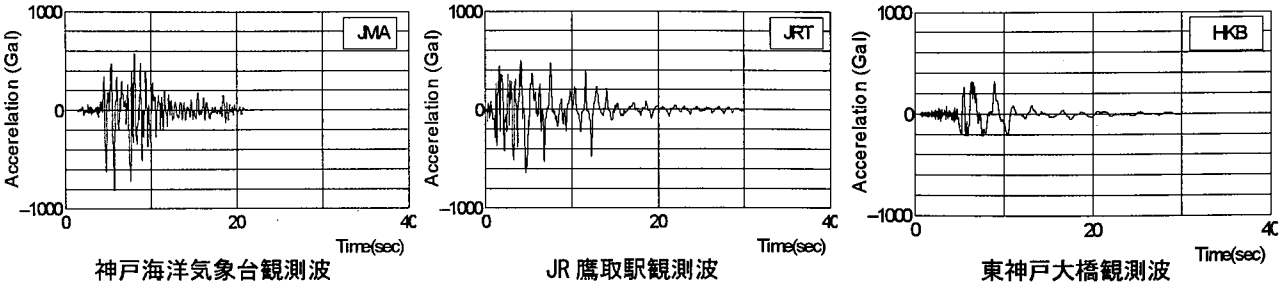
１．立体問題を扱ううえには，２軸曲げの他にねじりとの連成も考慮する必要があります．本モデルではねじりが考慮されていないのでねじりモーメントが大きな時，ファイバーモデルに比べると解析精度がかなり劣るのではないでしょうか？ねじりを考慮して立体問題の断面力表示の構成則は非常に複雑になると考えられますので，実用性には問題があるように思いますが？

２．本構成則には図-２に示すような硬化型のものと用い，局部座屈が考慮されていないにもかかわらず，図-７(a)(b)ではファーバーモデルと異なり軟化挙動を示しています．構成式の定式化に問題はないですか？

【回答13-1】

１．本文中p.98の下L6に記述してあります通り，本モデルは，ねじりの影響が小さく，曲げ，軸力の影響が卓越すると考えられる場合には適用可能と考えられますが，張出の大きい逆Ｌ型橋脚などのねじりが大きく生ずる構造では，精度は落ちるものと思われます（ベンチマークはしておりませんが）．本モデルを構築したのは，解析モデルの節点数，要素数が多くなるような長大橋梁の解析時間を短縮したいという目的もあり，長大橋（斜張橋，吊橋など）の主塔のような構造が，曲げ，軸力の影響が大きいことを踏まえると，このような場合には適用性があるものと考えております．

２．この図に関しては，発表当日のＯＨＰの方は差し替え版を入れておいたのですが，説明を忘れておりましたとともに，当日修正版を配布しておりませんでした．この討議の場をお借りして訂正させていただきます．講演概要集の101，102ページの差し替え版を添付します．



神戸海洋気象台観測波　　JR 鷹取駅観測波　　東神戸大橋観測波

図－６　地震入力加速度時刻歴波形

表－２　応答値の比較

橋梁形式	T型				逆L型		
構造名称	No.13		No.S2		No.1		
応答値	Hmax/Hy	δ max/ δ y	Hmax/Hy	δ max/ δ y	Hmax/Hy+	Hmax/Hy-	δ max/ δ y
Test	1.39	4.93	1.76	9.02	1.80	-1.78	8.84
Proposed	1.21	3.71	1.35	9.58	1.41	-1.33	8.53
	-12.9%	-24.7%	-23.3%	6.2%	-21.7%	-25.3%	-3.5%
2Parameter model or Damage Index model (NU)	1.43	3.96	1.66	8.90	1.81	-1.85	8.31
	2.9%	-19.7%	-5.7%	-1.3%	0.6%	3.9%	-6.0%
Fiber mode (NIT) せん断なし	1.34	3.92	1.49	9.92	1.27	-1.53	10.74
	-3.6%	-20.5%	-15.3%	10.0%	-29.4%	-14.0%	21.5%

ド地震応答実験[10]，最大荷重，終局変位などを実験的な推定式より求めたP－δ関係式を用いた地震応答解析[12]，Damage Index モデルを用いた解析[13]，等価１自由度モデルによる解析[14]，ファイバー要素と詳細な構成則[9]を用いた解析結果などとの比較が示されているので，これらとの比較を行った．

3.1　対象構造

解析対象としては，文献2）に示されるＴ型橋脚として，東神戸大橋観測地震波 NS 成分(HKB)の最大加速度を 1.5 倍した波形を入力したケース（No.13），およびJR 警報地震計鷹取駅観測地震波 NS 成分(JRT)を入力したケース（No.S2）を対象とし，逆Ｌ型橋脚の解析ケースとしてはJR 鷹取観測地震波を入力したケース（No.1）を対象とした．各ケースにおける構造物の諸元は表－１に示す通りである．また，表中の各記号は図－５の試験体概念図と対応している．図－６に解析で使用した地震動の加速度時刻歴波形を示す．ただし，図－６中には４章で使用した神戸海洋気象台観測波 NS 成分(JMA)の波形も併せて示す．

3.2　解析概要

本手法を用いた解析では，２章に示した断面力表示構成則を用いた直接積分による時刻歴応答解析を行った．モデルの材料定数および断面寸法等の諸元に関しては，表－１に示す値とし，減衰定数としては h=0.05 で剛性比例型を採用した．また，一定鉛直荷重Ｐを載荷した状態で地震応答解析を実施し，付加曲げモーメント（P－Δ効果）の影響も考慮した解析とした．

