

論文 段落し部を有する壁式RC橋脚に関する弾塑性解析法の妥当性検討

岡田 慎哉*1・岸 徳光*2・張 広鋒*3

要旨： 土木構造物の設計手法が許容応力度設計法から性能照査型設計への移行が進んだ場合には、既設構造物の補修・補強設計の観点から現状の性能を精度よく照査する手法が必要となる。本研究では精度の高い性能照査手法を提案することを目的として、2径間連続桁橋を対象とした段落し部を有する橋脚模型の静的載荷実験および三次元弾塑性有限要素解析を実施し、解析結果を実験結果と比較することで提案した解析手法の妥当性の検討を行った。検討の結果、提案の解析手法によって実験結果を精度良く再現できることが明らかとなった。

キーワード： 段落し鉄筋配置, 三次元弾塑性有限要素解析, 性能照査

1. はじめに

頻発する大地震に備えるために国土交通省が策定した「緊急輸送道路の橋梁耐震補強3箇年プログラム」により、現在、主として昭和55年道路橋示方書よりも古い設計基準を適用して建設された橋梁の中で、特に段落し部を有するRC製単柱橋脚や連続桁固定橋脚等を優先して耐震補強事業が進められている。さらに、今後土木構造物の設計手法は許容応力度設計法から性能照査型設計法に移行していくことが予想され、耐震補強設計に関しても現状の耐震性能の把握や、耐震補強後の性能を評価するための精度の高い評価手法の確立が望まれている。

このような観点より、本研究では2径間連続桁橋の橋梁全体系を対象とした中で段落し部を含めた橋脚の性能を精度よく評価する手法を提案することを目的に、小型橋梁模型による壁式橋脚の静的載荷実験を行い、併せて三次元弾塑性有限要素解析を実施し、実験結果と比較検討することにより、数値解析手法の妥当性検討を行った。なお、数値解析には構造解析用汎用プログラムであるDIANA¹⁾を使用した。

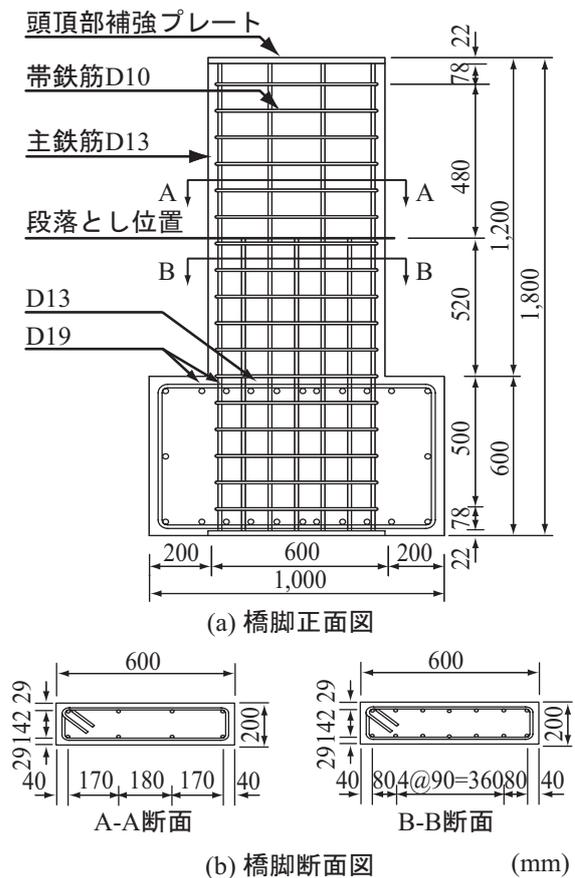
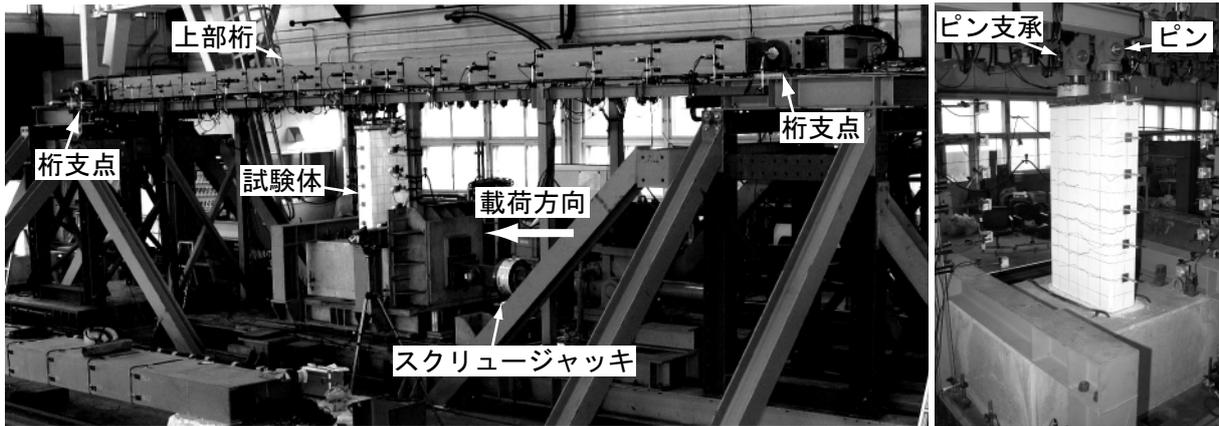


図-1 試験体の形状寸法, 配筋状況 (段落しを有する場合)

*1 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地基礎技術研究グループ 研究員 修(工) (正会員)

*2 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科教授 工博 (正会員)

*3 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科助手 博(工) (正会員)



(a) 全体写真

(b) 試験体拡大写真

写真-1 実験状況

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-1には、本実験で用いた橋脚模型の概要を示す。試験体の寸法は幅 600 mm、厚さ 200 mm、高さ 1,200 mm である。試験体の主鉄筋には D13 を片側 7 本配筋し、帯鉄筋は D10 を 100 mm ピッチで配筋している。なお、主鉄筋は試験体が小型であることより有効定着長が確保できないため、試験体上端および下端面に鋼板を取り付け、これに鉄筋を溶接することで定着を確保している。本研究では段落しを含めた耐震性能の評価を目的としていることから、段落しの有無が耐荷性状に与える影響について検討を行うため、同形状の段落しを有する試験体を併せて製作して実験を行っている。段落しは基部より高さ 520 mm の位置で長辺方向の軸方向鉄筋を 1 本おきに間引くことにより実施することとした。

表-1には、実験時に実施したコンクリートおよび鉄筋の材料試験結果より得られた力学的特性値を示している。

2.2 実験方法および測定項目

本研究で解析対象とした実験は、橋梁の総合的な性能評価を可能にするための基礎資料を得ることを目的として実施したもので、橋梁全体の応答を考慮するために 2 径間連続桁橋を模擬した桁および橋台を有する橋梁内に橋脚模型を

表-1: コンクリートおよび鉄筋の力学的特性値

材料	圧縮強度	降伏強度	弾性係数	ポアソン比
	f'_c (MPa)	f_y (MPa)	E (GPa)	ν
コンクリート	26.4	-	26.2	0.2
鉄筋	D10	-	375	0.3
	D13	-	401	0.3

設置している。写真-1には、実験の状況写真を示している。

実験には、H形鋼を用いて組み立てられた橋台に、箱桁を設置し、その中央部に壁式 RC 橋脚を支承を介して取り付けられた 2 径間連続の橋梁全体系模型を用いた。

桁は、1 径間 5,000 mm、全体で 11,000 mm の 2 径間連続桁である。桁断面は幅 700 mm、桁高 274 mm の箱型とした。桁模型は反力をとるために両橋台上で回転のみを許容するピン支持とし、中間支承に関してもピン支承とした。橋脚のフーチング下部には橋軸方向にリニアウェイレールを設置し、橋軸方向のみの変位を許容する構造とした。実験は橋脚のフーチング部前面にスクリーージャッキを設置して、強制変位を入力することにより実施している。なお、強制変位は一方向にのみ押し切る単調载荷としている。

