

アンボンド高強度芯材を用いたRC橋脚の高耐震化に関する 基礎的研究

家村 浩和*・高橋 良和**・曾我部 直樹***・鵜飼 正裕****

*フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)
**正会員 工(修) 京都大学助手 工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)
***学生会員 京都大学大学院 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)
****学生会員 京都大学大学院 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

1. はじめに

兵庫県南部地震における数多くのコンクリート橋梁の崩壊・被害は、土木技術者はもちろんのこと、一般市民にも大きな衝撃を与えた。この教訓を受け、RC橋脚の曲げ、せん断補強に関する研究が精力的に進められており、合成構造橋脚の利用が現実的なものとなってきている。

高耐震性能橋脚に求められる要件を考えると、単に高い耐力、変形性能を有するだけではもはや十分ではない。想定外地震力の作用や、地震後の供用をも考慮した耐震設計が必要となってきている。現行の道路橋示方書¹⁾では、地震による損傷を限定された範囲にとどめ、地震後の残留変形を1/100 (rad) 以下に制限することが規定されている。つまり重要度の高い橋脚には、大きな靱性の確保と残留変形の低減という相反する二つのことが要求されていることになる。ただ、このような耐震性能を付与するにしても、高コストであればその利用も進まない。求められる性能に対する合理的な耐震設計による橋脚構造と、それを実現するに当たって必要となるコストの両面が満足してはじめてその利用が進むものと考えられる。

本研究では、まず二段階耐震設計法による合理的橋脚構造が備えるべき特性について考える。次に、これを実現する橋脚構造として、通常のRC橋脚の軸方向に高強度芯材を埋め込んだ橋脚を提案する。ここでは基本的性質を得るために正負交番載荷実験を行うとともに、解析により本構造の特性を検討する。

2. 合理的耐震設計 (二次剛性の活用)

現行の道路橋示方書によるRC橋脚の設計では、その復元力特性を降伏後の二次剛性を0とする完全弾塑性型にモデル化している。実際には側方鉄筋の配置や鉄筋のひずみ硬化などにより二次剛性は現れるものの、

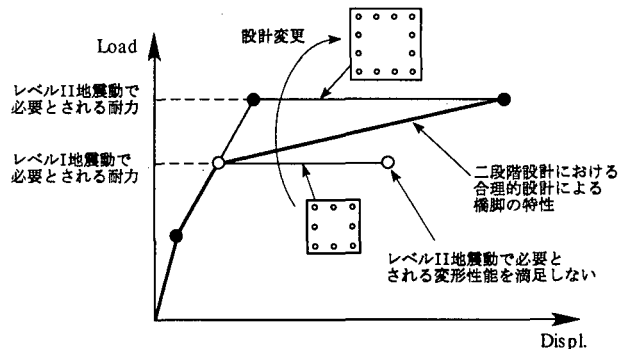


図-1 二段階設計における変位-復元力関係の概念図

様々な実験結果と照らし合わせても完全弾塑性モデルはRC橋脚の妥当な簡略モデルと言える。

一方、兵庫県南部地震以降の耐震設計の流れとして、二段階設計法が提案されている²⁾。耐震性能の照査で考慮すべき地震動として、レベルI、レベルIIの2種を考え、レベルI地震動では原則として構造物はほぼ弾性域に止まり、レベルII地震動に対しては降伏後の塑性変形・エネルギー吸収により構造物の崩壊を免れるという考え方である。鉄道構造物では、L1、L2地震動を設計想定地震動として、耐震設計が行われている³⁾。しかし実際にはレベルII地震動で期待される変形性能・耐力が大きいため、レベルI地震動に対する設計では小さな断面で満足していたものが、レベルII地震動に対応するために断面を大きくしたり鉄筋を増やすことが余儀なくされることが多い。もし構造物の二次剛性を有効に発揮することができるならば、レベルI・レベルII地震動により要求される性能を結んだ変位-復元力特性を持つ構造物が構築でき、合理的な設計ができることとなる (図-1)。

またRC橋脚はほぼ0の二次剛性を有することから、レベルII地震動では大きな非線型応答変位が生じ、復旧工事が困難なものになってしまう。このため示方書では、橋脚の残留変位 δ_R を次式により設定し、許容残

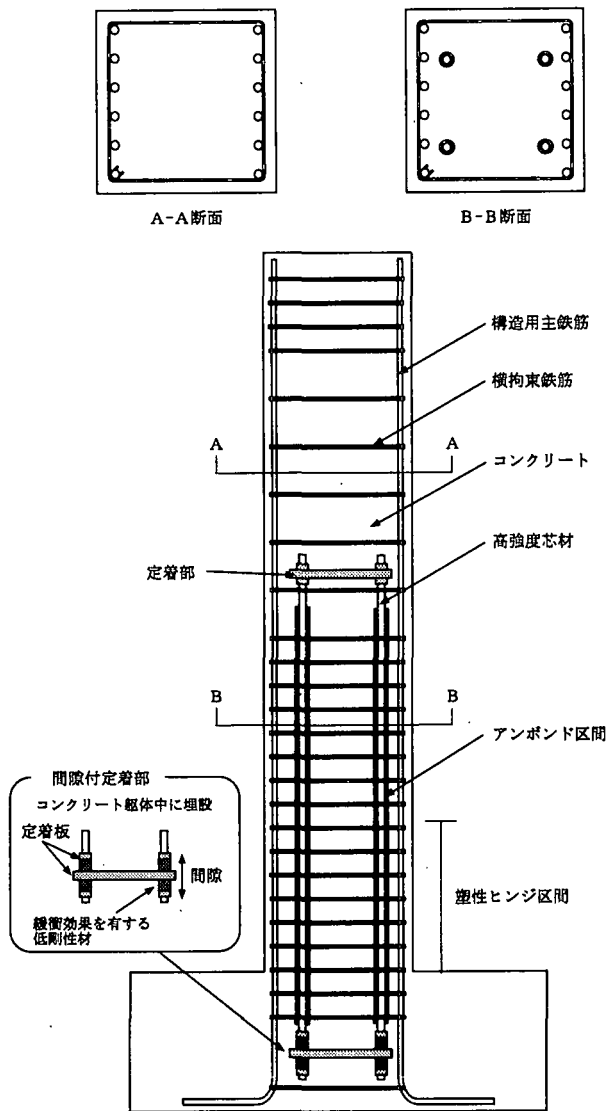


図-2 提案する橋脚構造の概念図

留変位を規定している。

$$\delta_R = c_R (\mu_R - 1) (1 - r) \delta_y \quad (1)$$

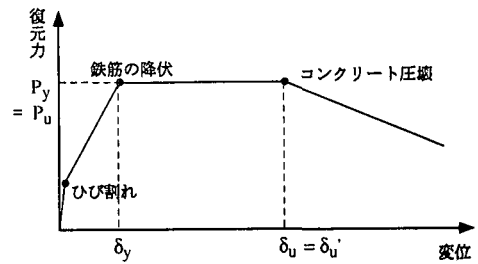
ここで c_R は残留変位補正係数、 μ_R は橋脚の応答塑性率、 δ_y は橋脚の降伏変位、そして r は橋脚の降伏剛性に対する降伏後の二次剛性の比である。この式をみれば分かるように、明らかに二次剛性比 r を大きくすると残留塑性変形が小さくなり、橋脚の耐震性能を向上することができることがわかる。

以上より、安定した二次剛性を発揮できる RC 橋脚が、次世代の高耐震性能橋脚の性質を備えているといえる。

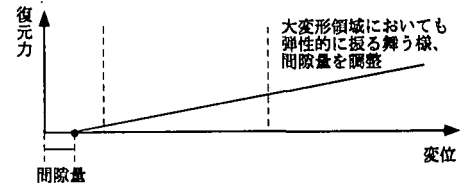
3. アンボンド芯材入り RC 橋脚

本研究で提案する橋脚構造 (UBRC) の概念を図-2 に示す。基本的構成としては、通常の RC 橋脚の断面内に芯材を配置し、アンボンドとすることで、RC 橋脚と独立に挙動させ大変形域における弾性挙動を確保し

