

模型地盤内に設置された鉄筋比が少ないケーソン基礎構造 の正負交番載荷実験の再現解析

土屋智史¹・矢部正明²・佐藤信光³

¹正会員（株）コムスエンジニアリング（〒113-0023 東京都文京区向丘1-1-17タカサキビル6階）
²正会員（株）長 大 構造事業本部（〒305-0821 茨城県つくば市東平塚730）
³正会員（独法）水資源機構 総合技術センター（〒338-0812 埼玉県さいたま市桜区神田936番地）

1. はじめに

既設のRC構造物の中には、現在の設計基準の観点から見ると軸方向鉄筋比や帯鉄筋比が少ないものが数多く存在している。1995年兵庫県南部地震以降、精力的に行われている耐震補強であるが、そのような低鉄筋比のRC構造物の耐震補強は、現在でも多くの課題を有している。特に、レベル2地震動を対象とした耐震設計で重要となる構造物の耐力と変形能が、設計基準に示されている方法によって評価できないことが、耐震補強設計を難しくしている。当然のことであるが、現在の設計基準に規定されている耐力や変形能の評価方法や照査方法は、適切な鉄筋比等の構造細目を前提としている¹⁾からである。低鉄筋比のRC構造物は、ひびわれ発生耐力後急激に耐力が低下するが、降伏後も鉄筋が破断するまでは、相応の変形能を示すことが既往の実証的研究^{2)~6)}によって報告されている。特に、文献2)と3)および4)は、低鉄筋比のRC構造物の降伏後の変形能の評価は、RCとしての引張剛性の評価が重要であることを示している。

本報告は、低鉄筋比のRC構造物であるダム門柱の耐力や変形能を評価する方法として、RC構造物を対象とした2次元非線形有限要素法が適用できないかを検討したものである。具体的には、模型地盤内に設置された鉄筋比が少ないケーソン基礎構造の正負交番載荷実験結果を、2次元非線形有限要素法（WCOMD研究版）によってどの程度再現できるかを検討した。

2. 検討対象としたケーソン基礎の載荷実験

図-1は、既設ケーソン基礎構造を対象に、軸方向鉄筋

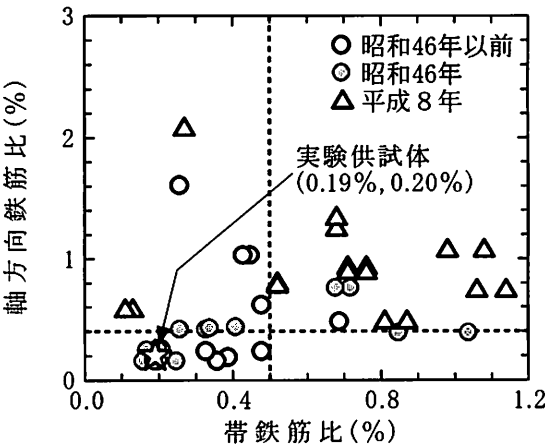


図-1 既設ケーソン基礎構造の鉄筋比の一例⁷⁾

比と帯鉄筋比の関係を整理したもの⁷⁾である。1995年兵庫県南部地震以降の設計基準に従って設計されたケーソン基礎構造（図中の平成8年以降）に比較して、昭和46年とそれ以前の設計基準に従って設計されたケーソン基礎構造の軸方向鉄筋比と帯鉄筋比が極端に少ないことがわかる。文献7)では、軸方向鉄筋比0.4%以下、帯鉄筋比0.5%以下の領域にあるケーソン基礎構造は、ひびわれ発生後に脆性的な曲げ破壊やせん断破壊のいずれかが生じる危険性が高いとしており、図中に示すように、この領域にあるケーソン基礎構造の実験供試体を作成して正負交番載荷実験を行っている。古い基準で設計されたダム門柱の軸方向鉄筋比や帯鉄筋比も、0.2%以下となる例が多いことから、本報告では、模型地盤内に設置された軸方向鉄筋比0.2%、帯鉄筋比0.19%のケーソン基礎構造（実験供試体）の正負交番載荷実験結果を検討対象とした。

実験の詳細は、文献7)を参照されたい。正負交番載荷

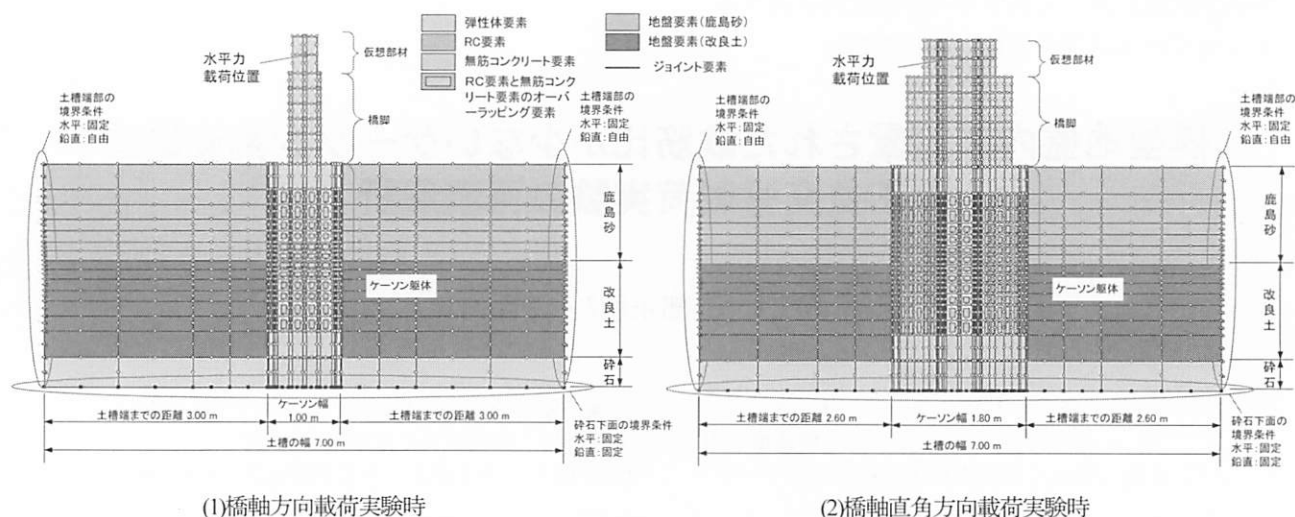


図-2 2次元非線形有限要素を用いた載荷実験の解析モデル

実験は、鉛直方向荷重を一定とし、基準変位 δy の正数倍の変位を3回ずつ繰り返す変位制御で行われている。基準変位 δy は、道路橋示方書IV下部構造編⁹⁾に従って、橋軸方向（短辺方向）を対象とした載荷の場合は、基礎背面側の壁における全ての軸方向鉄筋が降伏する時の変位 $\delta y=11.0\text{mm}$ 、橋軸直角方向（長辺方向）を対象とした載荷の場合は、90°円弧内に含まれる全ての軸方向鉄筋が降伏する時の変位 $\delta y=2.9\text{mm}$ としている。

3. 解析モデル

図-2に橋軸方向載荷時と橋軸直角方向載荷時の解析モデルを示す。用いた解析コードは、数本のひびわれと鉄筋とを含んだ有限領域を連続体と考え、その平均的な性質を1つの有限要素モデルで表現した分散ひびわれモデルを採用しているWCOMD研究版⁹⁾である。相対的にケーソン躯体よりも剛に製作されている橋脚（載荷位置をモデル化した仮想部材を含む）とケーソンの頂版と底版および砕石が敷かれた支持地盤は弾性要素でモデル化した。ケーソン基礎躯体は、奥行き方向に、RC要素と無筋要素を重ねる（オーバーラップ）ことでモデル化している。周辺地盤のせん断応力-せん断ひずみ関係は、大崎モデル¹⁰⁾を用いた表した。ケーソン基礎と周辺地盤間には、接合要素を配置して、ケーソン基礎と周辺地盤間のはく離とケーソン基礎と周辺地盤間の鉛直方向の滑りを考慮した。なお、鹿島砂は軟らかい層、改良土は硬い層を模擬している。コンクリートと鉄筋および周辺地盤（鹿島砂と改良土）の諸定数は、実験時に行われた材料試験結果の平均値や土質試験結果を用いて定めた。鉄筋は、破断強度に達すると、それ以降鉄筋の応力度は零となるようにモデル化している。

前述したように、低鉄筋比のRC構造物の降伏後の変形能の評価はRCとしての引張剛性の評価が重要であるが、WCOMDのテンションスティフニングモデルは、一般的なRC構造の鉄筋比の実験から得られたものである。低鉄筋比の一軸引張部材の引張剛性は剛となる¹¹⁾という実験的事実等を頼りに、限界鉄筋比に基づきRC要素と無筋要素の重ね合わせ時の配分を調整することで、低鉄筋比への適用を可能にしている。

4. 低鉄筋比ケーソン基礎構造正負交番載荷実験の再現解析

(1) 水平力-水平変位関係の再現性

図-3と図-4は、橋軸方向を対象とした正負交番載荷実験における水平力-水平変位関係を実験と解析で比較したものである。A点は最大荷重発生時で、実験が5.17mm,

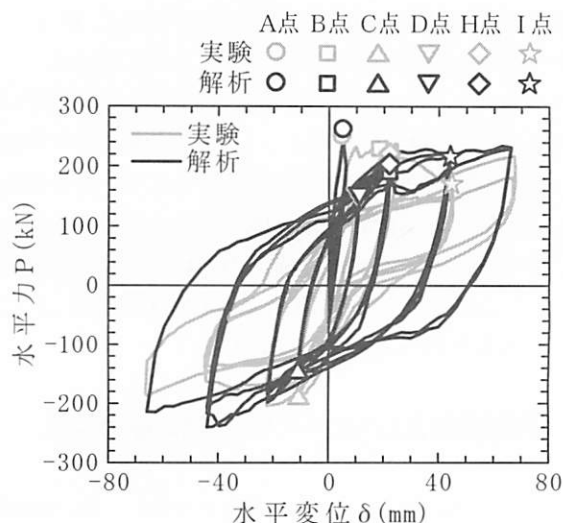


図-3 橋軸方向載荷時の水平力-水平変位関係

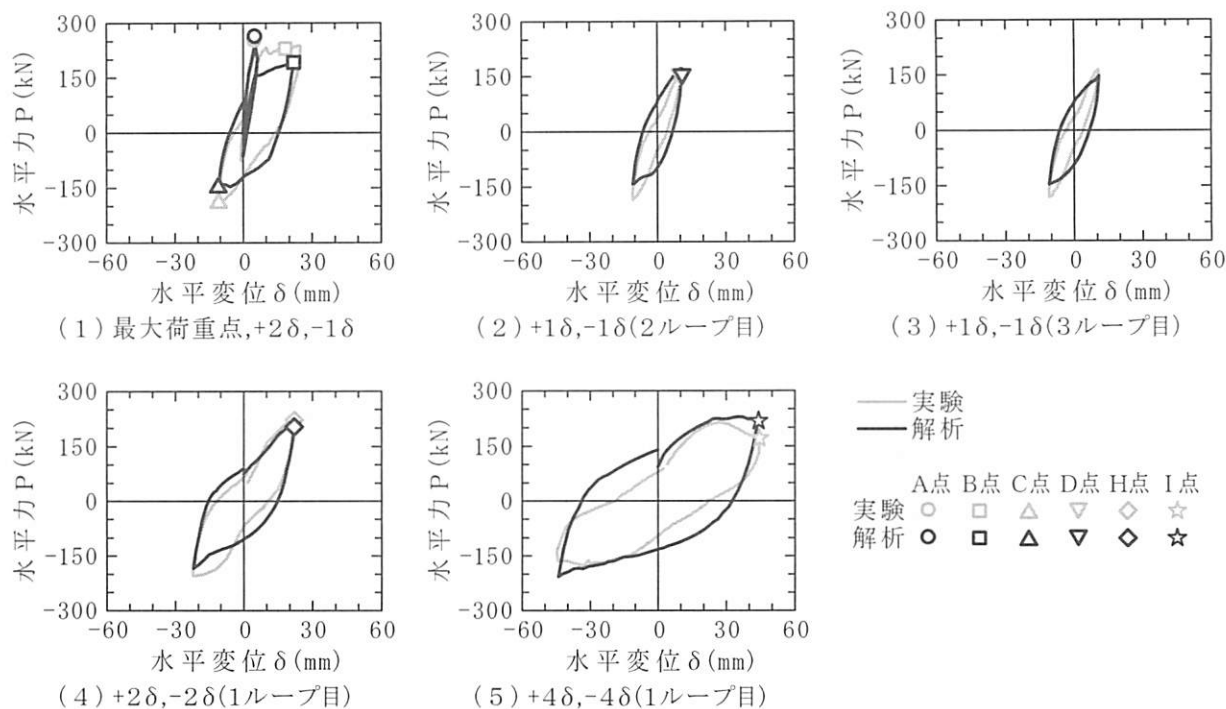


図-4 橋軸方向載荷時における水平力-水平変位関係のループ毎の比較

250.4kNに対して解析が5.5mm, 260.46kNである。B点は+2δy(実験計画では+1δyの予定だった)で、実験が18.43mm, 230.2kNに対して解析が22mm, 191.33kNである。C点は-1δy(1cycle)で実験が-10.75mm, -191.4kNに対して解析が-11.0mm, -148.18kNである。D点は+1δy(2cycle)で、実験が10.1mm, 155.4kNに対して解析が11.0mm, 155.14kNである。H点は+2δy(1cycle)であるが、図-3より概ね実験結果において水平力が明確に低下し始める点であることが分かる。H点は、実験が22.05mm, 221.6kNに対して解

析が22.0mm, 203.88kNである。I点は+4δy(1cycle)は、水平力が降伏耐力(1δy時の水平力)相当に低下しており、実験が44.46mm, 170.6kNに対して解析が44.0mm, 216.73kNである。

図-4は、1サイクル間の水平力-水平変位関係を実験と解析で比較したものである。水平力が低下し始めるH点までは、解析は実験結果とほぼ等しいループを描いていることがわかる。水平力が降伏耐力相当に低下したI点では、解析結果に水平力の低下が生じていないため、解析より得られる水平力-水平変位関係の面積は、実験より大きく評価されていることがわかる。

図-5と図-6は、橋軸直角方向を対象とした正負交番載荷実験における水平力-水平変位関係を実験と解析で比較したものである。橋軸直角方向載荷では、図に示したI点までは、明確な水平力の低下が生じていないが、A点は+1δy(1cycle)で、実験が3.28mm, 288.2kNに対して解析が2.9mm, 217.9kNである。B点は-1δy(1cycle)で、実験が-2.92mm, -279.5kNに対して解析が-2.9mm, -233.59kNである。E点は+2δy(1cycle)で、実験が6.57mm, 336.2kNに対して解析が5.8mm, 254.48kNである。F点は-2δy(1cycle)で、実験が-6.3mm, -318.0kNに対して解析が-5.8mm, -235.65kNである。H点は+4δyで実験が11.86mm, 338.5kNに対して解析が11.6mm, 281.94kNである。I点は+6δyで、これ以降の載荷では水平力が明確に低下し始めている。実験17.24mm, 355.9kNに対して解析が17.4mm, 301.26kNとなっている。

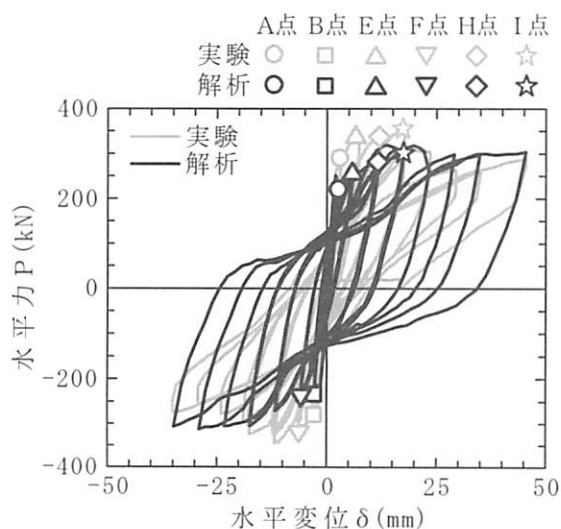


図-5 橋軸直角方向載荷時の水平力-水平変位関係

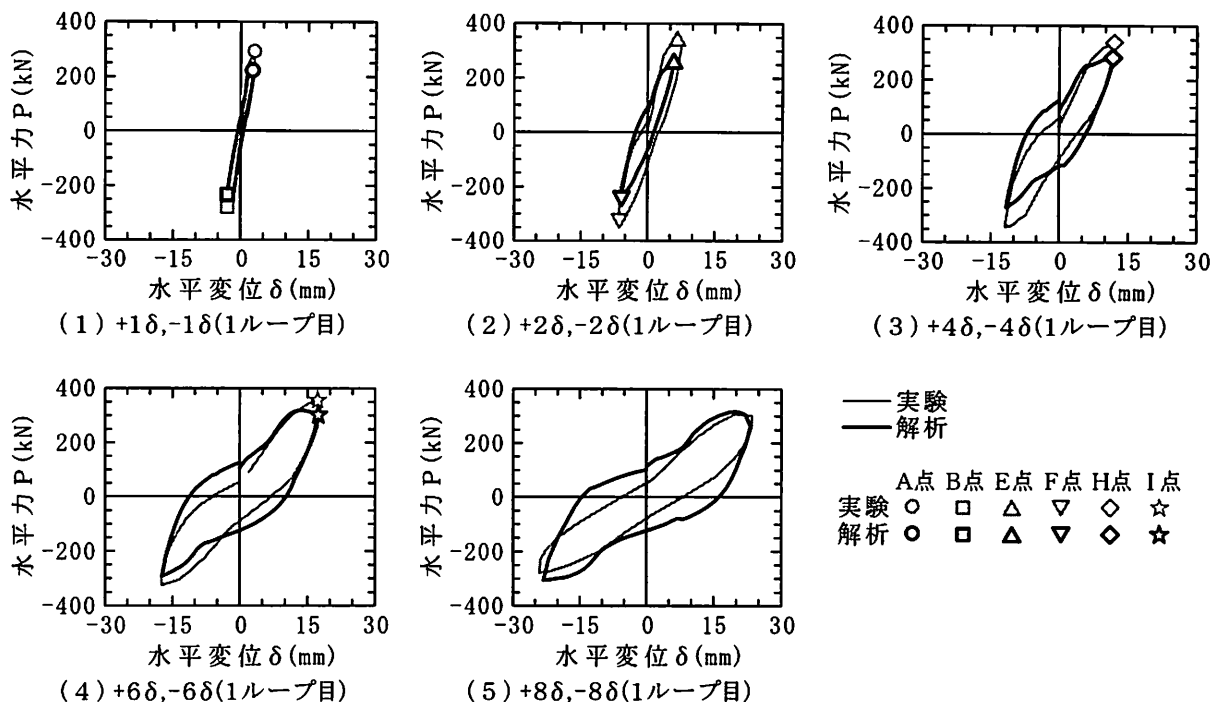


図-6 橋軸直角方向載荷時における水平力-水平変位関係のループ毎の比較

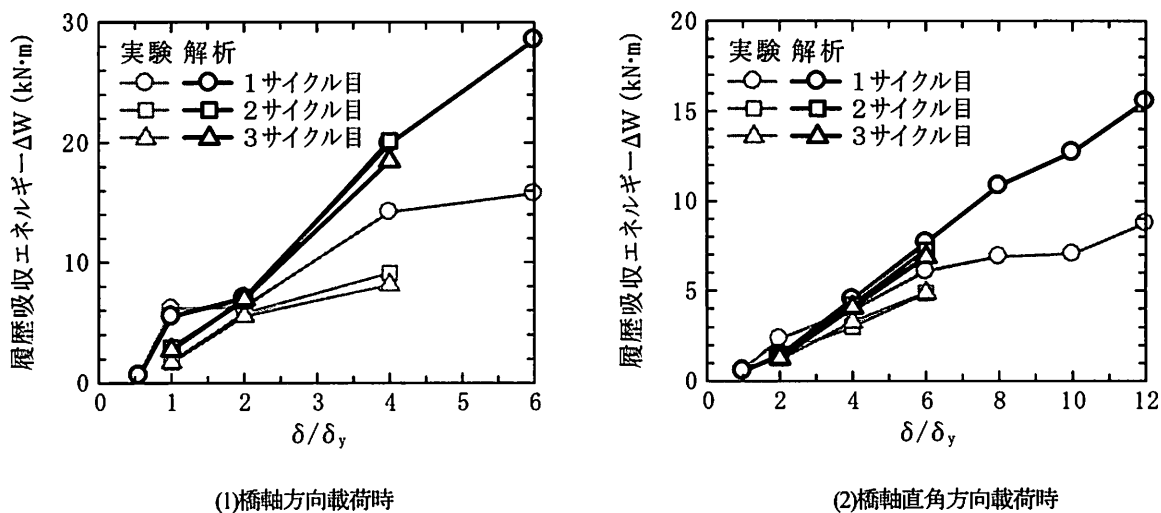


図-7 履歴吸収エネルギーの比較

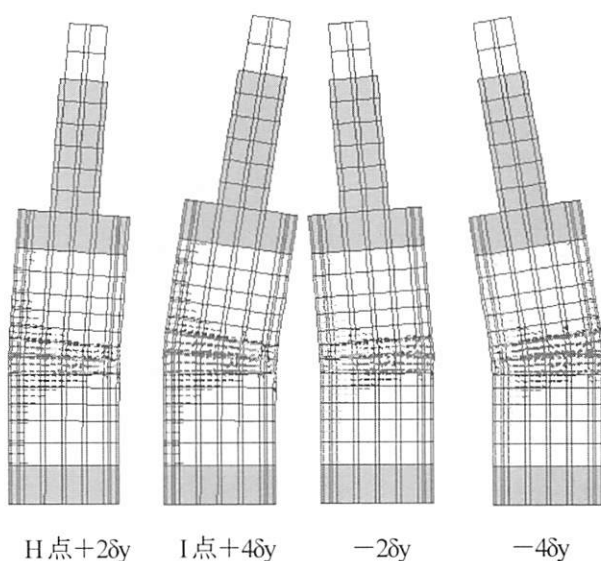
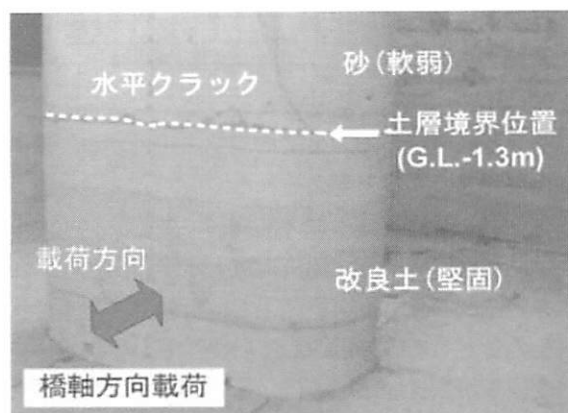
図-6は、1サイクル間の水平力-水平変位関係を実験と解析で比較したものである。 $+2\delta_y$ (E点)・ $-2\delta_y$ (F点)までは、解析は実験結果とほぼ等しいループを描いていることがわかる。それ以降は、実験より得られる水平力-水平変位関係が紡錘形ではなく、細長い長円形となっており、解析ではこの形状を再現できていないため、解析より得られる水平力-水平変位関係の面積は、実験より大きく評価されていることがわかる。

図-7は、実験と解析より得られた水平力-水平変位関係の面積から求めた履歴吸収エネルギーを比較したものである。前述した水平力-水平変位関係の比較結果から

わかるように、両載荷方向ともに、実験結果における水平力が明確に低下し始める点までは、実験結果と解析結果が近似していることがわかる。具体的には、橋軸方向載荷時は $2\delta_y$ まで、橋軸直角方向載荷時は $6\delta_y$ までは、実験と解析より得られる履歴吸収エネルギーが近似している。

(2) 損傷の再現性

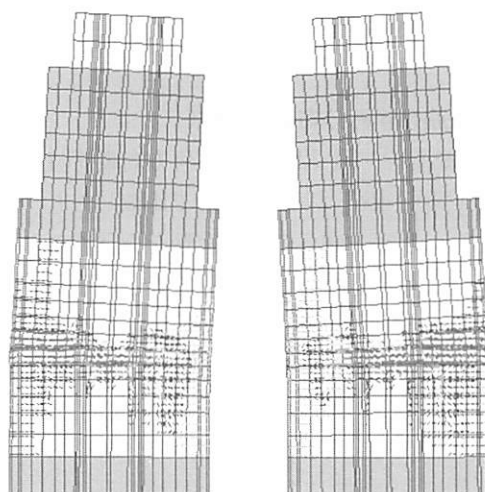
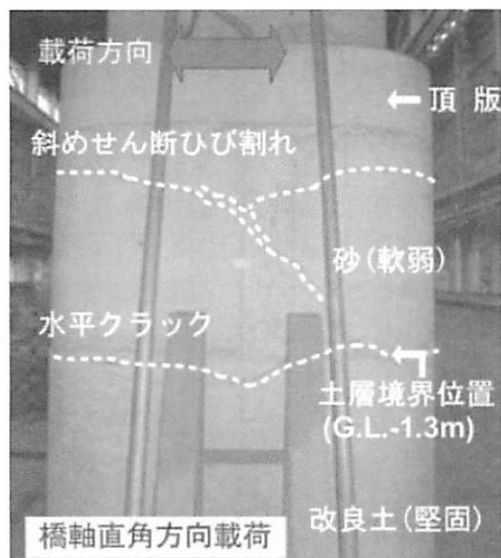
図-8は橋軸方向載荷時、図-9は橋軸直角方向載荷時の実験終了時の損傷状況と解析より得られたひびわれ分布と変形図を比較したものである。



(1)実験後のケーソン損傷状況

(2)ひび割れ分布図と変形状況

図-8 橋軸方向載荷実験時の損傷状況の再現性



(1)実験後のケーソン基礎の損傷状況

(2)ひび割れ分布と変形

図-9 橋軸直角方向載荷時の損傷状況の再現性

橋軸方向載荷時は、周辺地盤の硬軟の境界部（鹿島砂と改良土）の境界部に水平クラックが集中して生じている⁷⁾。一般的なRC構造のように、ひびわれが分散しておらず、低鉄筋比のRC構造の典型的な損傷形態となっている。解析結果も実験結果と同様に、境界部付近に大きなクラックが集中していることがわかる。

橋軸直角方向載荷時は、頂版付近に斜めせん断ひびわれが生じており、やはり、土層境界部に水平クラックが生じている。斜めせん断ひびわれは、クラック幅0.3mm、に対して水平クラックは開口した状態で最外縁のかぶりコンクリートが剥落し、帯鉄筋が一部露出していたことから最終的な破壊形態は曲げ破壊とされている⁷⁾。解析

では、頂版付近の斜めせん断ひびわれは再現できていないが、土層境界部のクラックは再現できていることがわかる。

文献⁷⁾では、頂版付近の斜めひびわれが発生した理由として、載荷位置が低いことによってケーソン基礎天端では曲げモーメントよりも水平力が卓越していたことと、土層境界部が固定点となり、見かけ上のせん断スパン比が小さくなったため、ディープビームとして挙動したのではないかと考察されている。図-10は、ケーソン基礎単体の土層境界部を固定点とした正負交番載荷解析より得られたひびわれ分布と変形図であるが、斜めせん断ひびわれは生じていないことから、文献⁷⁾で指摘されてい

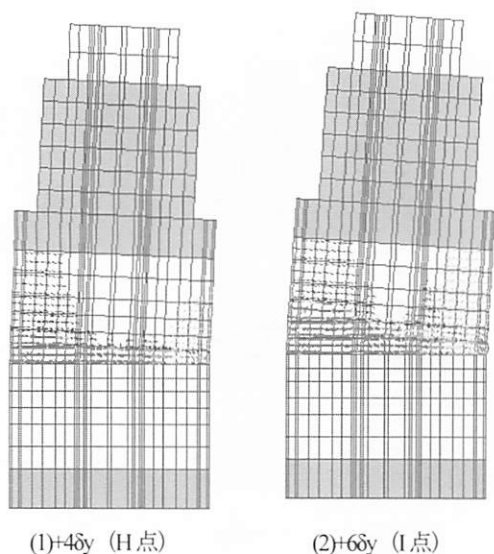


図-10 ケーソン基礎躯体単体の土層境界部を固定としたモデル

るような水平力の卓越や見かけ上せん断スパン比が小さくなったことよりも、3次元的效果等別の原因があるのではと予想される。

(3) 躯体の軸方向鉄筋ひずみ分布の再現性

図-11は橋軸方向載荷時、図-12は橋軸直角方向載荷時の軸方向鉄筋のひずみ分布を、実験と解析で比較したものである。両図とも、水平方向への載荷実験を行う前の鉛直方向荷重載荷時（死荷重時）のひずみ分布と、正負交番載荷実験において水平力が明確に低下し始める点（橋軸方向載荷時はH点、橋軸直角方向載荷時はI点）におけるひずみ分布を示している。

死荷重時のひずみ分布は、実験と解析はその分布形状だけでなく、定量的にも近似していることがわかる。

正負交番載荷時のひずみ分布は、その形状は近似しているが、発生しているひずみ量が大きく異なっていることがわかる。

図-13は、橋軸方向載荷時の最大荷重発生時（A点）における軸方向鉄筋のひずみ分布を実験と解析で比較したものである。図より、分布形状だけでなく、発生しているひずみ量も近似していることがわかる。

5. まとめ

模型地盤内に設置された鉄筋比が少ないケーソン基礎構造の正負交番載荷実験結果を、2次元非線形有限要素法によってどの程度再現できるかを検討した。前章までの検討結果から得られた結果を以下に示す。

1) 水平力ー水平関係と履歴吸収エネルギーは、実験結果において明確に水平力が低下し始める点までは、

実用上十分な精度で再現できることが確認できた。

- 2) 橋軸直角方向載荷時における頂版付近の斜めせん断ひびわれは再現することができなかったが、土層境界部に生じた曲げ損傷によるクラックを再現することはできた。斜めせん断ひびわれのクラック幅が0.3mmと小さいことを勘案すると、低鉄筋比のケーソン基礎構造の耐力と変形能を決定付ける、損傷は再現できていると考えられる。
- 3) ケーソン基礎躯体の軸方向鉄筋に生じるひずみ分布は、初期に載荷した鉛直荷重と水平方向変位量が小さい領域ならば、実験結果と解析結果は分布形状とその量ともによく近似していた。しかし、水平方向変位量が大きい領域では、その分布形状は近似しているが、その量は大きく異なっていた。
- 4) 本報告で用いた2次元非線形有限要素法は、低鉄筋比のRC構造物の耐力や変形能を評価することができていることが確認された。本報告では、実験という目指すべき解があったが、そのような解がない場合でも、2次元非線形有限要素法を用いた感度分析等を行うことによって、その耐力や変形能を推定できると考えられる。

謝辞：模型地盤内に設置された鉄筋比が少ないケーソン基礎構造の正負交番載荷実験結果は、国立研究開発法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループよりご提供頂いた。困難かつ貴重な実験を行ったことに敬意を表するとともに、貴重な実験データをご提供頂いたことに、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会：2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編：標準〕7編：鉄筋コンクリートの前提および構造細目，pp.319-379，2012。
- 2) 島弘，二羽淳一郎，岡村甫：曲げを受ける低鉄筋比はりにおける脆性破壊の防止に関する検討，土木学会論文集，第378号，V-6，pp.231-237，1987。
- 3) 池田尚治，山口隆裕，後藤康之：鉄筋比の小さい鉄筋コンクリートはりの曲げ挙動に関する研究，コンクリート工學論文集，第1巻，第1号，pp.51-59，1990。
- 4) 内田裕市，瀬古繁喜，六郷恵哲，小柳治：寸法依存性に着目した低鉄筋RCはりの曲げ破壊性状，土木学会論文集，No.451，V-17，pp.129-138，1992。
- 5) 鈴木直人，井上晋，青島行男，村上弘：低鉄筋比RC部材の終局挙動に関する実験的研究，コンクリート工學年次論文集，Vol.22，No.3，pp.1489-1494，2000。

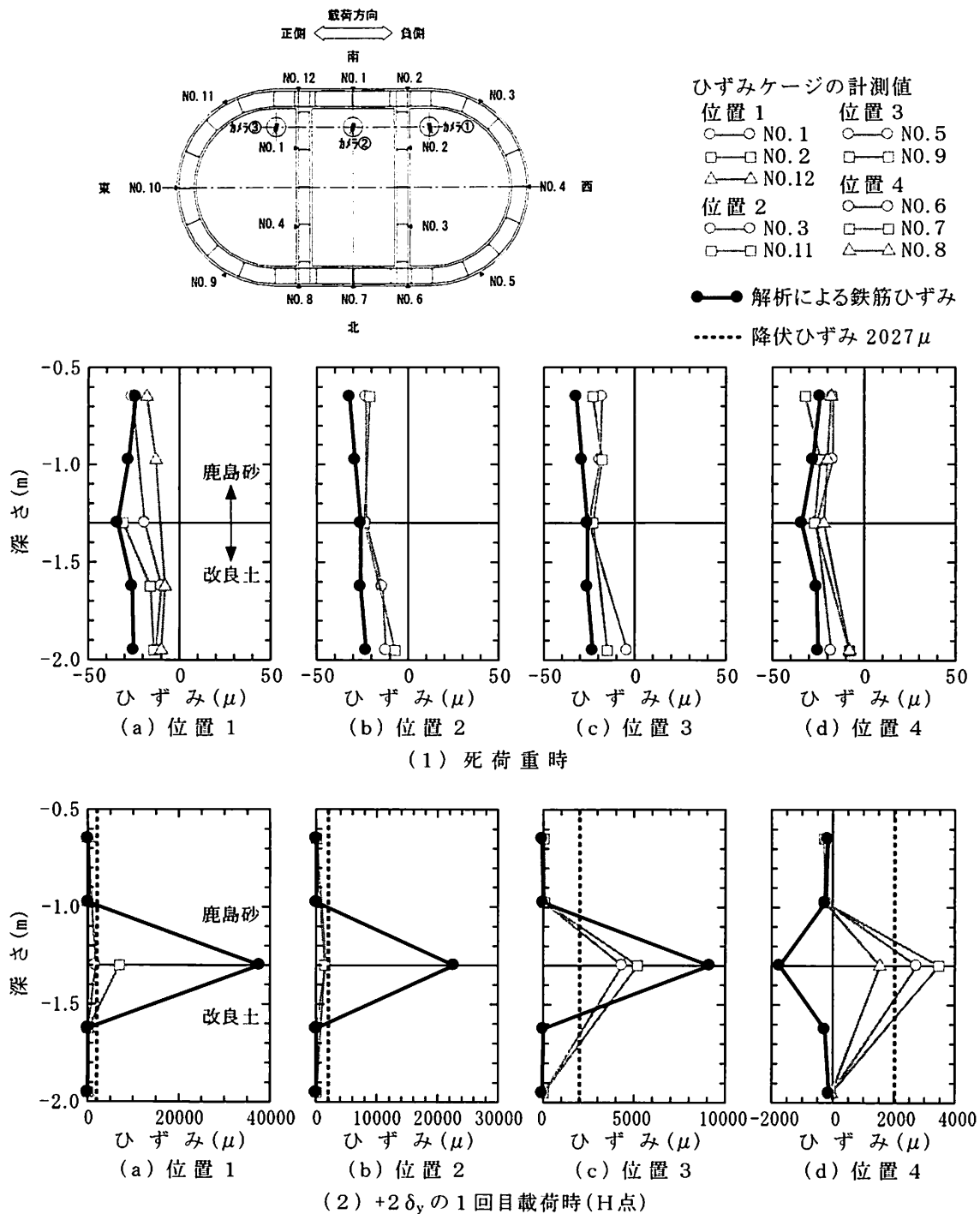


図-11 橋軸方向載荷時におけるケーソン基礎躯体の軸方向鉄筋ひずみ分布の再現性

- 6) 篠原聖二, 末崎将司, 堺淳一, 星隈順一: 低鉄筋比RC壁式橋脚の地震時破壊特性と耐力・変形能の評価, 構造工学論文集, Vol.61A, pp.265-272, 2015.
- 7) 中谷昌一, 白戸真大, 飯田明弘, 谷本俊輔, 張広鋒, 豊島孝之, 大石雅彦, 小滝勝美, 井上智裕: 共同研究報告書整理番号第417号・既設ケーソン基礎の終局状態と変形性能に関する共同研究報告書, (独) 土木研究所, 日本圧気技術協会, 2011.
- 8) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, IV下部構造編, 11.8.2基礎の降伏, pp.366-367, 2012.
- 9) 岡村甫, 前川宏一著: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991.

- 10) Y. Ohsaki, A. Hara and Y. Kiyota: Stress-strain Model of Soils for Seismic Analysis, 第5回日本地震工学シンポジウム, pp.697-704, 1978.
- 11) 玉井真一, 島弘, 出雲淳一, 岡村甫: 一軸引張部材における鉄筋の降伏以後の平均応力-平均ひずみ関係, 土木学会論文集, 第378号, V-6, pp.239-247, 1987.

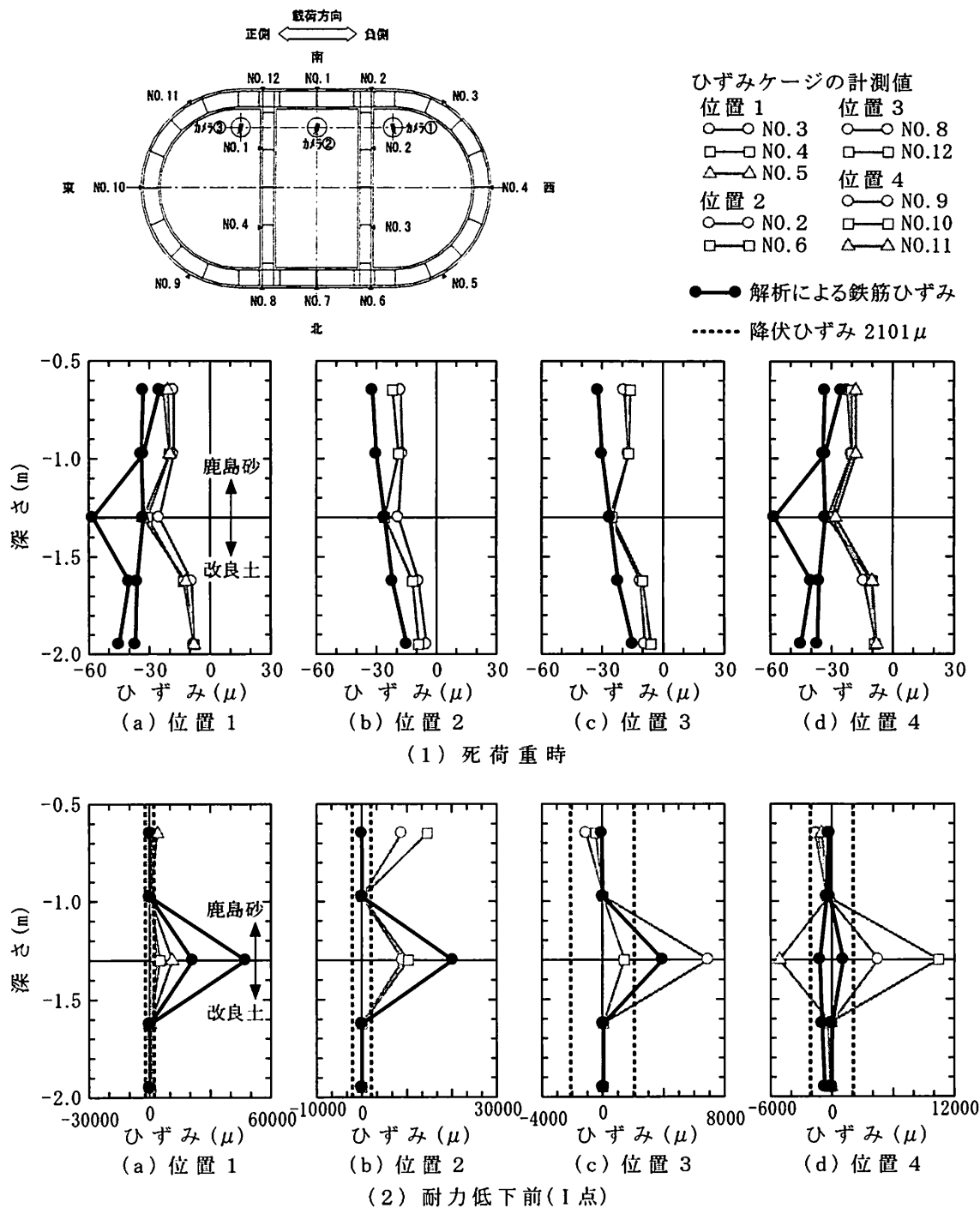


図-12 橋軸直角方向載荷時におけるケーソン基礎躯体の軸方向鉄筋ひずみ分布の再現性

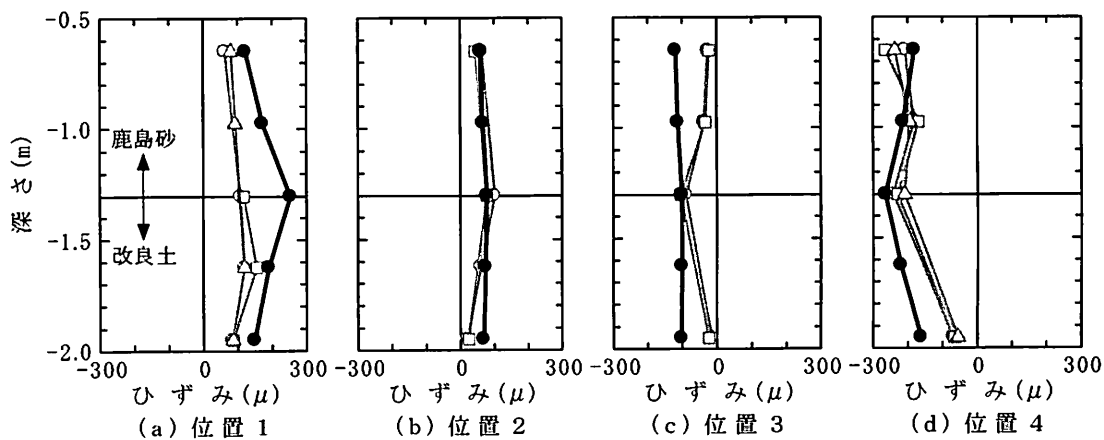


図-13 橋軸方向載荷時におけるケーソン基礎躯体の軸方向鉄筋ひずみ分布の再現性：最大荷重時 (A点)