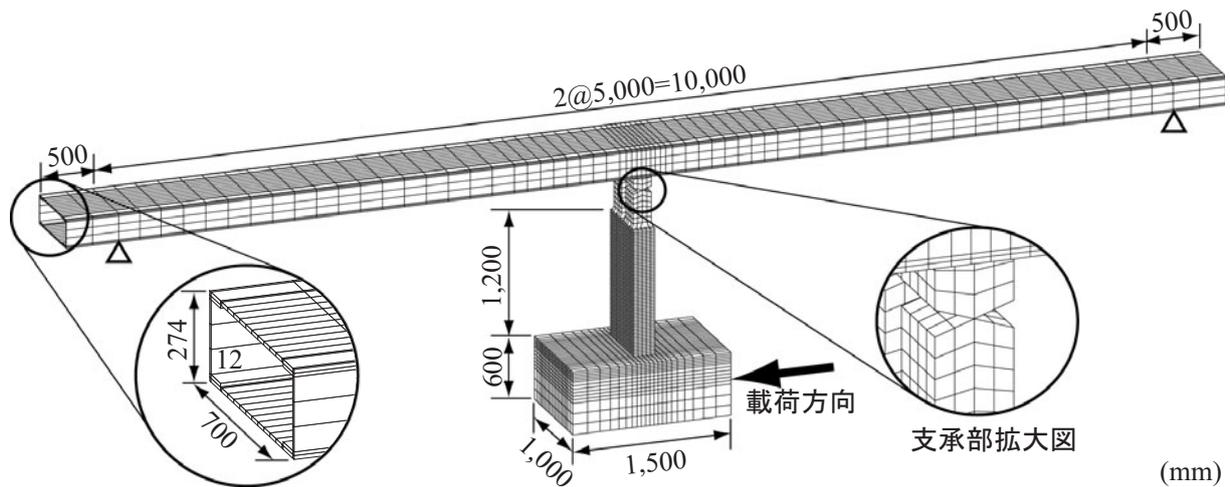


図-2 要素分割状況

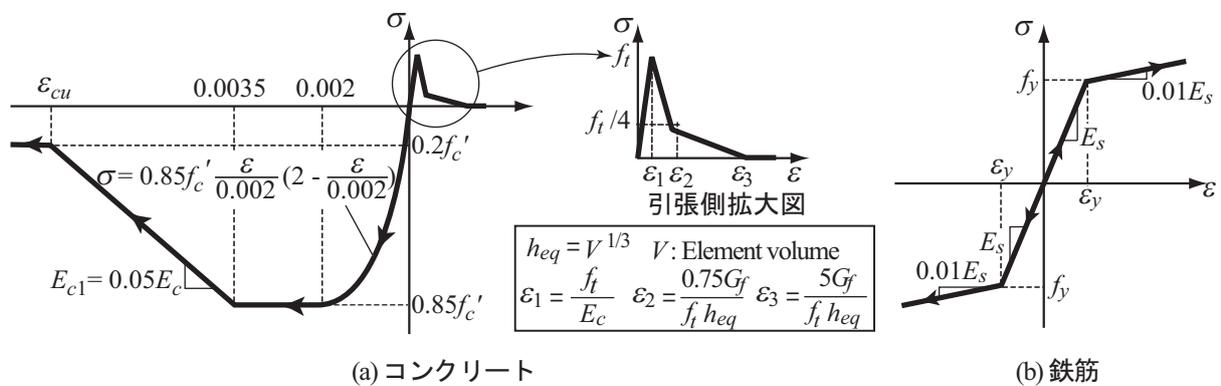


図-3 材料構成則

実験における測定項目は、1) 橋脚内の鉄筋ひずみ、2) 桁、橋台および橋脚の変位、および3) 強制変位点での反力、である。

3. 解析概要

3.1 解析モデル

図-2には、本解析に用いた解析モデルの要素分割状況を示している。コンクリート、支承部および上部桁には8節点固体要素、鉄筋には埋め込み鉄筋要素を用いてモデル化している。

