

7. 橋梁耐震

とりまとめ：葛 漢彬 (名城大学)

論文題目：“局部座屈が生じた円形断面鋼製橋脚の修復方法に関する研究”

著者：嶋口儀之・鈴木森晶・太田樹・青木徹彦
掲載：Vol.58A, pp.277-289, 2012年3月

◆討議 [宇佐美勉 (名城大学)]

コンクリート充填の場合、過去の研究の知見から、橋脚のダクティリティーを増すためには、コンクリートはダイアフラム等で橋脚内部に閉じ込めるのが有用であることが判っています。従って、提案された方法の内、コンクリート上部にジベルを設けるのが有用であると考えられますが、コンクリートの拘束を十分にすることが重要で、ジベルの強度と剛性の設計法が重要と考えられます。実験のジベルはどのように設計されたのでしょうか。

◆回答：ジベルの設計については、矩形断面鋼製橋脚のダイアフラムと同様の考え方をいたしました。ただし、施工性の観点から、今回は75×75×9mmのアンクル材を長さ約50mmに切断し、ダイアフラムと同程度の断面積となるように配置しました。

◆討議 [家村浩和 (近畿職業能力開発大学校)]

今回の補修の目的は、暫定的な利用のためか、或いは長時間の再利用のためでしょうか？橋脚の高さが短くなると、長期の再利用には適さないのではないのでしょうか？

◆回答：今回行った修復は、基本的には応急復旧であり、緊急車両の通行などの暫定的な利用を考えています。橋脚の高さが変わった場合などの長期的な利用については、支承部の嵩上げや別途対策が必要であると考えられ、今後検討していきたいと考えています。

◆討議 [後藤芳顕 (名古屋工業大学)]

コンクリートを充填した場合、座屈が拘束されるので、鋼板に多軸の引張力が作用するとともに塑性履歴も大きくなり、き裂が発生しやすくなる。

損傷した鋼管は局部座屈し、塑性履歴を既にかなり受けているので、低サイクル疲労等に対する考慮も必要となる。この点に対してコメントをください。

◆回答：今回行った修復は、応急復旧として本震後の比較的大きな余震に対する耐力を確保することを目的としました。ご指摘の通り、本研究で使用した供試体は塑性履歴を受けており、き裂が発生しやすくなっており、低サイクル疲労についても考慮する必要があります。今後、き裂および疲労破壊に対する追加の対策についても検討していきたいと考えています。

論文題目：“コンクリートが部分的に充填された鋼製橋脚の耐震性能”

著者：木野村宏昭・堂垣正博
掲載：Vol.58A, pp.290-298, 2012年3月

◆討議 [宇佐美勉 (名城大学)]

コンクリートは拘束された状態と拘束されていない状態で応力-ひずみ関係がかなり違ったものになります。角形鋼製橋脚では、通常ダイアフラムによってコンクリートが拘束された状態になっているので、拘束効果を考慮した応力-ひずみ関係を使う方がよいと思われます。

◆回答：貴重なご意見ありがとうございました。

本論文では、コンクリート充填鋼製橋脚を構成する鋼板をシェル要素で、コンクリートをソリッド要素でモデル化しました。このような構造を棒部材で扱う場合、しばしばファイバーモデルが用いられています。そのようなモデルでは、討議者が指摘されるように、拘束効果を考慮した応力-ひずみ関係の適用がかかせません。ところが、本研究では、コンクリート充填鋼製橋脚のモデル化をより厳密に扱っているため、鋼板による拘束がコンクリートの変位、ひずみ、応力に自動的に反映されるものと考えています。それゆえ、本解析のようなモデル化の場合には、拘束の効果は反映されたコンクリートの応力-ひずみ関係を用いる必要はないと思います。

◆討議 [後藤芳顕 (名古屋工業大学)]

本検討は、解析によりコンクリート充填鋼製橋脚の履歴挙動を解析されているが、コンクリート充填鋼製橋脚に特有のPinching挙動が再現されていない。

コンクリートと鋼パネルの界面のモデル化は適切なのか？また、コンクリートのひび割れ発生後開閉挙動が適切に表現されているか？

実験により解析の妥当性を十分に検証されるべきと考える。

◆回答：貴重なご意見ありがとうございました。

本数値解析によれば、繰返し曲げを受ける橋脚の強度やエネルギー吸収能を表すグラフに繰返し曲げに伴う劣化現象が現れます。ただし、その水平荷重-水平変位の履歴曲線には、討議者が指摘されたようなくびれのある履歴ループ¹⁾が現れていません。今後、材料構成則などについて再度検討し、討議者の指摘事項の再現が可能かどうか検討します。

コンクリートと鋼板パネルの界面では、ソリッド要素でモデル化したコンクリートとシェル要素でモデル化した鋼板の節点を共有させました。それゆえ、充填部に生じた剥離に伴う鋼板の局所的な板曲げ変形は明らかにできません。最高荷重後の除荷現象がかなり顕著に現れる領域までも精度良く解析するには、討議者が指摘されているよう

な現象も扱えるように、モデル化や解析法の検討を要するものと思います。

コンクリートのひび割れの開閉について、コンクリートの引張り側の応力が σ_c1 に到達すれば $\sigma_c=0$ となり、ひび割れが発生します。その後、ひび割れの進展とともに、応力ゼロの状態ではひび割れのみが成長する材料特性を仮定しました。また、除荷が始まれば、応力状態がゼロのまま、ひび割れが閉塞していき、応力-ひび割れ関係の圧縮領域にひび割れが到達すれば、ひび割れは完全に閉じた状態になります。その後、圧縮側の応力-ひび割れ曲線をたどる材料特性を仮定しており、このモデル化はほぼ妥当なものと思われる。

本解と実験の比較を水平荷重と水平変位の履歴曲線から得られた包絡線で行いました。本結果から、橋脚が保有する強度や変形などの性能の妥当性が十分に検証できたものと思われます。

- 1) 後藤芳顕・水野貢介・Ghosh Prosenjit KUMAR・藤井雄介：充填コンクリートとの相互作用を考慮した矩形断面鋼製橋脚の繰り返し挙動のFEM解析，土木学会論文集A, Vol.66, No.4, pp.816-835, 2010-12.