3.3　解析結果の比較

解析結果の内，表－２に，各応答値の内，最大荷重（H_{max}/H_y），最大応答変位（δ_{max}/δ_y）の値の比較を示す．ただし，逆Ｌ型橋脚モデルについては，解析結果によっては最大荷重の発生が，荷重プラス側，マイナス側で異なる傾向を示しているため，それぞれの荷重最大値に対する比較を行った．また，表中には，ハイブリッド実験結果を基準値とした場合の，各結果の誤差比率をパーセント表示にて示す．図－７(a)には，Ｔ型橋脚モデルの内，No.13 の頂部変位時刻歴応答波形（δ－T），橋脚基部水平反力－頂部水平変位履歴図（H－δ）の比較を，(b)には No.S2 の比較を，図-8 には逆Ｌ型橋脚モデルについての比較に示す．これらの図は，水平変位を降伏変位 δ_y で，水平荷重を降伏荷重 H_y で無次元化したグラフとなっている．また，図の見やすさを考慮して，４つの結果比較を２つずつの比較として分けて表示している点に注意されたい．比較図としては，本解析手法の結果(Proposed)とハイブリッド実験(Hybrid Test)の比較図，２パラメータあるいは Damage Index model による結果(2-Parameter model, SDOF model)とファイバーモデルの結果(Fiber)の比較図を示す．

表－２より，Ｔ型橋脚モデルの結果については，全体的に良い精度で実験結果を表現しているのは，２パラメータ，Damage Index model による結果であるが，これらの解析手法は，各種の実験結果を基に基本的なパラメータ等を決定している方法である．本研究で比較対象としている詳細な構成則を用いたファイバーモデルの結果と比較すると，No.13 については，荷重，変位とも本手法の方が 5～9%程度小さく，実験値との誤差も大きい評価となった．一方，No.S2 の結果に関しても，荷重，変

位ともファイバーモデルより小さく，誤差も３～9%程度となっており，良く一致しているものと言える．

また，表－２の逆Ｌ型橋脚モデルについても，最も精度が良いのは Damage Index model による結果である．本手法の結果とファイバーモデルの結果を比較すると，ともに荷重については実験値との誤差が 20%を超える誤差となっているが，最大変位の誤差は，本手法では 4%程度となり概ね一致していると言える．

図－７，８の波形の比較より，本手法の結果は，すべての比較において，残留変位の生じる方向など，応答性状については実験結果，ファイバーモデルの結果と対応がとれている．また，変位時刻歴波形の比較から，最大応答変位までは概ね実験結果に近い応答を示していることがわかる．しかし，残留変位の値は，実験値と大きく異なる結果を示している．これは，本手法は局部座屈による耐荷力の低下挙動などを考慮していない方法であり，最大変位以降の微妙な剛性変化などが再現できていないためと考えられる．これはファイバーモデルについても同様であり，すべての結果で本手法と同様の傾向を示していることがわかる．

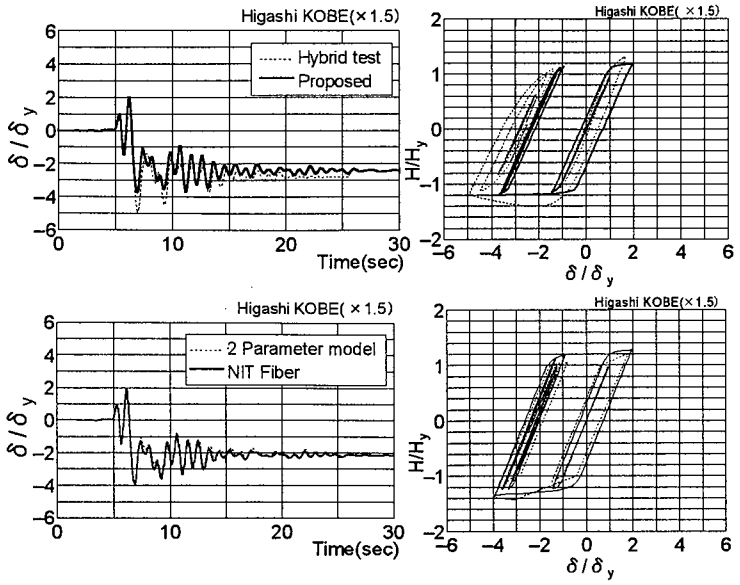
以上の結果より，軸力－１軸曲げ相関（ここでは一定軸力）のみを考慮した場合については，最大応答変位が発生する時点までという制限はつくが，本解析手法は実験値に近い値を示す結果が得られた．