境界条件は、橋脚フーチング基部の橋軸直角、および鉛直方向変位成分を拘束し、桁支点部は、回転のみを許容するように拘束している。支承部は、実験条件に即して、ピン支承と同様に橋軸方向の回転のみを許容するようにモデル化している。

数値解析における荷重方法は、実験と同様に

フーチング部に強制変位を与えることにより実施している。強制変位作用位置は実験時と同様にフーチング前面とした。なお、収束計算にはNewton-Raphson法を採用している。

3.2 材料構成則

図-3(a)には、本数値解析に適用したコンクリートの応力-ひずみ関係を示している。コンクリートの材料構成則に関しては、圧縮側には材料実験から得られた圧縮強度 f'_c を用いて、圧縮ひずみ $3,500\mu$ までは土木学会コンクリート標準示方書²⁾に基づいて定式化し、 $3,500\mu$ 以後は初期弾性係数の0.05倍で $0.2f'_c$ まで線形軟化するモデルを用いている。また、降伏の判定にはvon Misesの降伏条件を適用している。一方、引張側に関しては、図に示すようなtri-linearモデルを用いることとした。ここで引張強度 f_t は、CEB-FIP Model Code³⁾の算定式を用い、圧

縮強度 $f'_c (= 26.4\text{MPa})$ より $f_t = 2.10(\text{MPa})$ とした。また、破壊エネルギー G_f についても、文献 3) を用いて定義している。

本解析では、分布ひび割れモデルを適用することにより、コンクリート要素に発生する微小ひび割れをモデル化することとした。また、分布ひび割れの発生は、コンクリートの引張強度を用い、Fixed Orthogonal Crack モデル¹⁾によって判定することとした。すなわち、主応力がコンクリートの引張強度に達すると、この主応力の方向に対して直交する方向に分布ひび割れが発生するものとして定義している。また、分布ひび割れが発生した要素のひび割れ面に沿うせん断剛性は、コンクリートの初期せん断剛性 G の 1% と設定した。その詳細は文献 1) に譲る。

図-3 (b) には鉄筋の応力-ひずみ関係を示している。鉄筋には塑性硬化係数 $H' (= 0.01E_s)$ を考慮した等方弾塑性体モデルを適用した。降伏の判定は von Mises の降伏条件に従うものとしている。

4. 数値解析結果および考察

4.1 段落しの無い場合

図-4 には、段落しの無い場合の数値解析結果について、実験結果と比較する形で示している。

(a) 図には各変位振幅における橋脚高さ方向の変位分布を示している。なお、変位分布は変位振幅を、降伏変位を $1\delta_y$ とし、 $1/2, 1, 2, 3, 4, 5\delta_y$ に関して示した。なお、図中の実験結果は実験で計測した橋脚の左右端の変位を平均したものである。

(a) 図より、実験結果は変位振幅が大きくなるにつれて橋脚全体の曲げ変形よりも、基部の損傷にともなう角折れによる変形が卓越していることが分かる。解析結果は、橋脚基部における角折れや橋脚全体の曲げ変形を良好に再現していることが分かる。