◆討議 [葛 漢彬 (名城大学)]

本検討は、これまでの研究に比べ、改善された点が何でしょうか。

◆回答：貴重なご意見ありがとうございました。

コンクリート充填鋼製橋脚において、シェル要素とソリッド要素を用いたより厳密なモデル化による研究が後藤ら¹⁾によってなされています。残念ながら、その実用化は未だ十分ではないように思われます²⁾。そこで、本論文では、鋼板にシェル要素を、充填コンクリートにソリッド要素を用いた連成解析を汎用のFEM解析ツールで試みました。そして、既往の実験結果から得られた水平荷重-水平変位の包絡線と本研究から得られた結果を比較し、本解が十分な精度で求められていることを確認しました。このような解析的研究を広範囲に行い、鋼製橋脚の特性を総合的にまとめれば、橋脚の耐震性能を容易に評価できる手法が確立できるものと思います。

- 1) 後藤芳顕・水野貢介・Ghosh Prosenjit KUMAR・藤井雄介：充填コンクリートとの相互作用を考慮した矩形断面鋼製橋脚の繰り返し挙動のFEM解析，土木学会論文集A, Vol.66, No.4, pp.816-835, 2010-12.
- 2) 宇佐美勉編著/日本鋼構造協会編：鋼橋の耐震・制震設計ガイドライン，技報堂出版，pp.103-120, 2006-9.

論文題目：“角部に腐食損傷を有する矩形鋼製橋脚の水平2方向挙動に関する研究”

著者：永田和寿・加藤慶太郎・杉浦邦征・橋本国太郎・北原武嗣

掲載：Vol.58A, pp.299-309, 2012年3月

◆討議 [青木徹彦 (愛知工業大学)]

鋼製橋脚の耐力は局部変形、残留応力によって大きく影響を受けます。腐食や損傷によって残留応力はどの程度変化しているのか、またそれによって影響はどれくらいですか。

◆回答：今回の載荷実験および数値解析では局部変形、残留応力の影響を考慮しておりません。実験供試体を製作する際は製作の都合上、角部に当たる部分の板を切削後に溶接により組み立てましたので、腐食による残留応力の変化を考慮した試験体になっておりません。また、数値解析では局部変形（初期変形）、残留応力を考慮した解析を行っておりません。今後ご指摘の点を踏まえ、局部変形や腐食や損傷による応力の再分配の影響について検討して参りたいと存じます。

◆討議 [鈴木 森晶 (愛知工業大学)]

座屈の進行で耐力が低下されたとまとめておられますが、論文にはクラックが見られたと記述されています。体力の低下には座屈とクラックのどちらの影響が大きいと考えればよいでしょうか。

◆回答：クラックは角部の溶接表面に生じ、角部が完全にクラックにより割れたわけではございませんでした。このクラックが生じた際に急激な耐力低下は観られませんでしたので、今回の場合は耐力の低下はクラックより座屈による影響が大きいと考えております。

◆討議 [葛 漢彬 (名城大学)]

実構造では腐食が規則的でなく、また基部、コーナー部から離れた部位で発生したことがある。この場合はどうなるのでしょうか。

また、Rが小さい厚肉の場合、局部座屈よりき裂の発生が先行する。本検討での解析モデルは厚肉断面鋼製橋脚の挙動を解明できなく、結論も変わってくるのではないのでしょうか。

◆回答：ご指摘のように実際の腐食は規則的でなく、腐食の発生箇所も基部やコーナー部から離れた場合もございます。これらの影響については腐食の程度と作用力との関係になりますので個別に検討する必要があると思われますが、今回は研究の費用、時間的な制約上、論文に記載のような腐食損傷といたしました。

今回の検討では上記の制約もあり兵庫県南部地震以前に製作された耐震性能に劣る橋脚を対象にいたしました。ご指摘のように厚肉断面を有する鋼製橋脚では挙動が変わってくると思われるため、その影響について今後検討したいと存じます。

論文題目：“円形鋼製橋脚の局部座屈部に生じた一つの延性破壊現象に関する解析的検討”

著者：藤原英之・小畑誠・後藤芳顯
掲載：Vol.58A, pp.310-318, 2012年3月

◆討議 [青木徹彦 (愛知工業大学)]

径厚比パラメータは実際の構造物よりかなり大きく、薄肉で局部座屈が生じやすい部材を対象としていると思われる。実構造物との関係についてコメントをください。

◆回答：本論は、延性き裂の発生を解析的に予測するための基礎検討として、解析で使用する材料構成則やき裂発生基準の適用可能性を調べることを目的としており、実構造物でのき裂を再現することを意識したものではありません。また本論では、延性き裂が応力、ひずみで規定されるボイド体積率あるいは相当塑性ひずみが限界値に達することで発生するという仮定に基づくものであるため、応力、ひずみが的確に再現される解析モデルを使用することで、径厚比パラメータ等の形状に関わらず適用可能であると考えます。ただし、その検証が必要と考えています。

◆討議 [葛 漢彬 (名城大学)]

薄肉構造を対象に、局部座屈部でクラックが生じる現象を解析的に検討されていますが、どのような基準で評価されているのでしょうか。また、実現象と合致しないのでしょうか。さらに、厚肉断面にも同じことが言えるのでしょうか。

◆回答：延性き裂の発生基準としては、Gursonモデルを用いた場合はボイド体積率を用いており、ノンカップルド理論では静水圧応力の変化が少ない自由表面であることから相当塑性ひずみのみを評価に用いています。ただし、今回の検討の範囲ではこれらの破壊基準によってき裂の発生を評価することは困難でした。

また、ご質問の実現象とは、被災した実構造物では局部座屈頂部の内面に初期のき裂が見られたことを示しているものと考えますが、本検討では局部座屈を生じやすくする目的で実構造物に比べて薄肉構造を用い、き裂発生位置、時点の観察が容易な試験体外面に生じるき裂に着目しているため、ご指摘のとおり厚肉の実構造物とはき裂の発生する箇所、発生する時点(変形程度)が合致しないことは想定されます。しかしながら、本論文の結果として示されているように数値解析の結果は本実験の結果と矛盾するものではありません。したがって、厚肉断面であっても、それに対応した適切な解析によって変形等が正しく評価されれば、本解析の手法は適用できるものと考えます。

◆討議 [宇佐美勉 (名城大学)]

阪神淡路大震災時に見られたような、局座座屈発生箇所でのパイプ断面のクラックの解析もこの手法で可能なのでしょうか。

◆回答：本検討の範囲では、き裂発生の定量的な予測には至っていませんが、少なくとも破断起点部に生じる延性き裂の発生部位については予測できるものと考えます。

論文題目：“異なる溶接仕上げと未溶着高さを有する鋼厚肉断面梁-柱隅角部の繰り返し弾塑性解析”

著者：速水景・鈴木俊光・岩田勝成・葛漢彬
掲載：Vol.58A, pp.319-332, 2012年3月

◆討議 [後藤芳顯 (名古屋工業大学)]

局部的なひずみ集中部のひずみの値をソリッド要素を用いたFEM解析で定量的に評価されているが、この評価には鋼材の構成則が大きな影響を持つと考えます。用いられた移動硬化則はかなり単純な構成則であるので、大きなひずみの繰り返しを受ける場合、精度が低下するものと考えます。この点について、検討する必要がないのでしょうか。

◆回答：本研究ではこれまでに提案してきた損傷度評価指標 D を用いて、解析により得られた塑性ひずみより延性き裂発生点の推定を試みています。そして、これらを通過点に最終的には未溶着を有する構造物の耐震性能において脆性破壊の照査法を確立することです。また、実務において照査法の単純化が求められています。以上の背景を踏まえて、メタル解析の代表的かつ比較的単純な構成則であるバイリア型移動硬化則を用いても、荷重-変位曲線・ひずみ履歴ともに比較的精度よく再現できており、損傷度評価指標 D により、延性き裂の発生時期・位置の推定が概ね可能であることから本解析モデルにより実用的な設計照査上の問題は無いものと考えます。

◆討議 [北原武嗣 (関東学院大学)]

弾塑性解析に関する収束条件に関して、構造全体解析での誤差ノルムなので行われていると思います。この場合、各要素においては十分に収束していない状態もあり得ると考えられます。塑性ひずみの局所的値が重要になる問題において、上記のような誤差は、どのように判断すればよろしいのでしょうか。

◆回答：今回の解析において、使用した解析プログラムはABAQUSであり、Newton法を使用して非線形問題を求めています。今回の解析のように大変形問題における過剰な変形や非常に大きい塑性ひずみ増分により、要素計算に問題が発生する場合があります。この場合、時間増分をその時点の時間増分の0.25倍にして再試行するなど、解の収束精度向上を図っていること、また損傷度評価指標 D により、延性き裂の発生時期などの推定が概ね可能であることより、解析の値に大きな誤差はないものと考えております。

論文題目：“柱部の鉄筋に丸鋼を用いた鉄筋コンクリート橋脚の履歴特性”

著者：澤松俊寿・三田村浩・西弘明・松本高志・加保勇介
掲載：Vol.58A, pp.333-342, 2012年3月

◆討議 [高橋良和 (京都大学)]

本実験の結果をどのように解釈するのか？変形性能が大きいから、丸鋼の方が良い？平面保持の仮定が成立していないため、設計よりも復元力が小さくなることは、やはり危険側の挙動としてコメントすべきである。

◆回答：本論文では、昭和40年代頃までに使用されていた丸鋼鉄筋を用いた既設RC橋脚の耐震性能評価と耐震補強対策を行う上で参考とすべく、実験的検討を行ったものです。実験結果に基づき、耐荷力特性や変形性能、損傷メカニズム等を示していますが、ご指摘のとおり、丸鋼の方が変形性能は大きく、復元力は設計値よりも小さくなる傾向が得られており、設計上の留意点と考えられます。さらに実験データを蓄積するとともに、ご指摘を踏まえて今後の検討を実施していきたいと存じます。

◆討議 [中村 光 (名古屋大学)]

丸鋼を用いた供試体に対して、諸元の決定は、どの設計基準に従って行われたのか。

◆回答：既往の実験供試体はコンクリート標準示方書の耐震設計に準じて設定しています。

◆討議 [家村浩和 (近畿職業能力開発大学校)]

柱部の鉄筋に丸鋼を用いたRC橋脚については、家村・高橋・曾我部らの一連の研究があるが、何で参考にされていないのは誠に遺憾です。

◆回答：本論文では、「1. はじめに」で、丸鋼鉄筋を用いたRC部材や鉄筋とコンクリートの付着のないRC部材に関して、耐震性に着目した既往の研究例を数例レビューして概要を記載しておりますが、確かにご指摘の研究成果に関する引用記載が漏れております。

ご指摘を真摯に受け止め不勉強を反省するとともに、今後の検討において十分に参考にさせていただきます。

論文題目：“段落し部の補強が実施されたRC橋脚の曲げ耐力・変形能補強に関する実験的研究”

著者：張広鋒・星隈順一・堺淳一介
掲載：Vol.58A, pp.343-352, 2012年3月

◆討議 [鈴木 森晶 (愛知工業大学)]

- (1) 3D, 4D供試体の位置づけは？1Dの耐力が小さいので、外巻きコンクリートを増やしたのか？
- (2) 外巻きコンクリートを高くすると、基部のみに損傷が集中するので、もし1D供試体の耐力を上げるのが目的なら、もう少し他のアプローチもあるのではないかと？

◆回答：

- (1) 1D供試体は、別途の研究目的のために本研究よりも前に実施したものです(1), 巻立て高さの影響を検討するために参考となるため、本論文では、この実験結果を比較検討のために用いることとしています。当然のことながら、3D, 4D供試体を計画・設計段階においては、1D供試体の実験結果を参考にしています。
 - 1) 張 広鋒, 運上茂樹：主鉄筋段落し部を有するRC橋脚の段階的耐震補強工法に関する実験的研究, 土木学会第64回年次学術講演会, pp. 1195-1196, 2009. 9.
- (2) 1D供試体は、コンクリート巻立て部と繊維材間の付着のみを期待した構造の場合にどの程度までの補強効果が得られるのかを検討するために実施したものです。補強用として巻立てコンクリート部に配置した軸方向鉄筋の効果をフルに発揮できるように補強する場合には、RC巻立て部の割れやRC巻立て部と繊維材間のずれを抑える対策を加える等の方法も考えられます。

◆討議 [高橋良和 (京都大学)]

- (1) 鋼板とコンクリート巻き立て部がすべるということは、コンクリート部に何を期待しているのか？
- (2) 曲げ耐力向上を目指しているのか？でも、滑っているので、効率が悪い。解析が難しくなるのではないかと？

◆回答：

- (1) 本実験では、従来のRC巻き立て補強と同様に、RC巻き立て部に曲げ耐力と変形能の両方への補強効果を期待しています。重ね梁理論に基づき、鋼板とRC巻き立て部間にずれが生じても、RC巻き立て部による曲げ補強効果が発揮できると考えられます。
- (2) 本実験で実施した補強方法は、鋼板とRC巻き立て部間のすべりが生じることによって、補強効果が低下することが考えられますが、実構造に適用する場合を考えると、表面処理が必要でなく、施工も行きやすいメリットがあります。

論文題目：“先端拡大アンカーを用いた既設土留め壁付き柱の耐震補強に関する実験的研究”

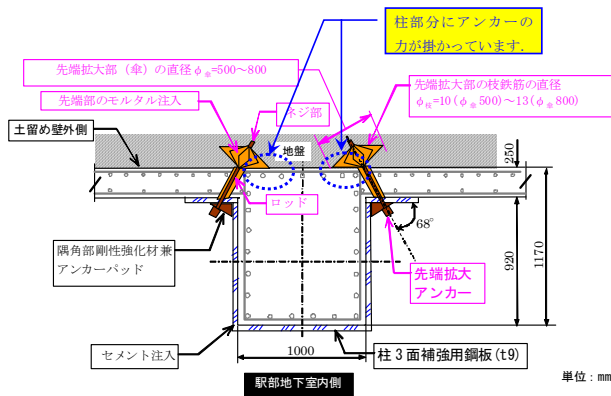
著者：羅休・岡本大・京野光男・西村昭彦・星秀朋・三澤清志・小林悟史

掲載：Vol.58A, pp.353-365, 2012年3月

◆討議 [家村浩和 (近畿職業能力開発大学校)]

柱と壁は一体構造として建設されたのか？アンカーで柱を壁に強く固定すると、壁の破壊が先行しないのか？

◆回答：下図に示すように、アンカーは柱の背面に向かって斜めに挿入されたため、アンカーを引張る力は主に柱に掛かっていて、壁に大きな負担にならない仕組みとなっています。従いまして、壁の先行破壊にはなりませんでした。



論文題目：“道路橋の津波による被害分析”

著者：清水英樹・幸左賢二・佐々木達生・竹田周平

掲載：Vol.58A, pp.366-376, 2012年3月

◆討議 [張 広鋒 (土木研究所)]

- (1) 水理実験で求められた揚力の評価式に浮力分が入っているのでしょうか？
- (2) 図-15は、浮力のみで整理されていますが、実現象は、浮力のほかに揚力もあると考えられます。図-15の結果はどのように解釈すればよいのでしょうか。

◆回答：

- (1) 揚力の評価式に浮力分は考慮されております。水理実験では、津波による作用力を3分力計で計測しており、鉛直方向の作用力は上揚力と浮力の合計値となっております。上揚力と浮力を分離せずに評価しております。
- (2) ご質問の通り、実現象は上揚力と浮力が同時に作用していると考えられます。図-15は、橋種別に浮力のみに着目し、浮力をどの程度受けやすいか、また同形式内でのばらつきを評価したものでございます。

◆討議 [家村浩和 (近畿職業能力開発大学校)]

橋脚の流失抵抗力をどのように算出したのか？津波速度6 m/secは時速で21km/h程度で、低いように思いますが。

◆回答：流出抵抗力については、論文内の「5.3 橋梁抵抗力」に記述しております。簡単に記述しますと、上部工反力と摩擦係数の積として評価しております。また、津波速度に関しては、共同著者であります下記文献に、今回の東日本大震災の津波映像から漂流物の流速を計測しており、その平均が5.1m/secであったことから、6m/secと仮定しております。そのため、沿岸部の橋梁をおそった津波の流速として6m/secは、決して低い値ではないと考えております。

参考文献：Li Fu, Kenji Kosa, Hideki Shimizu, Zhongqi Shi: Damage Judgment of Utatsu Bridge Affected by Tsunami due to Great East Japan Earthquake, Journal of Structural Engineering, Vol.58A, 2012.3.