通常の RC 橋脚の変位-復元力の静的関係



アンボンド高強度芯材の変位-復元力関係



提案する高耐震性橋脚の変位-復元力関係 = RC 橋脚 + 芯材

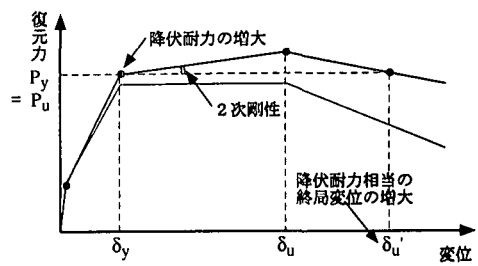


図-3 アンボンド芯材の効果

ようとするものである。また芯材の両端は橋脚内に定着し、下端部には間隙を設けることで、芯材が作用する変形領域を調節することができる。

従来の RC 橋脚の変位-復元力特性は完全弾塑性型にモデル化される。このような従来型の RC 橋脚に対し、弾性部材を付与した場合の変位-復元力関係を示したのが図-3 である。ここに示すように、正の二次剛性を得ることができるとともに、最大耐力を越えて降伏耐力相当に対する RC 橋脚の耐震性能を高めることができる。また降伏耐力も増大させることにより、レベル I 地震動に対する耐震設計にも寄与することができる。また履歴応答に関して、降伏後にも正の剛性を付与したことにより安定化し、塑性残留変位も低減することができる。

強震後の残留変形量を低下させることを目的として、近年プレストレストコンクリート橋脚 (PC 橋脚) に関する研究が活発に進められている⁴⁾⁵⁾。PC 橋脚の復元力特性は原点指向に近く、残留変位が小さくなる特徴も有している。本研究で提案する構造と PC 橋脚との違いとしては、芯材にプレストレスを導入せず、塑性ヒンジ区間を挟むようにアンボンド部材として配置する点が挙げられる。本構造では芯材は弾性部材として機能することを想定するため、構造用鉄筋より高強度のものをを用い、さらに芯材をアンボンド部材として配置することで、軸方向にひずみを平滑化させること

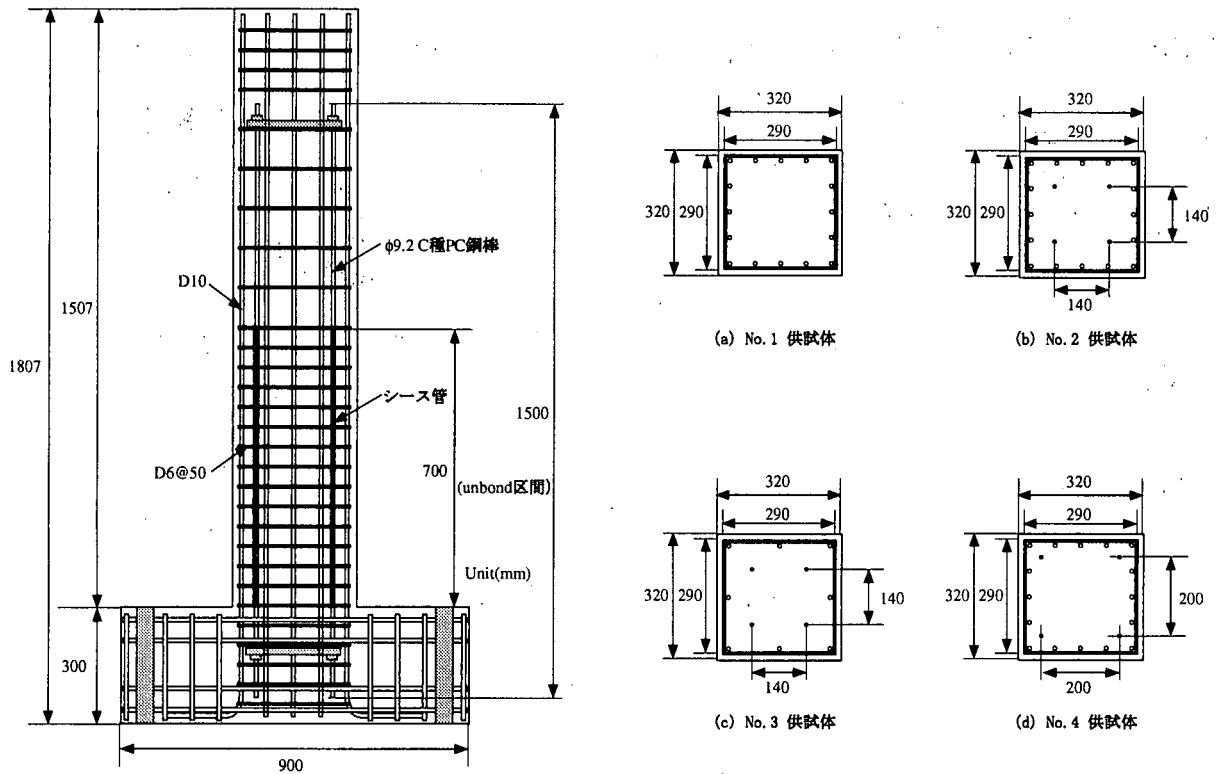


図-4 供試体図

表-1 供試体諸元

供試体名	軸応力度 (MPa)	コンクリート強度 (MPa)	帯筋	高強度鉄筋	軸方向鉄筋
No.1	1.46	24.0	D6@50		16×D10
No.2	1.46	24.0	D6@50	4×SBPR φ9.2 (中心より 70mm)	16×D10
No.3	1.46	24.0	D6@50	4×SBPR φ9.2 (中心より 70mm)	8×D10
No.4	1.46	24.0	D6@50	4×SBPR φ9.2 (中心より 100mm)	16×D10

により塑性化を送らせるようにしている。また本構造ではプレストレスを導入しないので、コンクリートへの余分の軸圧縮力を加えない利点があるとともに、施工性の向上も狙いとしている。

RC 構造に二次剛性を付与する方法として、各種鉄筋を混用する方法も提案されているが⁶⁾、大変形時には基部での損傷を免れず、塑性残留変形は大きなものになってしまう。一方、本構造の芯材は基本的に降伏しないため、残留変位に及ぼす影響はない。

本研究で提案する構造は、基本的には RC 構造としてエネルギー吸収する（主鉄筋の塑性化）ようにし、付加的部材として弾性挙動をする高強度鉄筋を配置する、という機能分離型の設計概念を想定している。

4. 実験概要

先に提案した橋脚構造の基本的特性、特に芯材の効果について検討するため、芯材下端の間隙を設けずに

定着した供試体を作成し、実験を行った。

供試体は柱部の断面寸法を 32 cm×32 cm の正方形断面とし、載荷スパンを柱基部から約 1.5 m とした。これらの寸法は、載荷実験を実施する載荷装置や載荷能力を考慮して決定した。

検討項目は芯材の配置による影響である。供試体諸元を表-1 に、供試体寸法を図-4 に示す。

芯材として、C 種 PC 鋼棒を用いた。芯材のアンボンド区間は、PC 鋼棒用シース管を設置することにより確保した。また芯材の両端は、治具により機械定着している。

供試体は No.1 の RC モデルを基本型として製作した。No.2 は No.1 に芯材を配置したものであり、弾性部材の付加による影響を知ることができる。No.3 は芯材を配置しても No.1 と曲げ耐力がほぼ同じになるようにしたものであり、耐力が同じ場合の残留変形について検討することができる。No.4 は芯材を No.2 より外

表-2 鋼材の機械的性質

鋼材種類		降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)
鉄筋	SD295D6	312	451
	SD295D10	312	451
PC 鋼棒	SBPR ϕ 9.2	1185	1331

側に配置したものであり、芯材の降伏の影響を知ることができる。

5. 実験結果および考察

5.1 履歴特性

各供試体の荷重-変位関係の比較を図-5に示す。No.1は通常のRC橋脚模型であり、降伏後の二次剛性がほぼ0であるのに対し、芯材を導入した他の供試体では正の二次剛性が確認できる。

またNo.2とNo.3の二次剛性がほぼ等しく、No.4はより大きな剛性を示しているのは、芯材の配置による影響である。これらの二次剛性は、芯材の配置より算出されるものとほぼ等しい。No.4ではその他のものと比べて、芯材の降伏が早かったことから、最適芯材配置が存在することが分かる。

5.2 損傷性状

ひび割れの進展状況(図-6)を見てみると、No.1では基部での損傷が集中しているのに対し、No.2, 4ではひび割れが供試体高さ方向に分散している。これは供試体の変形が進むと、高強度芯材が大きな軸圧縮力を発揮し、一種のプレストレスの様な効果となり、基部の損傷が低減されたと考えられる。

またNo.3については、ひび割れの数が他に比べて少ない。これは主鉄筋量が少ないため、ひび割れを抑制する効果が小さいことが原因である。これより、芯材を配置することで橋脚の耐力を容易に上げることは可能であるが、ひび割れ抑制などの観点からも適切な主鉄筋を配置することが重要であることが分かる。

5.3 残留変位

各供試体の残留変位の比較を図-7に示す。これより、No.1に比べて他の供試体では残留変位が低減されていることが分かる。すなわちPC橋脚のようにプレストレスを導入しなくても、弾性挙動を発揮する芯材により残留変位を小さくできる。また残留変位は、構造用鉄筋に対して芯材の比率が高いほど小さくなっており、PC橋脚の傾向と一致している。

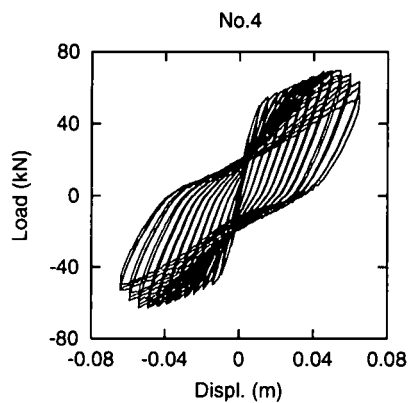
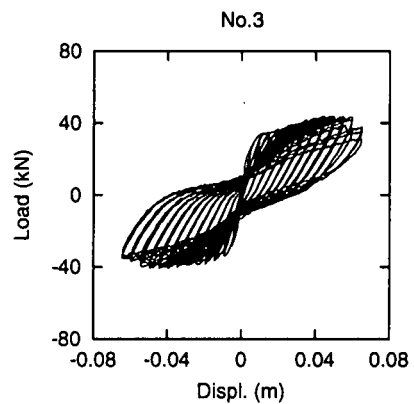
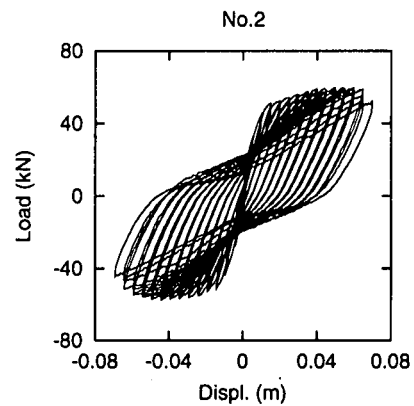
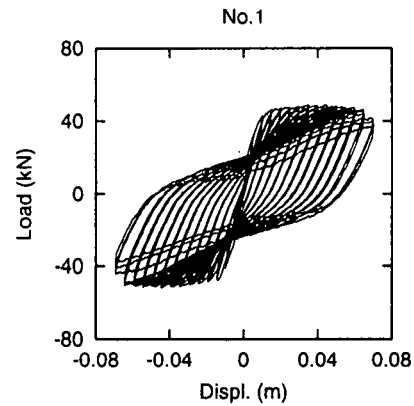


図-5 実験による荷重-変位関係

5.4 エネルギー吸収能

各供試体の累積吸収エネルギーの比較を図-8に示す。これによるとNo.3を除く供試体のエネルギー吸収量はほとんど差がないことが分かる。これに対し、No.3は

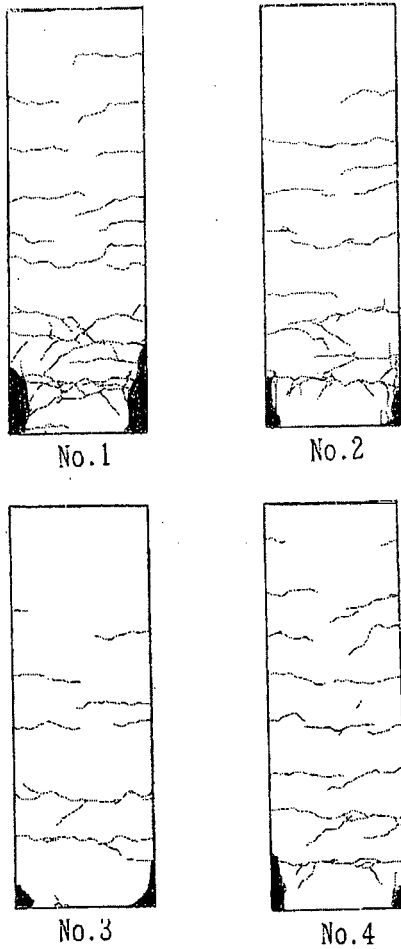


図-6 ひび割れ状況

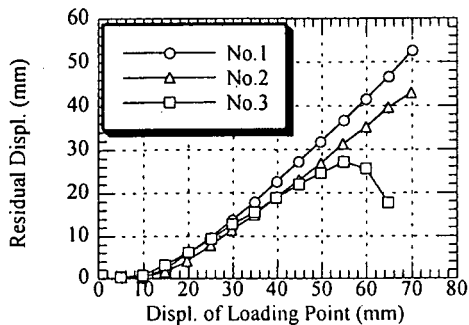


図-7 残留変位と載荷点変位の関係

小さなエネルギー吸収能を示している。これよりエネルギー吸収能は構造用主鉄筋の量に大きく依存していることを意味している。

また No.1, 2, 4 のエネルギー吸収量がほぼ等しかったことから、芯材は履歴形状を変えず、剛性のみを変化させていることが分かる。

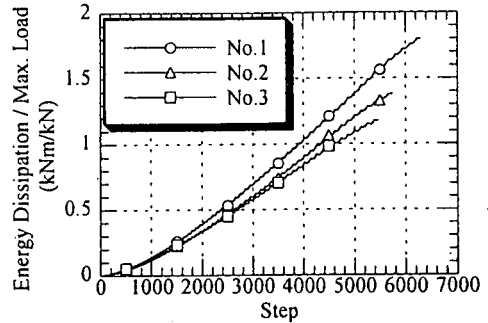


図-8 累積吸収エネルギーと載荷ステップの関係

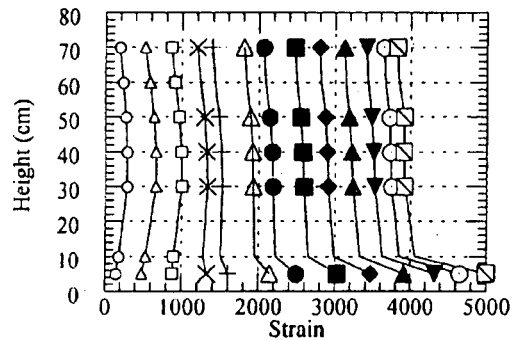


図-9 芯材の高さ方向のひずみ分布

5.5 アンボンド効果

No.2 について、載荷ステップの山ごとの高強度鉄筋の高さ方向のひずみについて、図-9 に示す。芯材とコンクリートが完全に付着している場合、橋脚基部でのひずみが大きくなり、高さ方向のひずみ分布は三角形分布となることが予想されるが、アンボンドとすることにより、ひずみ分布が平滑化されており、局部的に鉄筋が降伏するのを大変形後にまで遅らせることができています。なお本実験では、載荷終了時まで芯材はほぼ弾性域に止まっていた。

6. 解析的検討

提案する橋脚構造は、アンボンド部材を内部に備えているため、芯材のひずみはその位置の RC 部材断面のひずみと一致せず、断面保持を仮定した解析ではその変形状態を追跡することはできない。そこで芯材による影響については、芯材と RC 部材との変形の適合条件を満足するように収束計算することにより考慮することとした。RC 部材部分については、ファイバーモデルによりモデル化している。

本解析の妥当性を検証するため、先の実験供試体に対する正負交番載荷解析を行った。解析は天頂部に正負交番載荷して行った。ただし実験においては基部に

おける鉄筋の引き抜けによる変形が無視できない。解析では基部固定として計算するが、鉄筋の引き抜けに関する詳細な検討は今後の課題として、一律全体変形の30%が引き抜けと考え、解析結果を整理している。

図-10に荷重-変位関係を示す。当初はシース管に囲まれた部分のみアンボンド区間として解析したところ、耐力が実験結果より大きなものとなった。実際の供試体ではPC鋼棒の両端で、定着用ナットと鋼板で機械的定着している。PC鋼棒は丸棒であり、シース管以外のところでも付着が切れていることも考えられる。そこで図-10に示す荷重-変位関係は、アンボンド区間を機械的定着間として解析した結果である。これと図-5を比較すると、耐力や剛性などはほぼ実験を再現できることがわかる。

7. まとめ

本研究で得られた結果をまとめると次のようになる。

- 高強度芯材を導入することにより、RC 供試体は正の二次剛性を持つように改善され、残留変位を小さくすることができる。
- エネルギー吸収性能は主鉄筋量に依存し、高強度芯材を導入しても変化しない。すなわち RC 橋脚と同程度の鉄筋を配置することにより、同程度のエネルギー吸収性能が期待できる。
- 高強度芯材をアンボンドとすることにより、ひずみが平滑化され、芯材の損傷が低減される。
- RC 橋脚に弾性部材を導入することにより得られる原理とほぼ同等の結果を正負交番載荷実験より得ることができた。本構造は施工性にも優れており、実用性の高い高耐震性能橋脚と言える。
- 軸方向定着位置や間隙付定着部を検討することにより、超高強度材料を用いることなしに、本構造の効果を発揮できる。これにより低コストに高耐震性能橋脚を開発できる可能性が高い。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，平成 8 年。
- 2) 土木学会：土木構造物の耐震基準等に関する「第二次提言」，土木学会誌，Vol.81，No.2，1996。
- 3) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，平成 11 年。
- 4) 池田尚治・森拓也・吉岡民夫：プレストレストコンクリート橋脚の耐震性に関する研究，プレストレストコンクリート，Vol.40，No.5，pp.40-47，1998。
- 5) 稲田文展・睦好宏史・Wael Zatar：プレストレスを導入した RC 橋脚の耐震性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.3，pp.739-744，1998。
- 6) 渡辺史夫・大住和正・六車熙：各種強度の鉄筋混用による RC 断面曲げ性能の制御，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.295-298，1990。
- 7) 細入圭介・川島一彦・庄司学：アンボンド区間を有する鉄筋コンクリート橋脚の繰り返し変形特性に関する

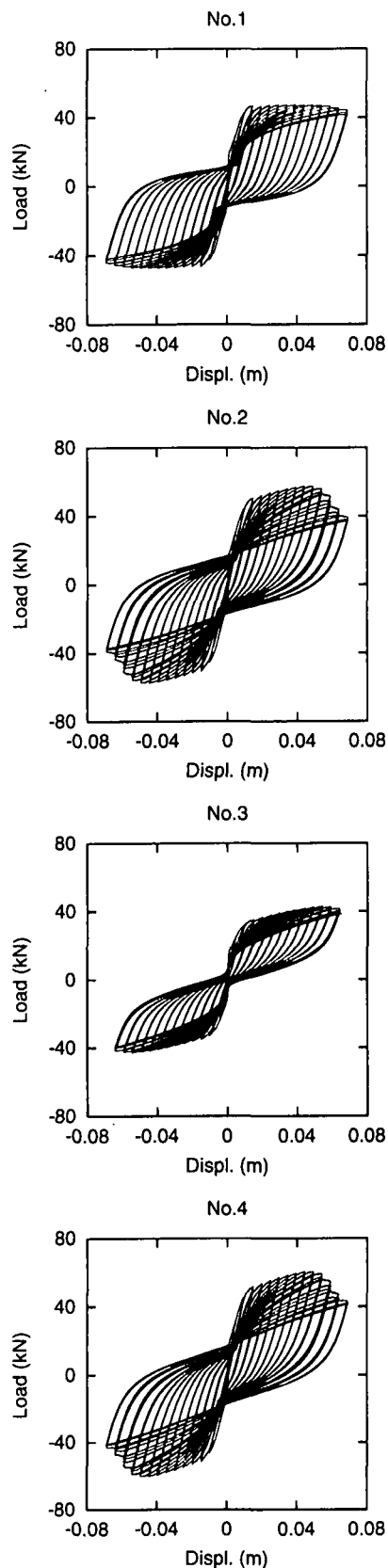


図-10 実験再現解析により得られた荷重-変位関係

実験的研究，第 25 回地震工学研究発表会講演論文集，pp.717-720，1999。