(b) 図には、載荷点反力と載荷点変位の関係(以後、 $P-\delta$ 曲線)を示している。(b) 図より、曲げひび割れ発生前の弾性域における剛性勾配

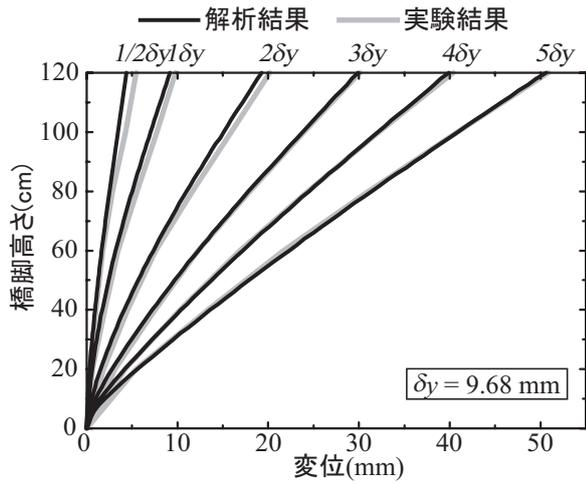
は実験結果と解析結果でほぼ等しいことが分かる。その後、曲げひび割れの発生および開口によって剛性勾配が低下する点に関しても、解析結果は実験結果を再現し、最大耐力点近傍までは実験結果と解析結果はほぼ対応している。これより、本解析結果は弾性状態における剛性勾配を高い精度で再現しており、基部にひび割れが発生し剛性勾配が低下する領域や主鉄筋が降伏する領域に関しても高い再現性があることが明らかになった。これより、本解析法を適用することにより、各領域の損傷状態や $P-\delta$ 曲線、最大耐力に関しても精度よく評価可能であることが明らかになった。

(c) 図には、実験におけるひび割れ性状と解析結果によるひび割れ予想図を重ね合わせる形で示している。実験でのひび割れは黒い線で示している。解析結果は、ひずみコンター図で示されており、コンターレベルは材料構成則に対応させている。解析では、コンクリートの引張ひずみが図-3 (a) の $\epsilon_3 (= 4300\mu)$ を越えるとひび割れが開口するものと仮定している。(c) 図より、解析でのひび割れ(図中、黒色コンター)の本数や位置および方向と長さは実験でのひび割れ(図中、黒線)と比較的良好に対応していることから、本解析結果は、ひび割れ性状についても実験結果をよく再現しており、損傷モード等の推定評価にも十分適用可能であることが明らかになった。なお、基部の広域のひび割れについては、鉄筋とコンクリートを完全付着としたことによる影響と考えられる。

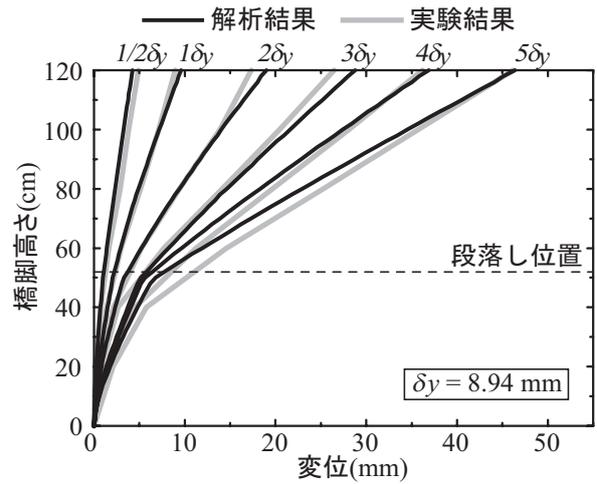
4.2 段落しを有する場合

図-5 には、段落しを有する場合の数値解析結果について、図-4 と同様に実験結果と比較する形で示している。実験結果では、段落しを有する場合には段落しの無い場合と比較して降伏荷重および最大荷重は 5 kN 程度低下し、損傷位置は基部から段落し位置に移行している。