論文題目：“Damage Judgment of Utatsu Bridge Affected by Tsunami due to Great East Japan Earthquake”

著者：Li Fu・Kenji Kosa・Hideki Shimizu・Zhongqi Shi
掲載：Vol.58A, pp.377-386, 2012年3月

◆討議 [宇佐美勉 (名城大学)]

滑り係数の値として0.6を用いているようですが、いろいろな拘束条件を考慮してこの値を変数とすることにより、より精緻な照査法が得られるのではないのでしょうか？

◆回答：ここではえぐり取られるような界面の破壊状態を想定しコンクリートとコンクリートあるいは鋼とコンクリートのみかけの静止摩擦係数として0.6を用いています。通常の滑り状態では摩擦係数は変化しますが、既往の実験ですと、破壊状態の摩擦係数はいずれも場合も大きく変化せず0.6程度になるとの報告に基づいております。

◆討議 [家村浩和 (近畿職業能力開発大学校)]

If the wipe away girders had stayed on the top of the piers, could the piers have been safe against tsunami force?

◆回答：橋脚抵抗が桁抵抗よりも大きいときには、桁のみが流失することが考えられます。しかしながら、鉄道橋などの場合、橋脚および桁抵抗ともに比較的小さいために両方流失するケースが多いと思われれます。

論文題目：“津波により桁流失した床版橋の再現解析と水路実験”

著者：坂本佳子・原田隆典・村上啓介・福田利紀・野中哲也
掲載：Vol.58A, pp.387-398, 2012年3月

◆討議 [樋口匡輝 (オイレス工業)]

桁の応答計算において、幾何学的な非線形性や相互作用なども考慮されているのでしょうか？

◆回答：波力を作用した桁の応答計算において、幾何学的非線形性は考慮しておりますが、桁流出のように桁が浮いて移動する現象や構造物と流体の相互採用までは考慮していません。本研究では、桁流出の挙動の解明ではなく、桁が流出するかどうかの判定に重点を置きました。

◆討議 [張 広鋒 (土木研究所)]

図-19の実験結果は滑らかに見えますが、他の文献の実験結果では衝突瞬間に大きなピークが現れることがよく見られます。今回の実験結果で滑らかになっている理由を教えてください。

◆回答：最初に波があたる桁の前面においては、ご指摘通り、本実験でも瞬間的に大きなピークが表れます。図-19の実験結果は、桁前面ではなく桁下面のrearの位置での波圧であり、その位置では大きなピークが現れず滑らかになります。

論文題目：“3方向地震動を受ける正方形断面鋼製橋脚の限界状態の評価法”

著者：後藤芳顕・海老澤健正

掲載：Vol.58A, pp.399-412, 2012年3月

◆討議 [青木徹彦 (愛知工業大学)]

「不安定」という表現がされていますが、これはプッシュ・オーバー解析のときの最大荷重以降の話で、実構造物では最大荷重をこえても、構造物は繰り返し荷重により、元に戻り、不安定とはなりません。よって動的載荷時では「不安定」という言葉は適切でないと思われます。

◆回答：現行の道路橋示方書における水平1方向地震動成分を用いた鋼製橋脚の耐震安全性の照査では、本論文の図-2のように橋脚面内の水平復元力-水平変位関係の最大荷重点に到達した状態を許容限界とし、この点での水平変位や曲率などを限界値としています。このように定義された許容限界は、橋脚に作用する水平力に対するつり合い曲線上の極限点であり構造が安定から不安定に変化する安定限界に対応しています。本論文ではこの安定限界に関する考え方を多方向地震動下の耐震照査に拡張するために橋脚の限界状態を安定限界と定義しています。討議者のご指摘のように単調に増大する荷重と異なり、地震荷重はゆれの加速度による慣性力であるため橋脚が安定限界を超え不安定状態にあるのは一時的であることが多く、ゆれの加速度が小さくなると除荷現象が生じて安定状態に復帰します。この事実はすでに文献9)で説明しています。しかしながら、一時的でも不安定状態になると橋脚の応答水平変位が大きく増大し、極端な場合には倒壊につながることを、本論文を含め、過去の数値解析や振動台実験でも確認しています⁸⁾⁻¹²⁾。このようなことから、橋脚の時刻歴応答が一時的にせよ不安定状態に到達したケースを「不安定」と表示しています。この事実は文献8)-12)や本論文で繰り返して説明していますので誤解は生じにくいと考えます。

◆討議 [宇佐美勉 (名城大学)]

(1) このような力による照査法を採用すると限界状態近傍での変位は、限界曲面の精度に左右されると考えられます。限界曲面が真値より少し大きく見積もった場合、復元力(慣性力)は限界値以内でも、応答変位は場合によっては非常に大きくなる場合も考えられます。このことは、復元力特性が完全弾塑性型に近い橋脚が、一方向地震動を受け、復元力が限界値近くの応答をする場合を想定すればよく分かると思います。また、論文の図-11で、塗りつぶした点は照査を満たさない点(不安定)と考えられますが、限界曲面を少し大きめに見積もった場合、塗りつぶしの点は全て照査を満たす点(安定)と判定することになり、変位は、非常に広い範囲にばらつくこととなります。それに対して、変位で照査する方法では、限界状態での復元力の変動が小さいので、このようなことは起こりません。一般に、限界曲面近傍では、力の変動は小さいが、変位の変動は大きいと考えられます。確かに、力で照査する方が、照査自体には適するかも分かりません。しかし、耐震設計では、力と共に、変形(変位)も重要で、提案法で照査を満足した状態で求められる変形には、場合によっては、大きな誤差を含む可能性があります。従って、提案の手法を用いる場合

には、限界曲面にある程度の安全率を考慮して縮小した曲面を用いるか、別途許容変位を何らかの方法で算定する必要があると考えられます。

(2) 現行法で設計された鋼製橋脚は、提案法で照査するとどの程度危険になるのでしょうか。

◆回答：

(1) ここで提示した力の成分による動的照査法では限界曲面が過大に評価されると限界曲面に到達する以前に橋脚が不安定状態に到達し、変位が非常に大きくなる可能性があります。しかしながら、力の成分の限界曲面は簡単なPushover解析により精度良く求まることは著者らの多くの論文⁸⁾⁻¹²⁾で示したとおりです。2種類の円形断面橋脚に対して、具体的にどの程度の部分安全係数 γ_{bl} (強度解析モデルの不確かさを考慮した係数)を力の限界曲面に対して考慮すれば良いかを多くの地震動成分を用いて検討しました⁹⁾が $\gamma_{bl}=1.02$ という小さな値でした。さらに、はりモデルにより算定される力の応答値の精度も良く構造解析係数は $\gamma_a=1.06$ となります。

その一方で、変位照査法に用いる変位の限界曲面はPushover解析では精度良く求めることが困難であることが判明しています。すなわち、橋脚の応答変位には荷重履歴の影響が大きく、Pushover解析で求めた限界曲面に到達するかなり以前に橋脚が安定限界を超え不安定状態に到達する場合もまれでないことが明らかになっています。このような場合、はりモデルによる応答値が限界曲面以内であっても、橋脚の実際の変位が非常に大きく生じ、倒壊することもあり得ます。これは、はりモデルの適用限界が局部座屈変形の十分小さい範囲に限られており、安定限界を超え、局部座屈変形が大きくなる状態では算定される橋脚の応答変位が過小評価されるからです。このような場合には変位照査法やひずみ照査法では対応できません。

以上から、はりモデルを用いて応答値を算定する現行の照査法では力の成分を用いた照査の方がより確実に耐震安全性を確保できるのではないかと考えます。力の成分による限界曲線はPushover解析で精度良く算定できることは多くの例で確認していますが、より高い安全性を確保したい場合には限界曲面に関する部分安全係数 γ_{bl} を増加させることで対応できます。力の成分に対する照査に加え変位やひずみに対する照査を付加することについては、否定はしませんが、妥当で精度の良い限界値をどのように設定するかという先に述べた変位やひずみ照査法での限界値設定と同じ難しい問題があります。むしろ、応答変位の限界値は耐力や安定とは別の観点から設定すべきではないか考えます。

(2) 本論文では3方向地震動を受ける鋼製橋脚の限界状態の評価法を示していますが、この限界状態は水平1方向地震動下では現行の道路橋示方書で規定されている限界状態と一致するように設定しています(本論文p.491と図-2参照)。したがって、水平1方向地震動下での照査では、本論文と道路橋示方書の照査法は理論的には等価になります。もちろん、両者の限界状態の評価式が異なるので、実際には等価ではありません。本論文で示したようにPushover解析での最大荷重点の変位として限界値を求める場合、地震時の繰り返し載荷における限界値からのばらつきが大きくなります。したがって、変位照査法を採用している現行設計では安全性照査の精度が劣る場合も有ると考えます。

つぎに、水平1方向地震動に対して設計された橋脚が実際の3方向地震動に対して安全かどうかという点について説明します。現行の設計では水平1方向設計地震動として調整波を用いているので対応する3方向地震動成分を設定することが出来ません。そこで、ここでは、実測波の3方向成分から水平1方向地震動成分を選び、これにより橋脚を設計しました。そして、この橋脚に対して設計で用いた実測波の水平1方向成分に拡大倍率(0.6~1.4)を乗じて入力した場合と水平2方向成分に同じ拡大倍率乗じて同時入力した場合の挙動について詳細に検討しました。鉛直動成分については本論文で示したように影響が小さいので無視しています。具体的には、地震波としては兵庫県南部地震での実測波JRTを選び、卓越するNS成分で円形断面橋脚と正方形断面橋脚を設計しました。鋼製橋脚のモデルは図一討1のとおりです。橋脚躯体の諸元と構造パラメータの値を表一討1、鋼材の三曲面モデルによるパラメータを表一討2、地盤の集約ばね定数およびフーチングの質量と回転慣性を表一討3、表一討4に示します。大倍率で生じることがわかります。これより、明らかに水平1方向地震動のみによる設計は危険側であることがわかります。橋脚の解析にはシェル要素による高精度の複合非線形動的解析を用いましたが、その精度はすでに振動台実験で確認しています^{18),19)}。解析結果として水平1方向地震動成分(JRT-NS)と水平2方向地震動成分(JRT-NS+EW)に乗じた拡大倍率と最大応答変位(合変位)の関係を円形断面橋脚と正方形断面橋脚について図一討2に示します。

表一討1 鋼製橋脚躯体の諸元と構造パラメータ

(a) 円形断面橋脚					
$D = 2R$ (mm)	t (mm)	h (mm)	R_t	\bar{I}	P/P_y
2850	44.3	15000	0.08	0.38	0.09

(b) 正方形断面橋脚						
a (mm)	b (mm)	t (mm)	t_r (mm)	h_r (mm)	h (mm)	R_R
2440	2440	20.1	20.1	210	10000	0.5
\bar{I}_s	g/g^*	R_s	a/b	t_r/t	\bar{I}	P/P_y
0.5	1.24	0.66	1.0	1.0	0.26	0.10

表一討2 三曲面モデルのパラメータ

E (GPa)	n	s_y (MPa)	s_u (MPa)	ϵ_{yp}^0
206	0.3	315.5	584.1	0.0091
f_b/σ_y	b	r	κ	x
0.65	150(円形) 100(正方形)	2	2(円形) 3(正方形)	0.3

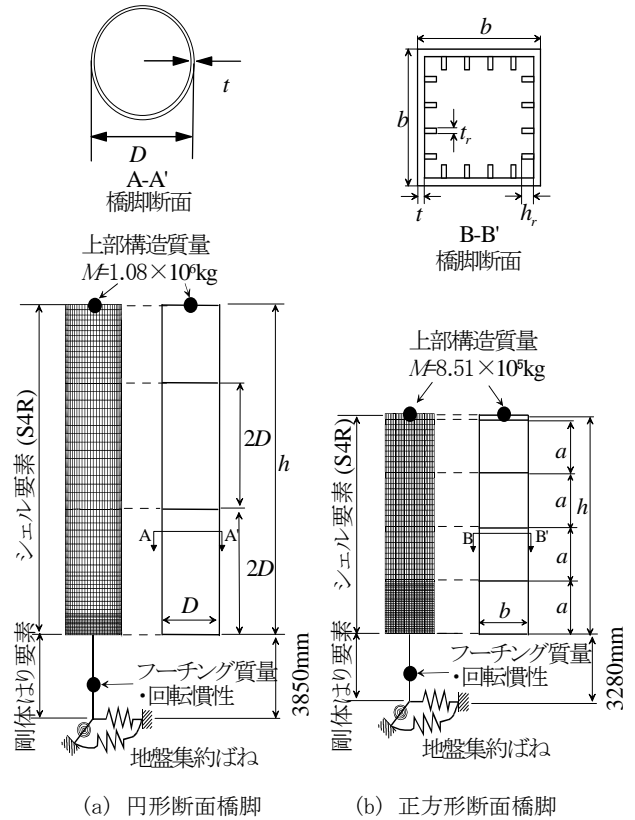
表一討3 地盤の集約ばね定数

橋脚断面	A_{ss} (N/m)	A_{sr} (N/rad)	A_{rr} (N・/rad)
円形断面	3.94×10^9	-5.35×10^9	5.97×10^{10}
正方形断面	3.00×10^9	-3.11×10^9	3.34×10^{10}

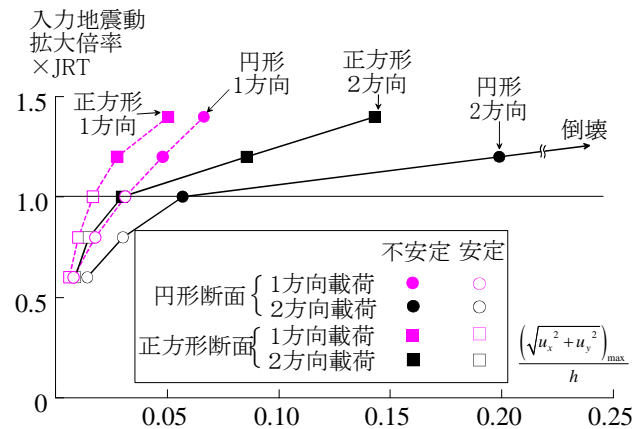
表一討4 フーチングの質量および回転慣性

橋脚断面	質量 (kg)	回転慣性 (kg・m ²)	
		$I_{xx} = I_{yy}$	I_{zz}
円形断面	6.30×10^5	5.17×10^6	9.48×10^6
正方形断面	3.22×10^5	1.69×10^6	3.11×10^6

この図中には各ケースで橋脚に不安定状態が生じるか否かも示しています。図一討2より、いずれの橋脚においても、水平2方向地震動成分の同時入力の場合の最大応答変位が大きく、橋脚の不安定状態も水平1方向地震動成分入力時より小さな拡大倍率で生じることがわかります。これより、明らかに水平1方向地震動のみによる設計は危険側であることがわかります。



図一討1 解析モデル



図一討2 橋脚頂部における最大応答変位

参考文献

18) 長田直也, 後藤芳顕, 海老澤健正, W. Lu, X. Lu : 振動台を用いた鋼製橋脚の2方向加振実験とFEM解析, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.65, pp.I-43-44, 2010.
 19) 海老澤健正, 後藤芳顕, 長田直也, W. Lu, X. Lu : 振動台を用いた鋼製橋脚の2方向加振実験とFEM解析振動台実験による円形断面鋼製橋脚の安全性照査法に関する検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.66, pp.I-401-402, 2011.

論文題目：“不整形地盤における鋼斜張橋の耐震性能向上対策”

著者：杉岡弘一・島賢治・松下裕明
掲載：Vol.58A, pp.413-422, 2012年3月

◆討議 [葛 漢彬 (名城大学)]

制震ダンパーによる低減効果が小さかったのは、何故でしょう。これは、斜張橋に共通して言えることなのでしょうか。

◆回答：本論文の表-4に示す通り、P3橋脚にせん断パネルダンパーを設置した場合、P4橋脚では約7%増加したものの、P1、P2橋脚支承部の応答水平変位はそれぞれ約8%、約5%低減されました。また、P3橋脚の柱基部での応答曲率も約33%低減されており、せん断パネルダンパーの設置により一定の応答値低減効果が得られたと考えております。

しかし、今回は対象橋梁における可動支承の移動可能性を超過していたため、変位制限構造による補強案を採用しました。したがって、対象橋梁の移動可能性が大きければせん断パネルダンパーによる補強案が採用可能であったと推察されることから、せん断パネルダンパーによる応答水平変位の低減効果が十分ではなかったことが斜張橋に共通して言えるわけではなく、個別に確認が必要であるとと考えております。

◆討議 [家村浩和 (近畿職業能力開発大学校)]

不整形地盤についての検討をされていますが、整形地盤の場合はどうなるのでしょうか。

◆回答：本研究では、既設長大橋の耐震性能向上対策として、対象橋梁周辺における地質状況に基づいて耐震性能の照査を実施しました。本研究の範囲内では、鉄筋コンクリート橋脚においては軟弱地盤の層厚が厚いにもかかわらず一定の水平変位の応答値低減が確認でき、橋脚の剛性が応答値の低減効果に大きく影響していると考えております。よって、整形地盤においても同等程度の低減効果が期待できると考えております。

◆討議 [青木徹彦 (愛知工業大学)]

常時の温度処理はどうされているのでしょうか。

◆回答：制震デバイスおよび変位制限構造による補強案とも、常時では作動しないように温度変化を考慮して遊間を設定しております。

論文題目：“BRB による鋼製剛結トラスの耐震性能向上効果”

著者：今瀬史晃・舟山淳起・宇佐美勉・王春林・野中哲也・菅付紘一
掲載：Vol.58A, pp.423-435, 2012年3月

◆討議 [後藤芳顕 (名古屋工業大学)]

- (1) 土木構造の場合は半剛構造の方が多いが、本研究で剛構造を用いた検討された理由を述べてください。
- (2) 半剛構造における方がBRBの効果は大きいのではないかと。

◆回答：

- (1) 格点部のガセット厚、ボルト本数は、本文中にも記載してありますが、現行道路橋示方書に従って設計していますので、特に“剛”に設計したわけではありません。ただし、作用軸力は、降伏水平力作用時の部材軸力を用いていますので、示方書通りに設計した格点部より多少剛になっている可能性はあります。ちなみに、論文タイトルの「剛結トラス」はピン結合ではないトラスの意味に用いています。
- (2) 半剛構造にすれば、格点部でのエネルギー吸収が見込まれるのでBRBの効果が大きくなるという趣旨のご質問かと思えます。しかし、著者らは、半剛構造のエネルギー吸収のメカニズムを未だ十分理解していませんので、多数の単体の実験でメカニズムが十分分かっているBRB本体（芯材）の履歴吸収エネルギーのみによる耐震性能向上効果を狙った実験・解析を行っています。

論文題目：“震源断層近傍における鋼アーチ橋の応答特性と耐震補強法”

著者：児玉喜秀・原田隆典・野中哲也・中村真貴・宇佐美勉

掲載：Vol. 58A, pp. 436-447, 2012年3月

◆討議 [中島 章典 (宇都宮大学)]

橋梁の先進的な耐震設計法の提示だと思えますが、いろいろなシナリオに対して得られている挙動の精度はどの程度あるのでしょうか。

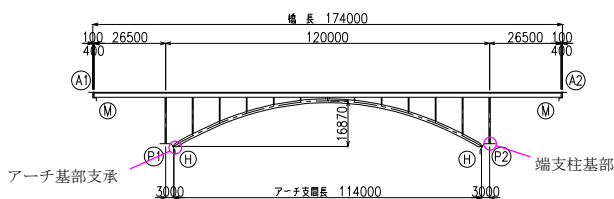
◆回答：本論文における解析モデルとしては、地震時の動的挙動が複雑な橋梁に分類される上路式鋼トラス橋を対象にして、震源から橋梁までの一貫した数理モデル（断層モデル+地盤モデル+橋梁モデルの一貫した解析モデル）を提示した上で、断層変位を含むM6.5の直下地震の横ずれ断層や逆断層近傍における対象橋梁の応答特性を調べております。アーチ橋は通常非線形動的解析のモデルであるため、いろいろなシナリオに対して得られている挙動の精度としては地震動の特性による影響が大きくなります。地震動の作成方法としては、理論的方法を採用しておりますが、この手法により、1966年パークフィールド地震を再現したところ、観測された加速度波形、変位波形と精度よく一致することを確認しております。また、今回のシナリオは一般的な横ずれ断層と逆断層を想定しておりますが、対象箇所における震源断層パラメータと地盤特性をできるだけ厳密に設定することで、構造物の挙動を精度よく評価できると考えられます。ただし、これらの特性は不確定要素が多いため、設定の精度にどうしても依存します。

◆討議 [家村浩和 (近畿職業能力開発大学校)]

BRBによる支承反力の変化について教えてください。

◆回答：支承反力は橋軸直角方向の地震時慣性力が大きくなる横ずれ断層近傍の断層並行・伏在断層0.5km (CASE123) のケースで正反力、負反力ともに最大となります。このケースにおいて、BRBによる支承反力の変化を確認するため、BRB設置前と設置後のアーチ基部と端支柱基部の支承反力を以下に比較致しました。

BRBをアーチ横構や支柱対傾構に設置することで、支承反力が大幅に低減されており、特に負反力については、BRB設置前の半分以下の応答となっています。



		BRB設置前	BRB設置後	設置後/設置前
アーチ基部	正反力(kN)	24780	17400	0.702
	負反力(kN)	14600	6040	0.414
端支柱基部	正反力(kN)	10960	4400	0.401
	負反力(kN)	9440	2750	0.291