４．軸力－２軸曲げ相関問題に対するベンチマーク

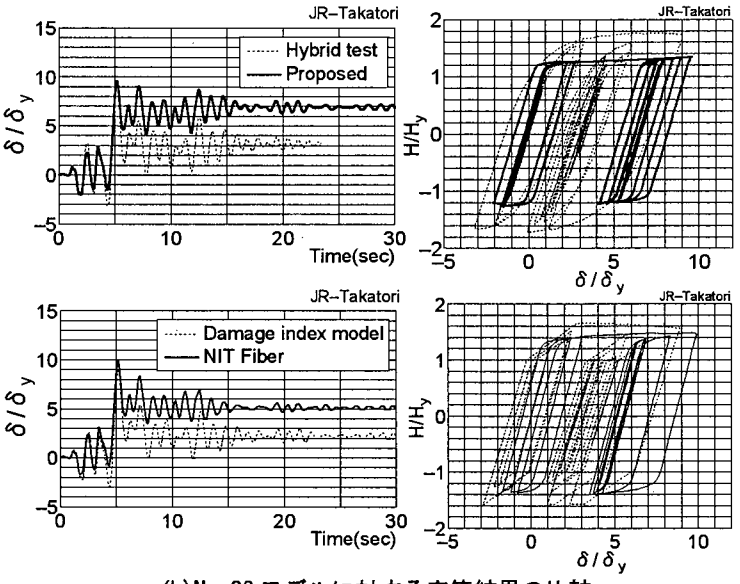
３章に示したベンチマーク解析結果より，提案手法による結果は概ね妥当な結果が得られているものと考えられる．次に，軸力と２方向の曲げモーメントが同時に作用する場合のベンチマークとして，水平方向外力に対して，軸力変動が生じるラーメン橋脚モデルを作成して，ファイバーモデルの解析結果との比較を行った．

4.1　対象構造

解析対象構造のラーメン式橋脚モデルの諸元を表－３に，解析モデル図を図－９に示す．ラーメン橋脚モデルは構造的には対称構造としたが，上部２点の質点における質量およびその配置を変化させることで，応答における非対称性を持たせる構造とした．また，隅角部については剛な要素としてモデル化した．表－３中の各記号は図－９における記号に対応している．また，質量等の諸元も図－９中に示す．



(a)No. 13 モデルに対する応答結果の比較



(b)No. S2 モデルに対する応答結果の比較

図-7　地震応答解析結果の比較（Ｔ型橋脚モデル）

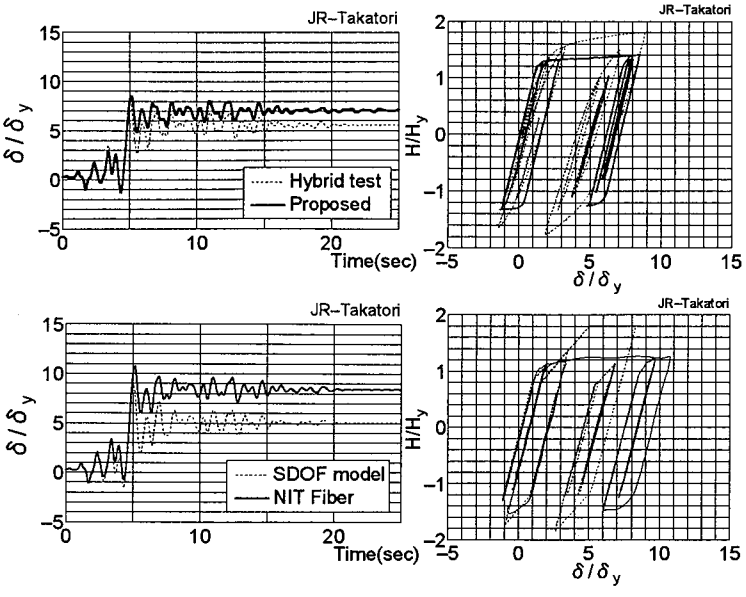


図-8　地震応答解析結果の比較（Ｌ型橋脚 No. 1 モデル）

(14)　鋼製橋脚の最大応答変位に与える地震波の非定常性の影響

著者：北原武嗣，伊藤義人

同じ弾性応答スペクトルを持ち位相特性の異なる地震波が鋼製橋脚の弾塑性最大応答変位に与える影響を検討している．ここでは道路橋示方書の設計スペクトルに対応し，位相特性の異なる100種類の模擬地震波について単柱式鋼製橋脚の最大応答変位のばらつきを検討している．その結果，位相特性の差により変動係数が0.15-0.18となること，さらに道示の3波による最大応答変位の平均はここでの100波平均とは必ずしも一致せず，危険側の結果になる場合もあることなど，動解による耐震設計を行う上で，重要な情報が提供されていると考える．

(Ⅰ-4)　動的耐震解析法(2)，ラーメン橋脚

座長：中島章典，副座長：高木優任

(15)　圧延変厚鋼板を用いた鋼製橋脚の地震時動的応答

著者：奈良敬，村上茂之，得原大輔

鋼板の板厚を階段状に変化させる変断面橋脚では，塑性化が一箇所に集中することが予想され，結果的に，橋脚頂部の変位が大きくなるなど好ましくないことが指摘されている．そこで本研究では，圧延過程で板厚を連続的に変化させることができる圧延変厚鋼板を橋脚基部付近あるいは断面変化部に配して塑性化する領域を広げ，塑性化の一箇所への集中を抑制することを試みている．設計段階からの材料強度のばらつきなどの影響もあり，想定どおりに塑性化領域を広げ，一箇所への応力集中を抑制することができるかどうか難しい面もあるが，実験的研究あるいは複数の橋脚を有する場合への展開などを進めることによって好ましい断面構成などを見出すことが期待される．

(16)　座屈被害を受けた鋼管橋脚の地震応答解析

著者：池内智行，小野潔，西村宣男

本研究では，兵庫県南部地震で被害を受けた鋼製円柱橋脚と，それらに径厚比の調整および等断面化による耐震性能改善策を施した橋脚に対してシェル要素を用いた詳細な動的解析を実施し，両者の損傷度を比較することで耐震性能改善策の定量的な評価を試みている．まず，被災橋脚の動的解析結果は実被害の傾向を良く説明できることを示している．次に，等断面化により断面変化点への塑性化への集中は抑制されるが，結果的に，最大変位あるいは残留変位などが改善できない場合も認められ，この点についてはさらに検討が必要な状況である．

【討議16-1】　高木優任（新日本製鐵（株））

検討を行なった4ケースの改善モデルの中で，P582だけ残留変位が許容残留変位を超えているのは，改善モデルの中でP582だけ断面変化部(t=34mm→t=30mm)を有しており，断面変化部が弱点となったと考えてよいのか．

【回答16-1】

ほぼ同じ径厚比パラメータ(0.0557に対して0.0539)，軸力(0.135Pyに対して0.141Py)であるP581橋脚では許容残留変位を超えていないため，ご指摘のように断面変化部が弱点になったと思われます．制限径厚比以下であっても，モーメントの集中する場所に断面変化部があるP582橋脚のような場合，十分な耐震性を確保できない

と考えられます.

(17) 鋼ーコンクリートサンドイッチ構造を有する地中タンクの地震時動的応答特性

著者：奈良敬，村上茂之，岡嵜孝和，岡田豊，大前伸友

本研究では，鋼ーコンクリートサンドイッチ構造部材をもつ地中タンクの耐震性能の評価を目的として，板モジュールの静的載荷試験，実物大タンクの衝撃加振試験と解析結果の比較および地震時動的応答解析を実施している．要素試験，実物大タンクの衝撃加振試験および地盤の影響を考慮した地震応答解析など難しい問題を広範に検討しているが，地震応答解析の精度を高めるためにはこのような検討が必要になると考えられる．ただし，衝撃加振試験における実験結果と解析結果の一致度をさらに改善する必要があると考えられ，その点から，さらに今後の検討が望まれる．

【討議17-1】　陵城成樹（(株）ニュージェック）

1．床版と側壁との接合条件は剛結でしょうか？ヒンジでしょうか？

2．上の部位には大きな応力が発生するように思われますが，実測または解析時でのこ部位におけるひずみ量はどのくらいなのでしょうか？

【回答17-1】

1．床版厚がおおきいこと，鉄筋で定着していることから剛結としています．

2．側壁上部での応力は，相当応力で整理しています．実測では論文で記述した衝撃試験のみですので，濃尾地震を想定した地震波による数値解析において，側壁上部での鋼板に生じる応力は，貯水なしの時で最も大きく，およそ60～70MPaです．応力の最も大きい箇所は，ご指摘の通り，床版と側壁との接合部で，ここではおよそ85Mpaです．

(18) せん断変形が卓越する鋼製ラーメン橋脚のPushover解析へのTimoshenkoはり要素の適用性

著者：奥村徹，後藤芳顯

本研究では，実用性の観点から，鋼製ラーメン橋脚のPushover解析におけるTimoshenkoはり要素の適用性を，柱基部の損傷先行型とはり損傷先行型の2種類のモデルについて検討している．実験結果と比較されたシェル要素を用いた解析結果を参照解として，Bernoulli-Eulerはり要素を用いた場合よりもTimoshenkoはり要素を用いた場合の方が，Pushover解析における水平荷重ー水平変位関係はもちろん，せん断座屈発生までは着目点の限界ひずみも精度良く再現できることを示している．ただし，本研究でも述べられているように，せん断座屈発生以後の精度低下が認められており，

これに対する対策が待たれる．

(19)　鋼製ラーメン橋脚の崩壊過程に関する研究

著者：武居正樹，渡邊英一，杉浦邦征，永田和寿，足立幸郎，陵城成樹

本研究では，鋼製門型ラーメン橋脚の縮尺模型の静的載荷実験および局部座屈までを精度良く表現できるシェル要素を用いた弾塑性有限変位解析を実施している．そして，非線形挙動や崩壊過程について両者の結果を比較して検討している．弾塑性有限変位解析においては，板パネルの初期たわみや残留応力までを考慮した詳細な解析を実施しているが，単調載荷時の水平荷重－水平変位関係においても，解析結果と実験結果の比較では，両者の間に有意な差異が認められ，実構造物の挙動を再現する非線形解析の難しさを改めて示した結果となっている．

【討議19-1】　藤原英之（トピー工業（株））

実験での載荷方法について，以下の２点において，一般的にこれまで行われてきたラーメン橋脚の実験と異なるが，何かお考えがあればご教示願いたい．

・左右橋脚柱への鉛直荷重を軸力比にあわせて，試験中一定としていること

・水平力載荷点を柱頂部とし，梁材には一次的な軸力を作用させないこと

【回答19-1】

1点目のご質問でございますが，研究対象とした橋脚の脚柱に作用している上部工の死荷重による軸力比のレベル（降伏軸圧縮力の4.15%）と等しくなるように鉛直載荷を行なっております．この大きさは試験中一定としておりますが，供試体には水平載荷によるラーメン橋脚のフレームアクションにより左右の柱の軸力は常に変動しております．次に，2点目のご質問に関してでございますが，この実験ではは り部にも大きな損傷がでることが予備解析により予測されておりました．したがって，はり部を載荷点とした場合，はり部の損傷により載荷に不具合がおこることが恐れがございました．また，はり部に載荷治具を設置することによりはり部が損傷し難くなり，損傷が柱部だけに集中してしまい，鋼製ラーメン全体としての崩壊過程を追跡できない恐れもございましたので，この実験では水平力の載荷点をはり部に比べ損傷がでにくいと予想された隅各部上（柱頂部）としました．