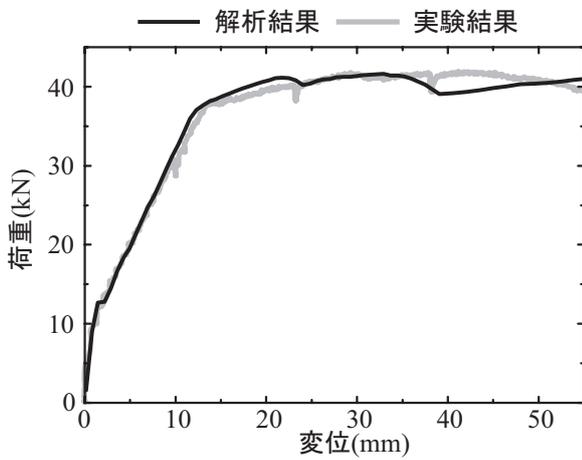
(a) 図には、降伏変位の $1/2$ あるいは整数倍における橋脚の高さ方向変位分布を示している。(a) 図より、実験結果では基部における角折れが



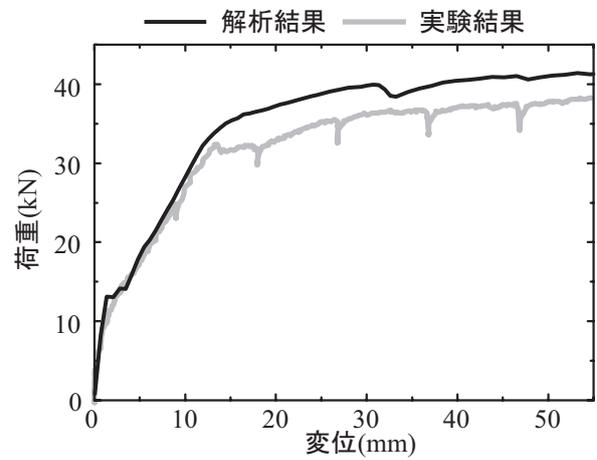
(a) 橋脚高さ方向変位分布



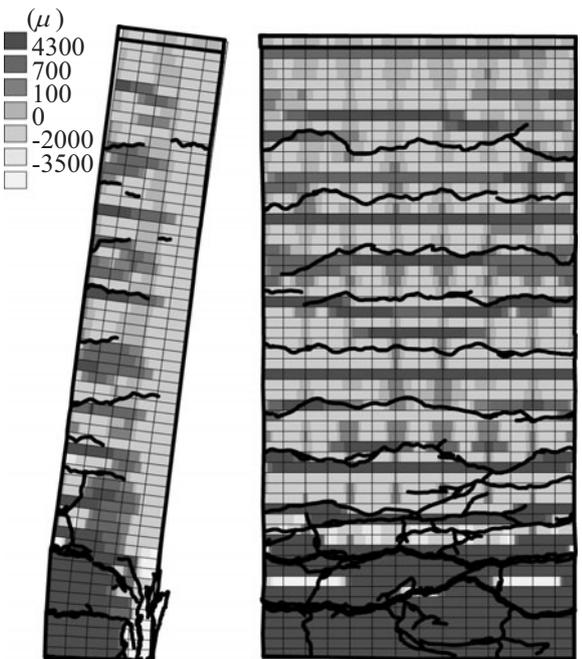
(a) 橋脚高さ方向変位分布



(b) P-δ 曲線

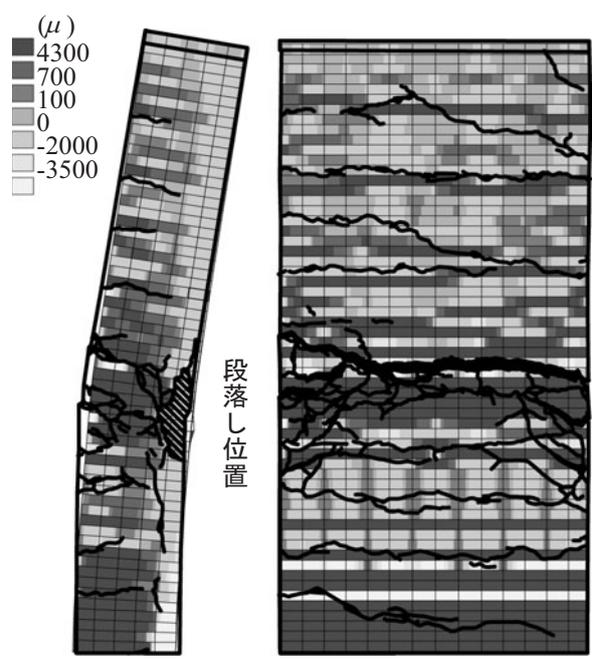


(b) P-δ 曲線



(c) 実験結果と解析結果におけるひび割れ性状の比較

図-4 段落しの無い場合の数値解析結果



(c) 実験結果と解析結果におけるひび割れ性状の比較

図-5 段落しを有する場合の数値解析結果

顕著ではなくなるものの、段落し近傍部における角折れが顕在化していることが分かる。これより、段落しを有する場合には、損傷域が基部から段落し部近傍に移行していることがうかがわれる。一方、解析結果は、これらの性状をよく再現しており、基部の角折れが抑制され段落し部における角折れが卓越している状態が再現されている。なお、(a)図では実験結果と解析結果で角折れ位置が多少異なっている。これは、実験結果の場合には変位計測点の間隔が大きく設定され、実段落し位置に測定点がないのに対して、解析結果の場合には段落し部を含め連続的な変位分布が示されていることによるものと考えられる。

(b)図には、橋脚部の $P-\delta$ 曲線を示している。(b)図より、段落しの無い場合と同様に解析結果は、最大耐力近傍まで大略実験結果を再現していることが分かる。しかしながら、その最大耐力は実験結果を若干過大評価する傾向を示している。これは、解析結果では段落し部の曲げひび割れ発生後の断面剛性が若干過大評価する傾向にあることによるものと推察される。

(c)図には解析結果のひび割れ分布を実験結果のそれと重ね合わせる形で示している。(c)図より、本解析結果は段落し部近傍の損傷をよく再現していることが分かる。以上のように、解析結果は段落しを有することによる損傷モードの移行を良好に再現できているところから、提案の手法は段落しを有する場合においても十分な精度で耐荷性能を評価可能であるものと判断される。

