

## 8. 橋梁耐震

とりまとめ：[山尾敏孝] (熊本大学)

論文題目：“進行性破壊を考慮したトラス橋の地震応答解析”

著者：野中哲也，岩村真樹，宇佐美勉

掲載：Vol.54A, pp.293-304, 2008年3月

## ◆討議 [林川俊郎 (北海道大学)]

1. 図-18において、トラス部材の損傷により水平固有振動がやや長周期化することは、イベント①からイベント②間の応答変位により理解できますが、イベント②→③→④間の応答変位は単純に全体構造系の長周期化と言えるでしょうか。対象橋梁が構造不安定に向けた崩壊過程を追跡しているのではないのでしょうか。

2. 本論文で提案された動的応答解析は、本震により損傷を受けた橋梁に余震によるさらなる損傷付加を評価することが可能でしょうか。また、腐食により断面欠損した部材を有する橋梁の耐震性能を評価することは可能でしょうか。

## ◆回答：

1. ご指摘のように、イベント②→③→④間の応答変位は、対象橋梁が構造不安定に向けた崩壊過程を追跡しているようにもとれますが、長周期化されているのも事実です。両方が組み合わさった現象であるとも考えられます。

2. 本解析は、部材が破壊したと判断された時点で、解析はストップし構造全体の応力状態が保存され、部材を消去してから再スタートさせます。地震の途中ではなく、地震終了後にも応力状態が保存できますので、再スタートさせるときに、余震の波形を採用すれば、ご質問の(本震により損傷を受けた橋梁に余震によるさらなる損傷付加を評価する)ことは可能です。また、ご質問の腐食につきましては、地震の途中で腐食状況(断面欠損)は変化しませんので、解析をスタートさせるときの入力データにおいて、腐食している部材に対して断面欠損(ファイバー要素の板厚を薄く)すれば可能です。

## ◆討議 [大塚久哲 (九州大学)]

本論文の破壊とは、どのような部材の破壊を想定されているかご説明下さい。

## ◆回答：

板構造のせん断による破壊やコンクリートの塊の破壊なども含む広範囲の破壊は、本手法では想定しておりませ

ん。本論文のトラス構造のような骨組構造における曲げ圧縮部材の破壊を想定しております。

## ◆討議 [堺 淳一 (土木研究所)]

本解析では、破壊した部材を消去するという解析手法を提案されているが、破壊された部材の剛性、耐力をともにゼロとするように非線形履歴モデルで与えるならば、通常の解析手法の範疇で解析できると考えられるが、この手法と提案手法では何が異なるのか？

## ◆回答：

ご指摘のように破壊された部材の剛性、耐力をともにゼロの状態にする非線形履歴モデルが考えられますが、その場合、まず、耐力をゼロにするため、剛性を負の勾配にする必要があります。数値解析上、その負の勾配を急にすると構造が不安定になり、解けないことがよくあります。そのため、しかたなくその負の勾配をある程度緩やかにするような処理をしています。しかし、その勾配が緩やか過ぎると、実際の破壊と異なる現象になってきます。それに対して、本提案手法は、負の勾配をもち、一気に勾配(剛性)がなくなるようなイメージです。本提案手法の方が、より現実に近い現象が表現できると考えます。これについては、本論文の参考文献6)(筆者らの論文)の図-5に示しておりますので、ご参照ください。

論文題目：“通信専用橋の耐震性能評価方法”

著者：馬場進，鈴木崇伸，森敦，田中宏司

掲載：Vol.54A, pp.305-314, 2008年3月

## ◆討議 [山尾敏孝 (熊本大学)]

被災状況についての調査結果の件数が非常に少ないように思えます。実際にはこれ以外にまだまだたくさんあるのでしょうか？

## ◆回答：

専用橋の地震被害データについては被災報告残っているものを使用しました。言い換えれば、報告に残っていない被災データについては記載できていません。特に兵庫県南部地震のデータは地震の規模から考えても不完全であると思われます。今回の発表では被災データから専用橋の弱点箇所の抽出を行っています。被災データが完全であれば、弱点箇所の特定はより精度の高いものになる

はずですが、被災傾向を捕まえることは可能と判断して使用しました。

論文題目：“Curvature effect on seismic response of curved highway viaducts equipped with unseating cable restrainers”

著者：Carlos Mendez Galindo, Toshiro Hayashikawa, Daniel Ruiz Julian

掲載：Vol.54A, pp.315-323, 2008年3月

◆討議 [大塚久哲 (九州大学)]

Please show the reason of span arrangement you decided for your analytical model.

◆回答：

The widely recognized susceptibility to earthquake damage of curved bridges is even more amplified with the rupture of continuity of the superstructure at expansion joints. Therefore, the highway viaduct considered in the analysis is composed by a three-span continuous seismically isolated section connected to a single simply supported non-isolated span. Such configuration has been selected in order to analyze the overall structure response under critical demands in the event of a severe earthquake. Steel elements were chosen due to their wide and common use in Japan.

◆討議 [塚 淳一 (土木研究所)]

1. Failure scenario (mechanism) is not clear. Generally, bearings first fractures, displacement of the deck increases, and then, unseating of the deck eventually occurs. If such a large displacement of the deck occurs without the fracture of the bearings, damage of the column with fixed bearings likely exceeds the ultimate limit, which causes the collapse of the bridge column, which may not be the case the current seismic design codes considers.

2. Modeling of the bearings is not clear. If the dynamic analysis is conducted for curved bridges under multi-directional excitations, modeling of the bearings in transverse direction is important. This is because the deck rotates due to pounding of the decks, and the response displacement in transverse direction must be one of the main causes of the unseating of curved bridges.

3. Seismic performance level of the analyzed bridge is not clear. 0.4 m of the seating length does not satisfy the current design requirements.

◆回答：

1. The overall three-dimensional seismic response of the viaduct is investigated in detail through non-linear dynamic response analysis. The viaducts have been designed according to the current Japanese specifications. Particular emphasis has been focused on the expansion joint behavior due to the extreme complexity associated with connection between isolated and non-isolated sections in curved viaducts. Due to the significant number of parameters included in this study, we decided to emphasize only in the seismic performance of the expansion joint. Therefore this paper is based on the maximum displacements and impacts observed in the connection between the isolated and non-isolated sections. In further studies we are planning to include the results regarding the seismic response in all the structural elements, not only of the fix support but also in the LRB bearings installed in all the piers.

2. In this study, the displacements of LRB bearings have been partially limited for all the viaducts, through the installation of lateral side stoppers. Such stoppers limit the out-plane radial displacements for all isolation units, representing the most commonly used method of bearing restraint in Japan.

3. In this study, even though the JRA specifications consider a minimum unseating limit of 0.70 m, a limit of 0.40 m has been fixed in order to determine the high unseating probability for existing bridges with narrow steel pier caps that provide short seat widths.

論文題目：“鋼斜張橋の耐震補強検討において主桁が塑性化した場合の基礎的検討”

著者：大塚久哲, 山平喜一郎, 小宮有貴

掲載：Vol.54A, pp.324-330, 2008年3月

◆討議 [林川俊郎 (北海道大学)]

鋼斜張橋などの長大橋の耐震補強に対する基本的な方針について考え方を示して下さい。また、長大橋の耐震補強シナリオ、対応策等がありましたら、その考え方を示して下さい。

◆回答：

新設橋梁と同程度の耐震性能を満足するように、耐震補強することが望ましいことは当然ですが、現実的には無理な場合があり、個別に管理者がある程度の判断を示してよるしいのではないかと考えます。長大橋の場合、部材補強の他、ダンパー使用によるエネルギー吸収、支承取り替えによる構造系の変更などの対策が取られているようです。

◆討議 [松田宏 (JIP テクノサイエンス)]

1. FEM の静的解析時に、端部の鉛直方向を拘束と判断した理由は？
2. ファイバーモデルでの回転角等を境界条件にもちこんで解析して動的挙動をとらえるのは難しいでしょうか？

◆回答：

1. 塑性変形による変位量を検討対象とし、当該解析区間で塑性変形が生じると考えれば十分と考え、解析区間の端部は鉛直変形なしとしました。
2. 局部変形の絶対量が必要な場合は、そのような解析が望ましいと思います。

◆討議 [宇佐美勉 (名城大学)]

1. 残留変位を check して安全性、使用性照査を行うのは良いと思われませんが、絶対量よりは残留変位を幅で除して無次元化した値 (回転角) が製作誤差以内に納まるという基準の方が構造物の寸法に左右されないため良いと思われませんか？
2. ただ、残留変位を簡易な構成則を用いて数値計算だけから正確に求める事の難しさがあります。従って、道路橋示方書の橋脚の残留変位を推定するように、最大応答変位から残留変位を推定する方法の方が精度が良いかもしれません。最も、この方法も精緻な構成則を用いて多数の数値計算から、最大応答変位—残留変位関係の経験式を導いておく必要があります。

◆回答：

1. ご指摘の様な考え方も、主観的な判断を入れないためにはよいと思われまます。
2. 残留変位を求める簡易な算定式が必要だとは思いますが、いろいろなパラメータがあつて計算もかなり必要になりますので、今後の研究に待ちたいと思います。

論文題目：“RC橋脚の振動台加震実験における応答変位の計測精度の評価”

著者：堺淳一，運上茂樹，右近大道  
掲載：Vol.54A, pp.331-342, 2008年3月

◆討議 [山尾敏孝 (熊本大学)]

変位計設置しているフレームの振動により応答に誤差が入っているようですが、動的実験でフレームの剛性の決め方があるのでしょうか。

◆回答：

本実験では、上部の桁とおもりを橋脚模型上と桁端部の支承により支持するセットアップを用いている。変位計を設置したフレームは、桁端部の支承を設置したフレームの一部であるため、フレームの剛性は、桁を支持するという構造的な要求性能から決定されている。なお、計測用に別途フレームを用意する場合には、フレームの固有周期を対象供試体の固有周期から十分異なる領域となるように設定することが必要と考えられる。

◆討議 [横川英彰 (オイレス工業)]

加震実験で用いているフレームに関して解析等で固有振動数の確認等されているのでしょうか？

◆回答：

本研究では、実験においてフレームの固有振動数を評価するに十分なデータが得られたため、フレームの固有振動数に関する解析的な検討は行っていない。

◆討議 [池谷純一 (清水建設)]

ビデオ撮影により、構造物各部の変位量を測定したとのことですが、映像からどのような手法を用いて変位量を算出したのかをお教え下さい。

◆回答：

ビデオ撮影による変位量の測定に関しては、論文中に示したとおりであり、球形の反射ターゲット像を捕捉する手法としてサークルフィッティング法を、3次元化する手法として GSI 技法を用いている。詳細は参考文献 12) を参照されたい。

論文題目：“段落し部を有するPC橋梁の損傷分析”

著者：幸左賢二，津吉毅，加藤啓介，濱本朋久  
掲載：Vol.54A, pp.343-352, 2008年3月

◆討議 [堺 淳一 (土木研究所)]

1. 対象橋脚の段落し部の曲げせん断耐力比を示して頂きたい。例えば、道路橋示方書 V 耐震設計編や土木学会コンクリート標準示方書をもとにせん断耐力を求めると、曲げせん断耐力比はどのようになるのか？
2. 実際に破壊が生じた位置と、最大応答曲率が生じた断面の位置が一致していない。定着長を  $D/2$  としたことの影響が大きいように見受けられるが、被災解析における適切な定着長の考え方を示して頂きたい。
3. 橋脚部の要素のサイズは断面直径のどの程度であっ

たのかを示していただきたい。また、「段落し部での挙動を詳細に分析するため、段落し部で細かく分割した」とあるが、細かくした要素のサイズは断面直径のどの程度であったのかも示していただきたい。解析における最大曲率は、解析モデルの要素長に依存する。被災分析における適切な要素長の考え方を示して頂きたい。

◆回答：

1. コンクリート標準示方書で照査すると、曲げせん断耐力比は0.8となります。一方、曲げ変形を考慮したブリスリー式で照査すると、曲げ降伏後のせん断破壊となります。損傷形態的にはブリスリー式に対応しています。
2. 詳細は今後検討していく必要がありますが、基部と段落し部の損傷程度からは定着長はD/2とした場合が一致した損傷状況となっています。ひびわれ位置と最大応答曲率の関係については、ご指摘のように完全には一致していないが、ひびわれ損傷範囲(0.5D)という点で見ればほぼ一致しているとも考えられる。
3. 高さ方向に50分割、D/4程度の要素長に分割しています。

◆討議 [武田篤史 (大林組)]

1. モーメントシフトについてどのように考えたらよいのでしょうか？
2. 支承の鉛直軸まわりの接合条件を教えてください。

◆回答：

1. 曲げについてはモーメントシフトは考慮せず、曲げ降伏後のせん断損傷に対して、モーメントシフト長Dを考慮する方法が一般的と考えています。
2. 支点上は固定としています。

論文題目：“炭素繊維シートとCFアンカーを用いた耐震補強工法におけるCFアンカー扇部の接着耐力”

著者：池谷純一、塚越英夫

掲載：Vol.54A, pp.353-359, 2008年3月

◆討議 [松田宏 (JIP テクノサイエンス)]

1. コンクリート下地の粗度はパラメータには考慮しているのでしょうか？
2. 高橋脚のような場合、どのような範囲に設置されるのが有効か検討していますか？

◆回答：

高橋脚のどのような範囲に設置するのが有効かは検討していません。あくまでもCFアンカーは、炭素繊維シー

ト端部の定着材料、という位置付けでの検討しか行っていません。

◆討議 [武田篤史 (大林組)]

下地の違いによって、低減しなければならない理由は何でしょうか？

◆回答：

実験結果を反映させたものです。コンクリート下地試験体では、CFアンカー剥離前にCFアンカーが接着されている炭素繊維シートがコンクリートから剥離するのに対し、鋼板下地試験体では炭素繊維シートが鋼板から剥離することなく、CFアンカーが炭素繊維シートから剥離します。この破壊過程の違いにより、最大耐力に差が生じるため、低減をかけています。

◆討議 [小林薫 (JR 東日本)]

実橋脚に適用する場合、下地やコンクリートの付着強度の信頼性が確認できないと考えられる。このような場合は、実橋脚で付着性能試験を実施して適用すべきと思うが、それについてどのように考えるか？

◆回答：

実施工時の現場管理試験として、CFアンカー埋込部の定着耐力は実橋脚を用いて確認しています。しかし、扇部接着耐力確認試験は、実橋脚を用いて実施するのが困難であり、別途、現場で作製した試験片を用いて実施しています。実橋脚に貼り付けられた炭素繊維シートの引張強度の確認は、橋脚からはぎ取った試験片で行ってはおらず、別途、作製した試験片で実施されているので、これに準拠しています。

論文題目：“深い軟弱地盤にある斜杭基礎橋脚の地震時挙動に関する考察”

著者：阿知波秀彦、関雅樹、岩田秀治、吉田幸司、武田篤史、小長井一男

掲載：Vol.54A, pp.360-371, 2008年3月

◆討議 [大塚久哲 (九州大学)]

FEM要素と地盤ばねのモデル化の説明とその理由(根拠)について教えてください。

◆回答：

地盤は平面ひずみ要素、構造物は主に梁要素でモデル化しておりますが、本解析の特徴はそれらを節点共有させ

ず、地盤バネを介して結合している点です。地盤と構造物の節点を共有すると、以下のような問題があります。

①構造物と地盤がまったく同じ変位となるため、地盤のせん断ひずみが急なところで、実際以上に大きな局所曲げモーメントが構造物に発生する。②構造物の相互作用がある地盤は奥行き方向には構造物近傍だけだが、解析においては奥行き方向全体の地盤が構造物と相互に作用する。③構造物と地盤の周面摩擦が切れることがなく、杭の軸力は杭頭でほとんど0となり、斜杭軸力を適切に評価できない。

なお、地盤バネとしては以下の6種類を考慮しました。  
①杭の前面バネ、②杭の周面バネ、③杭の先端バネ、④前背面シートパイルの前面バネ、⑤前背面シートパイルの周面バネ、⑥側面シートパイルの周面バネ。

以上のバネ定数は鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物を基本として定めております。詳細につきましては論文を参照ください。

◆討議 [松田宏 (JIP テクノサイエンス)]

シートパイル補強の有無の影響が大きいようですが、設計する上での問題点はありますか？また、設計体系は確立されていますでしょうか？

◆回答：

本研究では、シートパイル打設工法による地震時の効果を把握することに主眼を置いており、ディテールについては、今後の課題です。具体的には、連結梁・コーピング・シートパイルの照査方法、シートパイルの凹凸による周面摩擦挙動、シートパイル継手の挙動などです。なお、設計体系としては確立されているわけではありませんが、非常に複雑な応答をするため、本解析のような動的解析によって照査せざるを得ないと考えています。

◆討議 [小林薫 (JR 東日本)]

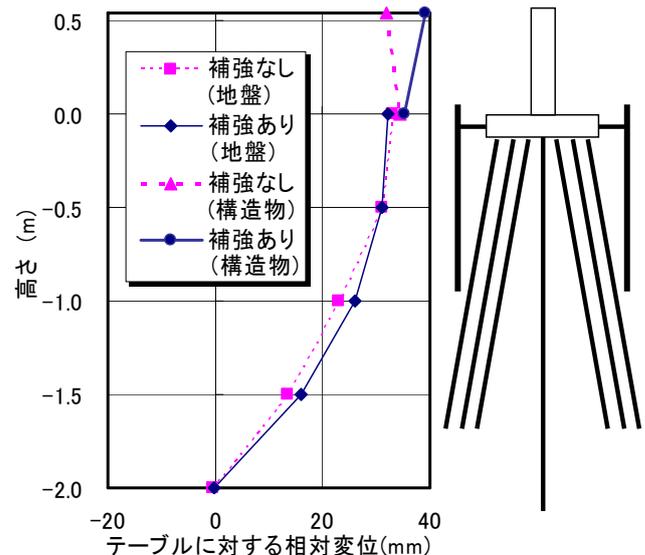
実験結果として、橋脚天端の応答変位が、補強あり、なしでほとんど変わらなかった理由は何か？

◆回答：

本論文では、表-2 において L2 スペクトルⅡでの最大応答値を示しております。表-2 の各相対変位値および図-9 から、補強により「くの字のモード」が解消されていることがわかります。表-2 の杭曲げモーメントの値を参照しますと、補強によりモーメント値は小さくなっていることが確認できます。補強なしの場合は、「くの字モード」により橋脚天端ではフーチングより小さく変位していたものが、補強により「くの字モード」が解消されると、橋脚天端はフーチングより大きく変位するようになります。

参考で正弦波 2Hz により加振した結果を示します(参考図)。L2 スペクトルⅡの場合と比較して、より明確に補強によって「くの字モード」が解消していることがわかり、それに伴い橋脚天端の応答変位値も補強により大きくなっていることがわかります。

L2 スペクトルⅡの場合と正弦波 2Hz の場合とで、橋脚天端の応答変位値の補強による変化において差が生じている理由として、地震波の特性、および土槽と模型のスケールのあるものと思われる。



参考図 変位分布 (正弦波 2Hz)