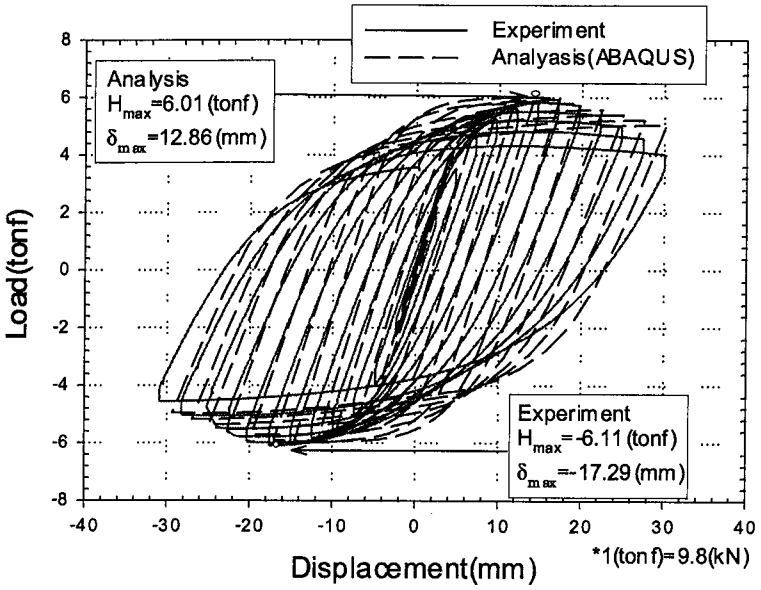
【討議19-2】　後藤芳顯（名古屋工業大学）

１．図－３には実験と解析結果について包絡線を比較されていますが，可能なら履歴曲線自体の比較も示してください．

２．解析で構成則における硬化則として混合硬化則を用いられていますが，理由は何ですか？また等方と移動の硬化係数の比率はどのようになっていますか？

【回答19-2】

1．履歴曲線を下記に示させていただきます．



繰り返し載荷の履歴曲線

2．硬化則として混合硬化則の他にも等方硬化則と移動硬化則を用いた解析も行なっており，ここでは実験結果に最も良く一致した混合硬化則の結果を示させていただきました．また，等方と移動の硬化係数の比率でございますが，汎用有限要素法プログラムABAQUSのデフォルト値となっております．

【討議19-3】　前野裕文（名古屋高速道路公社）

縮尺率が1/17程度の模型であり，板厚も1.6mm，2.3mmと比較的薄く，溶接施工性（変形，残留応力）からも問題はなかったのでしょうか？

【回答19-3】

本実験供試体の製作においては，断面幅寸法の1/200程度の初期変形に納まるよう溶接脚長を4mm程度としたすみ肉溶接により慎重に組み立てを行いました．残留応力の計測は行なっておりませんが，実験結果と一般に用いられている初期変形と残留応力を考慮した解析結果が比較的良く一致しておりますので，大きな問題はなかったと考えております．

(Ⅱ-1)　せん断特性

座長：西村宣男，副座長：陵城成樹

(20)　局部座屈と隅角部のせん断変形を考慮したはり要素による鋼製橋脚のPushover解析

著者：小澤一誠，王慶雲，後藤芳顯

本研究では，鋼製橋脚のPushover解析への適用を目的として，はり要素により局部座屈と隅角部のせん断変形を考慮しうる実用的な解析手法の提案を行い，その提案手法の打妥当性の検証をシェル要素を用いた解析結果と比較することにより行っている．実設計で適用性を考慮して検討されていることから，実際には多種多様な構造諸元を有する鋼製ラーメン橋脚への適用のため，今回検討された以外の構造諸元を有する代表的なモデルについても提案手法の妥当性の検証を行うことが望まれる．

【討議20-1】　前野裕文（名古屋高速道路公社）

実務設計に適用できる論文であり，非常に有用性を感じますが，軟化構成則を用いる区間をどのように設定するのでしょうか？また，はりのせん断座屈の影響は考慮しているのでしょうか？

【回答20-1】

局部座屈が生じる可能性のある箇所が軟化型構成則を導入した座屈要素を適用する区間になります．すなわち，単柱式鋼製橋脚ではコンクリート無充填の場合は基部，コンクリート充填では中詰めコンクリートの直上，さらに変断面の場合は断面変化点直上が軟化型構成則を用いる場所の候補になります．ラーメン橋脚の場合は，単柱式鋼製橋脚で述べた個所以外に隅角部の隣接部（はりや柱）が対象とります．このような場所における圧縮補剛板のパラメータに応じた座屈要素長を本論文で示した算定式で求めることで，軟化型構成則を適用する要素区間（座屈要素長）が確定します．複雑なラーメン構造の場合は，あらかじめ予備解析を行って塑性化を考慮する部材を特定しますので，この予備解析によって局部座屈の可能性のある部位全てに軟化型の構成則を適用すれば良いと考えます．軟化型構成則は局部座屈発生前から局部座屈による局所化発生後に至る広い領域を扱えますので，たとえ予想に反して局部座屈が生じなくても問題は生じません．

はりのせん断座屈については，圧縮・引張り剛性を低下させることで弾塑性域でのはり・柱のせん断変形の影響を考慮しておりますので，２次的にせん断座屈の影響が考慮されることになります．ただ，本解析はあくまで，はり・柱の直応力による局部座屈挙動が鋼製橋脚の挙動に与える影響の考慮を目的としたものですので，はりのせん断座屈の影響が支配的な場合の精度については保証されません．

(21) 局部座屈を考慮した箱形断面鋼製橋脚の水平耐力とせん断応力の再分配

著者：横田敏広，田中宏明，小玉乃理子，依田照彦

本研究ではFEM解析による鋼製橋脚の耐震性能評価にかわる手法として，箱形の鋼製橋脚のPushover解析における水平耐力および水平変位を予測できるようにファイバーモデルに代表されるσ－εモデルを改良し，そのモデルの妥当性について検討を行っている．その中で，局部座屈の影響を考慮するため軟化型の応力－ひずみ関係を設定し，その応力－ひずみ関係を使用した梁要素による解析結果と硬化型の応力－ひずみ関係を使用したFEM解析でともにPushover解析を行い，本論文で提案するσ－εモデルの妥当性の検証を行っている．論文(22)と同様，実際には多種多様な構造諸元を有する鋼製ラーメン橋脚への適用のため，今回検討された以外の構造諸元を有する代表的なモデルについても提案手法の妥当性の検証を行うことが望まれる．

(22) 鋼製箱形断面はりのせん断耐荷力実験

著者：森下宣明，前野裕文，岡本隆，中村信秀，青木徹彦，宇佐美勉

本研究は，鋼製ラーメン橋脚の合理的な設計法を確立するため，ラーメン橋脚の梁部材を対象とした構成箱形断面はりのせん断耐荷力実験をおこない，その耐荷力特性について報告を行っている．ラーメン橋脚の梁部材の耐力評価を行った実験は橋脚に比べて非常に少ないことから，梁部材の耐力特性を評価する上で貴重な研究と考えれられる．今後，本研究の研究成果やその他の梁部材の耐力特性に関する研究成果，さらにこれまでの鋼製橋脚の耐震性能評価に関する研究成果等を基にして，鋼製ラーメン橋脚の合理的な耐震性能評価手法が提案されることが望まれる．

【討議22-1】　依田照彦（早稲田大学）

1．通常に利用されているラーメン橋脚のはり部に地震時せん断座屈が生じる可能性は大きいのでしょうか？

2．ラーメンのはり部にせん断座屈が生じるとはり部に鉛直変位が生じますが，この鉛直変位が使用限界状態に影響することはないのでしょうか？

【回答22-2】

1．兵庫県南部地震において，ラーメン橋脚梁部にせん断座屈が生じた事例があるように，柱間隔が短くはり部材のせん断幅厚比パラメーターが大きい橋脚では，はり部材にせん断座屈が生じ橋脚の終局耐力が低下することがあると思われます．

2．実務設計では，レベル２の地震力では梁は終局耐力に至らないように設計されていますが，やむを得ずはり部先行型とした場合，その終局状態ははり部腹板のせん断耐力が２割程度低下した時点としています．この際の鉛直変位は５０ｍｍ程度であり，その影響は上部構造の不等沈下や伸縮部での変形につながると思わ

れますがその量は上述したように少なく緊急車両の走行等に影響のない範囲と考えております.

(23) 鋼製箱形断面はりの繰り返しせん断特性に関する非線形数値解析

著者：Praween Chusilp, 葛漢彬, 宇佐美勉, 森下宣明, 青木徹彦

本研究は，論文(22)で行った鋼製箱形断面はりの繰り返し弾塑性解析を行い，その解析結果をとりまとめたものである．その中で，鋼材の構成則として修正２曲面モデルを用いた繰り返し弾塑性解析結果と論文(22)の実験結果との比較を行い，解析手法の妥当性について検証を行っている．鋼製ラーメン橋脚の梁部材の耐荷特性を把握するには，実験だけでなく解析により補完していくことが必要であることから，今後，構造パラメータが梁部材の耐荷特性に与える影響について幅広く検討していくことが望まれる．

(Ⅱ-2)コンクリート充填柱，既設橋脚の耐震補強法

座長：山口栄輝，副座長：森下宣明

(24) 充填コンクリートの構成則の開発とコンクリート部分鋼製橋脚耐震解析への応用

著者：K.A.S. Susantha，葛漢彬，宇佐美勉

コンクリートを充填することで，鋼製橋脚のじん性が大きく向上することは多くの実験により検証されているが，本論文では，はり要素を用いた比較的簡便な解析でコンクリート充填鋼製橋脚の耐震性能を評価する手法を提案している．実務設計にも適用可能な段階にきているように思われる．

(25) 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

著者：小野潔，西村宣男，高橋実，野中哲也，坂本佳子

論文(25)と同様に，本論文では，はり要素を用いた比較的簡便な解析でコンクリート充填鋼製橋脚の耐震性能を評価する手法を提案している．実務設計にも適用可能な段階にきているように思われる．

【討議25-1】　依田照彦（早稲田大学）

コンクリートを充填した円形断面鋼製橋脚の許容ひずみの定義式 $\varepsilon_a/\varepsilon_y=5.5$（$\varepsilon_a$：許容ひずみ，$\varepsilon_y$：降伏ひずみ）は，矩形断面の場合の $\varepsilon_a/\varepsilon_y$ に比べて安全側になっていることはないのでしょうか？すなわち安全性評価式として安全性レベルに差がないのでしょうか？

【討議25-1】

実験の許容変位に対応する許容ひずみの平均値は矩形断面コンクリート充填柱で7.32（表-３（その１）），円形断面コンクリート充填柱で5.86（表-３（その２））となっております．本論文では，この表-２の許容ひずみの平均値を基に式(5)および式(6)の許容ひずみを設定を行いましたが，その際，矩形断面に比べて円形断面の実験供試体数がかなり少なく不確定要素も多いと考えられることから，表-２の許容ひずみの平均値に対して円形断面の方が矩形断面に対して若干安全側になるように配慮して式(5)および式(6)の許容ひずみの値を決定しました．

(26)　変断面を有する既設円筒鋼製橋脚の靭性向上の為の補強法

著者：櫻井孝昌，忠和男

本論文は鋼板貼付けによる鋼製橋脚の補強法を取り上げ，鋼板間に隙間を設けることで構造ヒューズを作り，耐荷力をそれほど上げずにじん性を向上させる方法について検討している．たいへん興味深い研究である．

【討議26-1】山尾敏孝（熊本大学）

1．補強に用いている「ヒューズ板」の形状寸法（幅，高さ，板厚）の適当な決定法はあるでしょうか？

2．外側に補強板を貼り付ける方法は美観上問題はありませんか？

【回答26-1】

1．現在のところ確定的な決定法は求まっていません．一般的には以下のように考えています．

①補強による水平耐荷力の上昇が10%以下になること．

②補強板（ヒューズ板）の板厚は，過度に鋼管の剛性を上げないため，本体鋼管以下とする．

③補強板の円筒軸方向の長さは，ヒューズ部で局部座屈を発生させ，発生した局部座屈の進展を押さえるのに必要な長さとする．

④本研究で用いた補強板のサイズは以下の通りである．（本論文p204　図-2参照）

- 円筒の横断面上で2軸対称とし，1箇所に4枚使用した．
- 局部座屈発生部の1枚の補強板は中心角30度(弧長569mm)，軸方向長さ2000mm，板厚28mmとし，この補強板の中にヒューズ部W（ただし，このW部分では補強板は貼り付けていない）を設けた．
- 橋脚中央部の断面変化部における補強鋼板は，この部分から局部座屈が発生するのを防ぐために付設した．そのサイズは中心角30度，軸方向高さ2000mm，板厚21mmを用いた．

2．美観上好ましいとは言えませんが，施工が容易であると言う利点があります．平成9年8月に日本道路協会から出版された「既設道路橋の耐震補強法に関する参考資料」p5-43でも，隙間空け鋼板巻き立て補強の中に，短冊鋼板補強として例示されています．補強板の形状を細長くして，鋼管側面上の補強鋼板の数を増やし，美観を改善する方法も考えられます．

(27)　鋼板貼付けによる既設円筒鋼製橋脚の補強法に関する実験的研究

著者：忠和男，櫻井孝昌，後藤芳顯

論文(26)と同様，本論文は鋼板貼付けによる鋼製橋脚の補強法を取り上げ，鋼板間に隙間を設けることで構造ヒューズを作り，耐荷力をそれほど上げずにじん性を向上

させる方法について検討している．たいへん興味深い研究である．

【討議27-1】中島章典（宇都宮大学）

鋼板を貼り付ける場合，そのような方法で貼り付けるのでしょうか？また，もし溶接で貼り付けて繰返し回数が多くなった場合，疲労が心配になることはないでしょうか？

【回答27-1】

①鋼板貼付は，溶接で行いました．

②今回の実験では，５回繰返載荷を行いましたが，繰返により亀裂等が生じることはありませんでした．

(28) 既設鋼製ラーメン橋脚の地震時保有水平耐力に関する解析的検討

著者：秦健作，足立幸郎，吉村敏志，陵城成樹，内田諭，永田和寿，渡邊英一

論文(24)～(27)が単柱形式の橋脚を対象としたものであるのに対し，本論文ではラーメン橋脚を扱っている．単柱形式橋脚との大きな違いは，変形に伴い軸力が変動することであり，この点を解析で考慮しなければ，全く異なった損傷イベントになってしまうという解析結果には注意する必要があろう．

(Ⅱ-3)　耐震設計法，弾塑性解析

座長：杉浦邦征，副座長：足立幸郎

(29)　ファイバーモデルを用いた鋼製橋脚の耐震性能評価手法

著者：Andrew Caetano，小野潔，西村宣男

この論文は，鋼製橋脚の耐震性能評価指標として局所ひずみおよび部材断面の曲げ曲率を取り上げ，軸力および地震荷重の繰り返し作用下において，設定した限界状態に対応した許容変位と最大水平荷重の算出精度の検討を行っている．ファイバーモデルを用いた数値実験と既存の載荷実験結果の比較に基づき，ひずみ規範に比べて曲率規範の方が，軸力および地震荷重の繰り返し作用の影響を受けず，限界状態を精度良く再現できることを示している．しかし，一般的に軸力の影響が顕著に現れない最大耐荷力点までを限界状態と設定する現行の耐震設計手法におけるファイバーモデルの実用性を示す論文に止まり，将来の性能照査設計を考慮した場合，構造物の最終崩壊に至るまでの挙動評価に有効な損傷指標，例えば部材損傷を明確に示す部材の残存縮み量等との関係の定量的評価が今後望まれるところである．

(30)　鋼製矩形断面橋脚の座屈パラメータと終局ひずみの関係式に関する研究

著者：河藤千尋，運上茂樹

この論文は，シェル要素を用いた弾塑性有限変位解析に基づき矩形断面の鋼製橋脚に対して断面を構成する板パネルの幅厚比パラメータ R_f のみによる鋼製橋脚の変形性能評価の限界を示すとともに，補剛材間の板パネルの幅厚比パラメータ R_R および補剛材自身の幅厚比パラメータ R_{rib} を組み合わせて，終局ひずみを推定する回帰式を提案し，補剛材の寸法試算といった実務に有益な情報を提供している．しかし，設計式への反映に関しては，結果の信頼性の向上，適用範囲の明確化を目的として，補剛材剛比の変動幅をより現実的な値（約 1.0 など）とする，補剛材の細長比パラメータ等を取り入れた他の既存の回帰式との比較検討等が望まれるところである．

【討議30-1】　崎元達郎（熊本大学）

局部座屈を考慮できない骨組解析で終局点を決めるのに（ある長さの平均ひずみと比較して）その判定式を用い良いのか？その際は，局部座屈による板曲げひずみは不定であるのでそれを導入して定めることには疑問がある．局部座屈領域のshorting（板部材の短縮）を用いるべきではないか？

【回答30-1】

この回帰式に用いているひずみ値は，ご指摘の板部材の短縮を表現している，1）

圧縮フランジの鉛直変位から求めたもの，本論文で用いた，２）基部から一定領域にある圧縮フランジのシェル要素の軸ひずみから求めたものの両者と，はり要素（ファイバーモデル）の断面の圧縮フランジに生じる軸ひずみを高さ方向に平均化したひずみ値と比較して設定したものである．この比較でわかったことは，基部から高さ方向に沿ったひずみ分布はある領域（高さ）以降はシェルモデル，はり要素で求めたものとほぼ同じになる．またこれらの値が異なる領域が局部座屈の影響が大きい領域と考えることができる，ということである．本解析では，はりモデルのひずみ分布が，上記２）の基部から一定領域にある圧縮フランジのシェル要素の軸ひずみから求めたものにより近似していたため，こちらを採用した．これは，はり要素とシェル要素の平均ひずみ値はともに要素の軸ひずみに基づいて求めているためであると考えられる．これらの詳細は文献６）を参照されたい．

この方法は，シェルモデルとはり要素の平均ひずみ値がほぼ同じになる高さ（領域）で判定していること，その高さは局部座屈の影響が大きい範囲ではないこと，また文献６）より最大荷重に達するまでは局部座屈の影響は小さいと判断できることなどから，この方法で最大荷重，そのときの水平変位を求めることは問題ないと考える．

(31)　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研究

著者：森口智聡，小野潔，西村宣男

この論文は，材料強度等のばらつきが鋼製橋脚の耐荷力と変形能に及ぼす影響を，既存の評価式と M-φ 関係に基づく評価式を用いて検証した成果を示している．耐荷力および変形能の評価精度は，材料のばらつきよりも評価式自体の精度に大きく左右されていることを示しており，評価式のバックデータとなっている実験結果等に，材料のばらつき以外の不確定要因が多く混在していることを示している．また，耐力評価式の精度に比べて変形能の評価式の精度が劣ることを示しているが，断面形状でほぼ決まる耐力であるのに対して，部材軸方向への塑性域の進展等の影響をも受ける変形能が必然的にばらつきが大きくなることと整合する結果を提示しているに止まっている．

(32)　座屈拘束ブレースの繰り返し弾塑性解析

著者：加藤基規，宇佐美勉，葛西昭

この論文は，建築鋼構造で注目されている座屈拘束筋かい材を土木構造物の制震部材としての適用性を弾塑性有限変位解析により検証したものである．筋かい材とそれ覆う座屈拘束材間の挙動を表現するための解析モデルを構築するとともに単調載荷お

よび繰り返し載荷による筋かい材の荷重－変形の履歴性状と座屈モードを解析的に明らかにし，既往の実験結果との高い整合性を示している．特に，引張力および圧縮力下において対称な履歴性状が得られ，非常に安定したエネルギー吸収能力を有することは制震部材としては有効で，筋かい材の性能を規定するパラメータの特定や最適な構造寸法の指針，本制震材の土木構造システム全体に対する耐震性能評価が望まれるところである．

(33)　鋼製円筒橋脚の有限要素解析に関する一考察

著者：山口栄輝，永松寿隆，南野能克，後藤芳顯，久保喜延

この論文は，鋼製橋脚の性能評価において多大な経費・時間のかかる実験的検討の代役として将来を有望視されているシェル要素を用いた複合非線形有限要素解析の解析精度を確保するための要素分割に関する留意点を円形断面を例として取り上げ検討している．特に，大きな曲げモーメントの発生する橋脚柱基部の細分割の指針，それ以外の部位での梁要素の適用性を提示している．結果的に，最大耐荷力が分割数に大きく影響されない一方で，最大耐荷力点以降の劣化性状がその分割数に大きく影響を受ける結果を示し，細分割の目安として，部材軸方向には断面直径の半分程度を 30 分割，その円周方向の分割を 32 分割程度とすることが，誤差 3 %を許容限として工学上有効であると結論付けている．しかし，限られた径厚比および細長比を有する橋脚のみを対象としているため，今後の継続的なデータ蓄積が望まれる．

【討議33-1】

要素分割数の適切な数の決定法について，一般的（汎用性のある）決め方はないのでしょうか？

【回答33-1】

要素分割についてのガイドラインのようなものを作成できればと検討中ですが，まだ公表できる段階には至っていません．ご了承ください．