4.3 橋梁全体系の影響

本検討は2径間連続の橋梁全体系をモデル化した数値解析を行い、実験結果と比較したものである。橋梁全体系をモデル化することにより、支承の動き方の影響や、各支点の支承条件、桁剛性などのパラメータがすべて考慮されていることとなる。このような全体系を考慮した状態では、供試体へ入力される力が複雑になること

が容易に考えられる。本数値解析の再現性を検討した結果、変形状態やその時の荷重、ひび割れ状態共に良好な再現性を示しており、強制変位により桁及び支承を介して供試体に作用する力が大略等しく評価されているものと考えられる。これより、本手法により橋梁全体系をモデル化した場合についても、十分な精度を持った解析が可能であることが明らかとなった。

5. まとめ

本研究では、橋梁全体系を模擬した状態で段落し有りの場合も含めた橋脚の耐荷性能を精度よく評価する手法を確立することを目的に、提案の解析手法の妥当性を実験結果と比較する形で検討した。本研究より得られた結果を整理すると、以下のように示される。

- 1) 橋脚の変形性状は、段落し部の有無にかかわらず、提案の解析手法を用いることにより大略再現可能である。
- 2) 最大耐力は、段落しの無い場合には精度よく評価可能であるが、段落しを有する場合には多少過大評価する傾向にある。
- 3) 提案の解析手法を用いることにより、ひび割れの発生・開口等損傷の程度や損傷が集中する位置も、大略再現可能である。
- 4) 橋梁全体系を適切にモデル化することにより、本解析手法によって橋梁全体を考慮した解析が可能である。

参考文献

- 1) Nolinear Analysis User's Manual (7.2), TNO Building and Construction Research.
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書（2002年制定）構造性能照査編，2002。
- 3) CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford