

橋梁全体系を模擬した壁式RC橋脚模型の性能評価に関する解析的研究

Numerical analysis on performance for wall-type RC pier of two-span continual bridge model

(独)北海道開発土木研究所 ○正員 岡田 慎哉 (Shi-nya Okada)
 室蘭工業大学 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
 室蘭工業大学 正員 張 広鋒 (Guangfeng Zhang)
 (株)構研エンジニアリング 正員 京田 英宏 (Hidehiro Kyoda)

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、特に段落としを有する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ところである。さらに、今後土木構造物の設計手法が性能照査型設計法に移行していくことが予想され、耐震補強の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模擬した状態で段落とし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結果に基づいて、これを再現する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。

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600mm、厚さ200mm、高さ1,200mm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100mm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において鋼板を取り付け、これに鉄筋を溶接することで定着を確保している。本研究では段落としを含めた性能の評価を目的としていることから、段落としの有無が数値解析に与える影響について検討を行うために、同形状の段落としを有する試験体を併せて製作して実験を行っている。段落としは基部より高さ520mmの位置で各面の軸方向鉄筋を1本おきに間引くことにより段落としすることとした。

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により得られた力学的特性値を示している。なお、フーチング部に配置したD19鉄筋に関しては公称値を用いている。

2.2 実験方法及び測定項目

本研究で解析対象とした実験は、2径間連続桁橋を模擬した桁および橋台を有する橋脚模型の静的載荷実験である。写真-1には、実験の状況写真を示す。

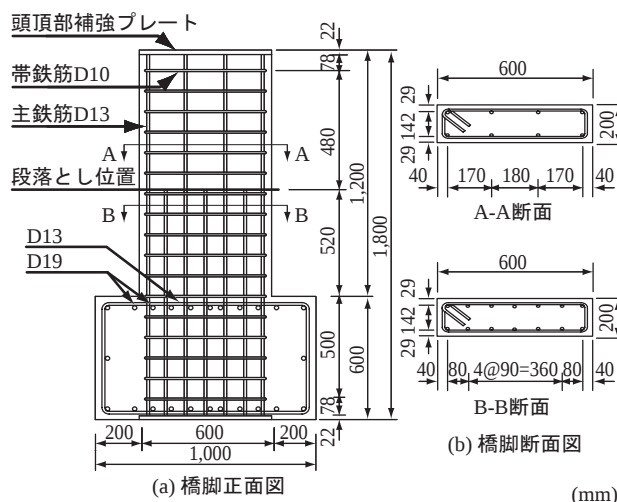


図-1 試験体の形状寸法、配筋状況
(段落としを有する場合)

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 f'_c (MPa)	降伏強度 f_y (MPa)	弾性係数 E (GPa)	ポアソン比 ν
コンクリート	24.0	-	25.0	0.2
鉄筋				
D10	-	375	206	0.3
D13	-	401	206	0.3

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

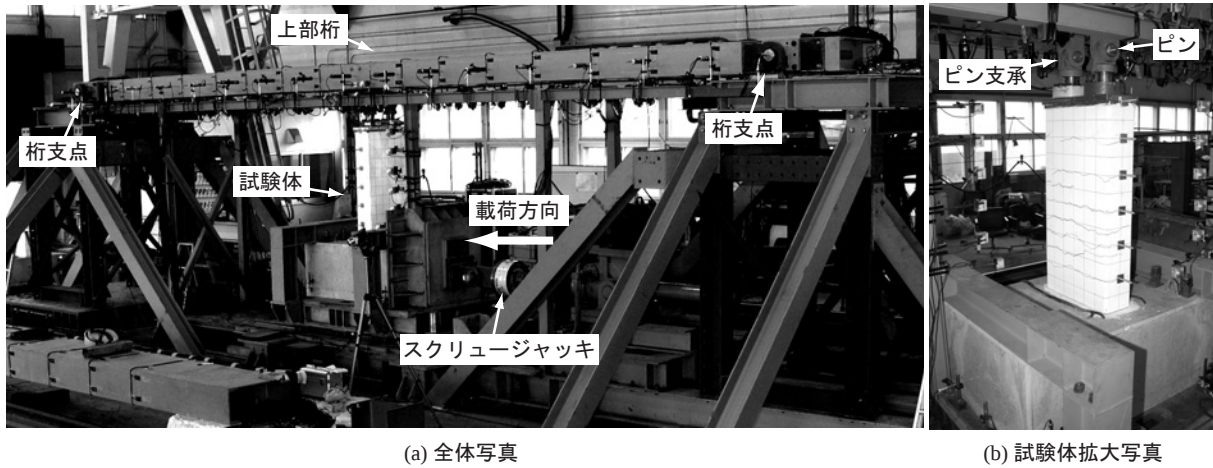
桁は、1径間5,000mm、全体で11,000mmの2径間連続桁模型である。桁模型は幅700mm、桁高274mmの箱型断面とした。桁模型は反力をとるために両橋台上で回転のみを許容するピン支持とし、支承についてもピン支承とした。橋脚のフーチング下部には橋軸方向にリニアールを設置し、橋軸方向のみ変位を許容する構造とした。実験は橋脚のフーチング部正面に橋軸方向に水平に強制変位を入力することで荷重を作用させた。

実験における測定項目は、1) 鉄筋のひずみ、2) 桁、橋台および橋脚の変位量および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



(a) 全体写真

(b) 試験体拡大写真

写真-1 実験状況

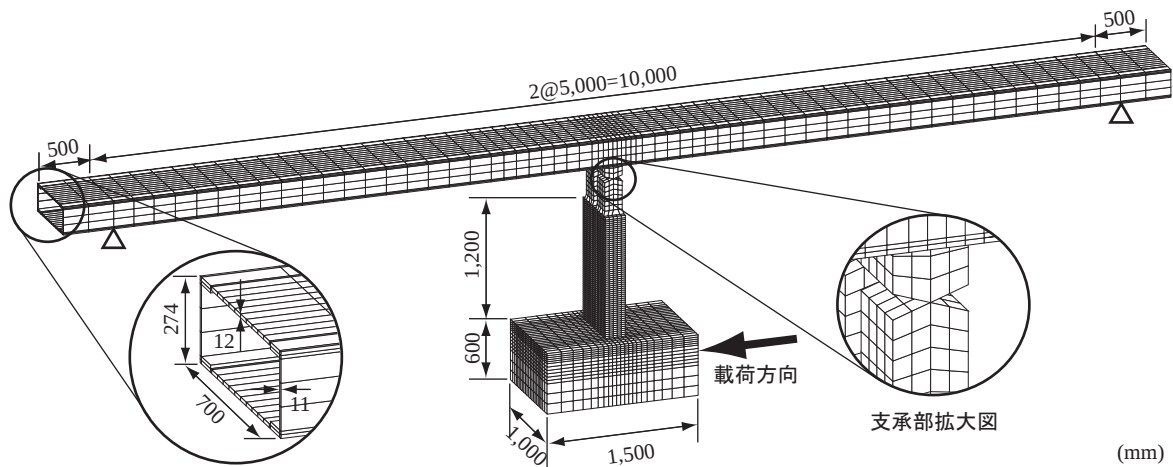
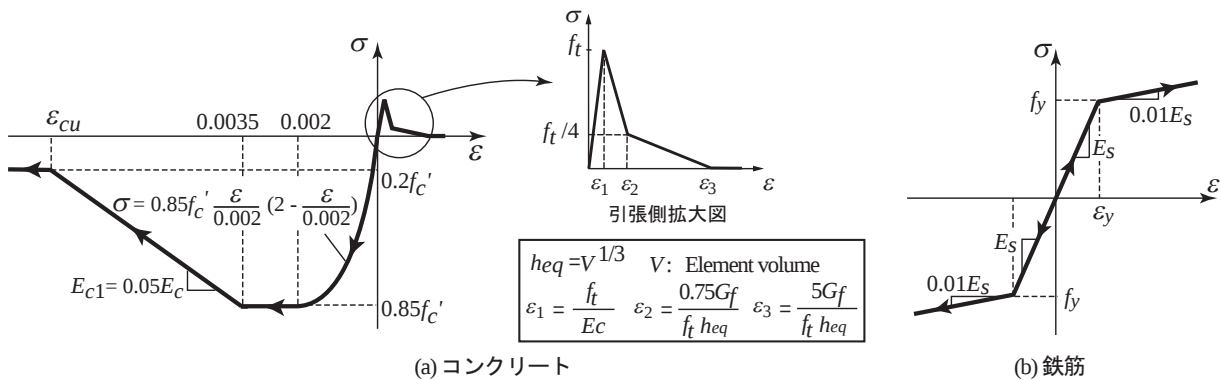


図-2 要素分割状況



(a) コンクリート

(b) 鉄筋

図-3 材料構成則

を示している。コンクリート、支承部および上部桁は8節点固体要素、鉄筋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を橋軸直角、および鉛直方向変位成分に拘束し、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、実験条件に合わせ、ピン支承と同様に橋軸方向の回転を許容するようにモデル化している。

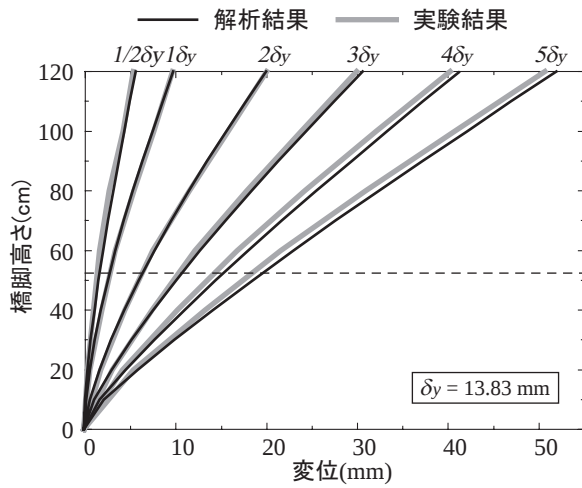
数値解析における荷重方法は、実験と同様にフーチング部に強制変位を与えることにより実施している。強制変位

作用位置は実験に則してフーチング正面とした。

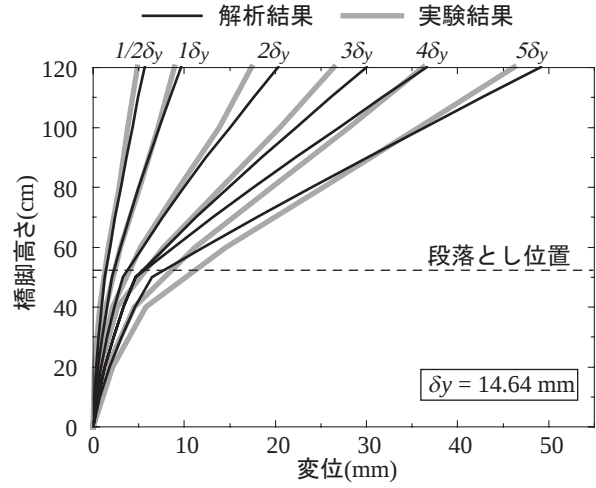
なお、収束計算にはNewton-Raphson法を採用している。

3.2 材料構成則

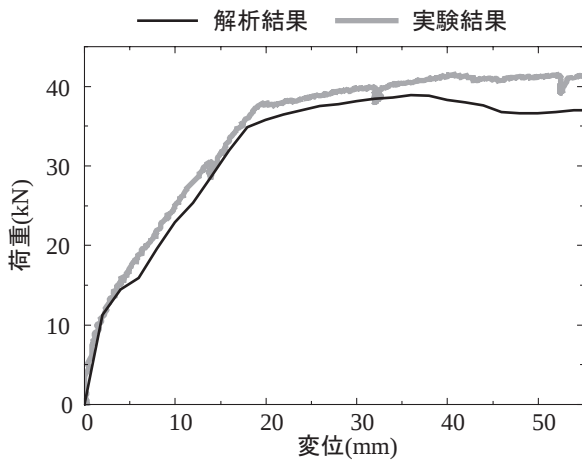
図-3(a)には、本数値解析に適用したコンクリートの応力-ひずみ関係を示している。コンクリートの材料構成則に関しては、圧縮側には材料実験から得られた圧縮強度 f'_c を用いて、圧縮ひずみ $3,500 \mu$ までは土木学会コンクリート標準示方書²⁾に基づいて定式化し、 $3,500 \mu$ 以後は初期弾性係数の0.05倍で $0.2f'_c$ まで線形軟化するモデルを用いている。また、降伏の判定には von Mises の降伏条件



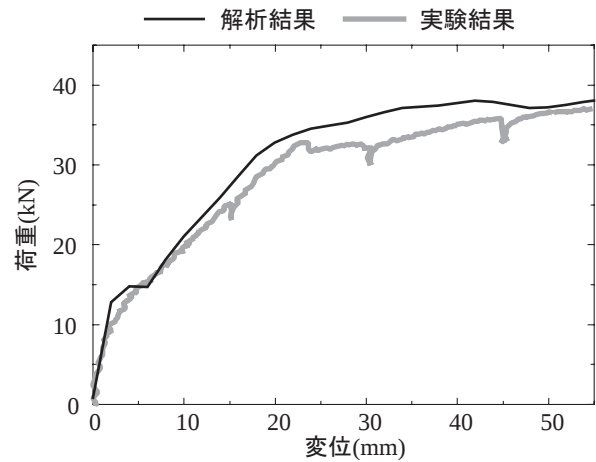
(a) 橋脚高さ方向変位分布



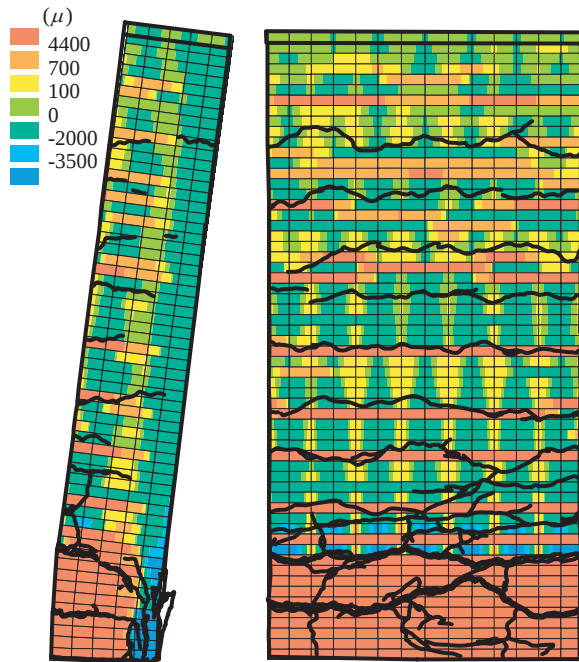
(a) 橋脚高さ方向変位分布



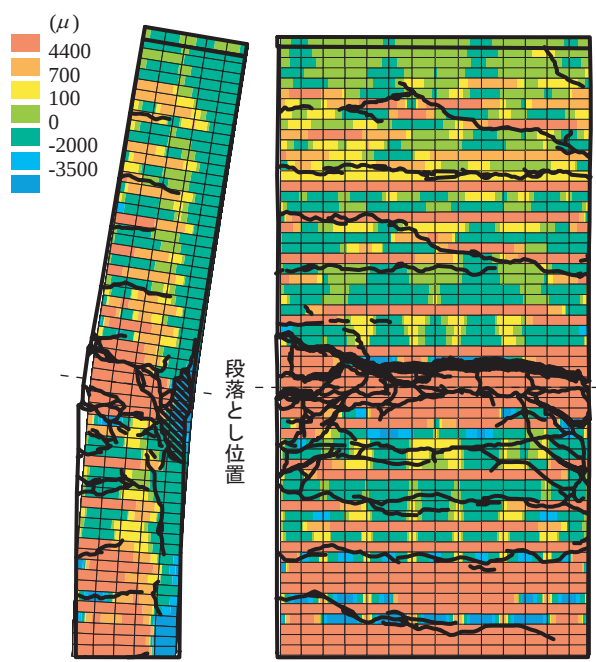
(b) P-δ 曲線



(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



(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 段落としの無い場合の数値解析結果

図-5 段落としを有する場合の数値解析結果

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。また、破壊エネルギー G_f は、CEB-FIP Model Code³⁾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 段落としの無い場合

図-4 には、段落としを有さな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) 図には各変形量における橋脚部の変形性状を示している。データは降伏変位を $1\delta_y$ とし、 $1/2, 1, 2, 3, 4, 5\delta_y$ に関する変形性状を示している。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。

図より、実験結果は変形量が大きくなるにつれて橋脚全体の曲げ変形よりも、基部の損傷による角折れによる変形が卓越していることが分かる。解析結果はこれをよく再現し、橋脚基部の変形が卓越している状態が分かる。

(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。図より、弾性域における勾配は実験結果と解析結果でほぼ等しい。その後、基部が損傷を受け、ひび割れの開口によって勾配が変化する点に関しても解析結果は実験結果を再現しており、最大耐力点近傍までは実験結果と解析結果はほぼ等しいといえる。これより、本解析は弾性状態における剛性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。実験結果は黒い線で表されたものである。解析結果は、高さ方向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合わせている。解析結果では、コンクリートの引張ひずみが図-3 (a) の $\varepsilon_3 (= 4400\mu)$ を越える部分でひび割れが開口するとしている。図より、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、解析により損傷モード等の推定も十分可能であることが明らかになった。

4.2 段落としを有する場合

図-5 には、段落としを有する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。なお、各図は

図-4 の場合と同様である。

(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変位分布を示している。図より、実験結果では基部における角折れが図-4(a) に示す段落とし無しの場合に比べて小さくなるものの、段落とし近傍部において角折れが発生していることが分かる。これより、段落とし有りの場合には、損傷域が基部から段落とし部近傍に移行していることが分かる。一方、解析結果は、これらの性状をよく再現しており、基部の変形が抑制され段落と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、図では実験結果と解析結果で角折れ部の分布が異なっている。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ているために実段落と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とし部を含め連続的な変位分布を求めることができることによるものである。

(b) 図には、橋脚部の $P-\delta$ 曲線を示している。図より、段落とし無しの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よりも若干過大評価の傾向を示している。これより、結果解析では段落とし部の断面剛性を若干過大評価する傾向にあることが分かる。

(c) 図には解析結果のひび割れ分布を実験結果のそれを重ね合わせる形で示している。図より、本解析結果は段落とし部の損傷をよく再現していることが分かる。解析結果は段落としによる損傷モードの移行にもよく追従していることから、提案の手法は損傷評価に関しては段落とし部を有する場合においても十分な精度を有しているものと判断される。

5. まとめ

本研究では、橋梁全体系を模擬した状態で段落とし有りの場合も含めた橋脚の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を行った。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、段落と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) 耐力評価に関しては、段落とし無しの場合には精度よく評価可能であるが、段落とし有りの場合には多少過大評価の傾向にある。
- 3) 提案の解析手法を用いることにより、ひび割れの発生等損傷の程度やそのモードに関しても、大略再現可能である。

今後は、段落とし部の更なる精度向上に関する検討を実施し、今後の性能照査型設計に役立てていきたい。

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）構造型性能照査編，2002.
- 3) CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford