

アンボンド高強度芯材による高耐震性能RC橋脚 の開発

家村浩和¹・高橋良和²・曾我部直樹³・鶴飼正裕⁴

¹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)

²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)

³京都大学大学院 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)

⁴京都大学工学部 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)

New type of RC pier with additional unbonded high-strength bars is proposed. The advantage of installing high-strength bars into RC pier is explained and the new concept of inelastic design of RC structure is proposed. To clarify the fundamental characteristics, four types of models are tested under cyclic lateral loading. As the result, the proposed structures are found to have the positive stiffness even after yielding. Compared with the conventional RC structure, the residual displacement of the proposed structures after strong earthquakes would be small, although the hysteretic dissipated energy is almost same. These results suggest that the proposed structure has a better performance under strong earthquakes.

Key Words : RC pier, High strength bar, Unbond, Residual displacement, Inelastic seismic design

1. はじめに

兵庫県南部地震では、多くのコンクリート橋梁が大きな被害を受けた。この教訓を受け、従来のRC橋脚の曲げ、せん断補強に関する研究だけでなく、損傷を受けても補修や復旧が容易な次世代高性能橋脚の開発が進められている。現在のRC橋脚に対する設計では、大きな靱性を確保することが求められているが、大きな地震に対して橋脚が崩壊を免れたとしても大きな残留変形が残ってしまうと、地震後の供用が困難となる。したがって現在の道路橋示方書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。よって高耐震性能を有する橋脚とは、これら2つの特性を同時に満足するものでなければならない。

本研究の目的は、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し、正負交番載荷実験を行うことにより、その基本的特性を明らかにするとともに、高性能橋脚として備えるべき性能に関する資料を得ようとするものである。

2. アンボンド高強度芯材入りRC橋脚

(1) 橋脚構造

本研究で提案する橋脚構造の概念を図-1に示す。基本的構成としては、通常のRC橋脚の断面内に高強度

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ようとするものである。また高強度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。

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²⁾³⁾⁴⁾。これはPC構造では適当な量のPC鋼材を適正に配置することにより、高い曲げ、せん断耐力を得ることができ、また導入されたプレストレスの効果により高い復元力を有する、という特徴を橋脚に適應したものである。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、次のものが挙げられる。

- 高強度鉄筋にプレストレスを導入しない。
- 高強度鉄筋は塑性ヒンジ区間の周辺のみ配置し、アンボンドとする。
- 高強度鉄筋には引張、圧縮の両者に対する抵抗を期待する。

本構造では高強度鉄筋は弾性部材として機能することを想定するため、大変形時までできるだけ塑性化させない工夫が必要となる。ここではプレストレスを導入しないことで高強度鉄筋にあらかじめ引張応力が作用していないので、降伏まで余裕ができること、ならびにコンクリートへの余分の軸圧縮力を加えないこと、またアンボンドとすることで軸方向にひずみを平滑化

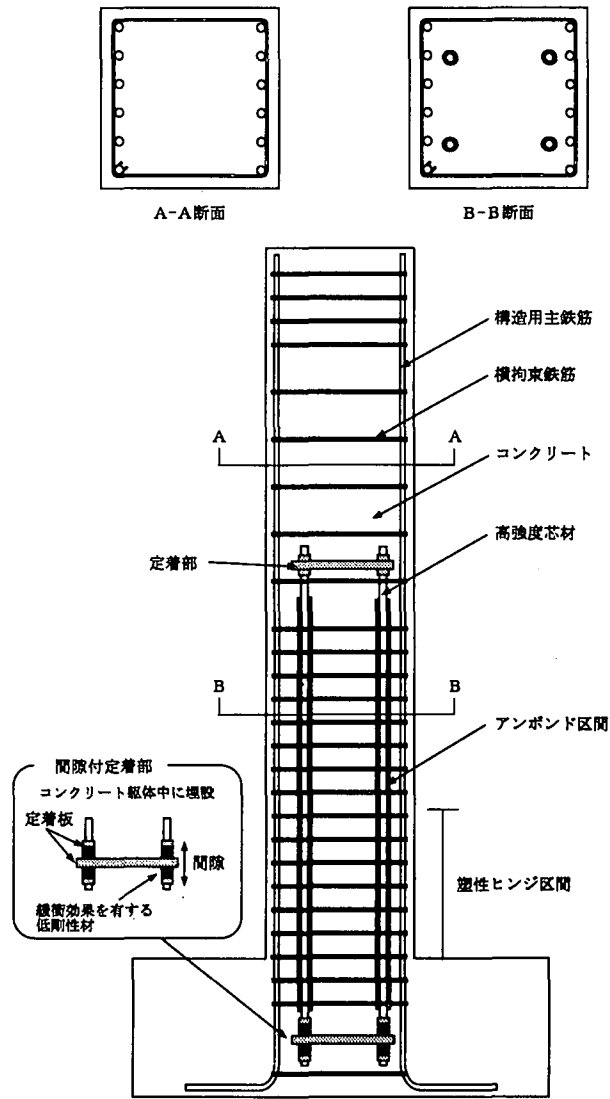


図-1 提案する橋脚構造の概念図

させることにより塑性化を遅らせるようにしている。またプレストレスを導入しないことによる施工性の向上も狙いとしている。

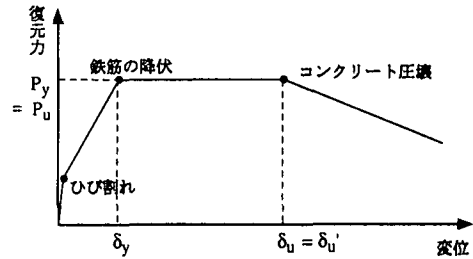
またPC構造はプレストレスにより復元力が高くなるうえに、エネルギー吸収能が低いことが指摘されている。本研究における構造では、基本的にはRC構造としてエネルギー吸収するようにし、付加的部材として弾性挙動をする高強度鉄筋を配置する、という設計概念を想定し、エネルギー吸収能の確保を考える。

(2) アンボンド高強度芯材による効果

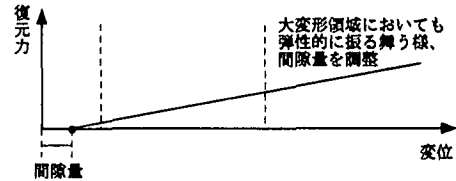
現行の道路橋示方書では、RC橋脚の変位-復元力特性は完全弾塑性型にモデル化されるものとしており、部材降伏後の剛性は0である。このため、レベルII地震動では大きな非線形応答変位が生じ、これに伴って地震後に橋脚に生じる塑性残留変位が大きくなり、復旧工事を困難なものとしている。

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-2である。ここに示すように、正の2次剛性を得ることができ

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

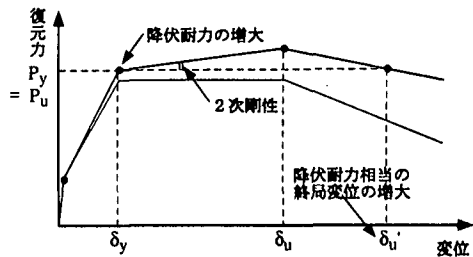
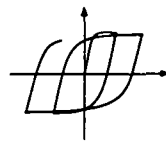


図-2 アンボンド高強度芯材の効果1



通常のRC橋脚の復元力特性

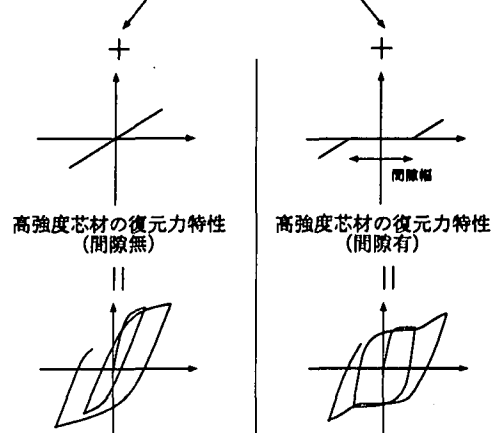


図-3 アンボンド高強度芯材の効果2

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(図-3)。

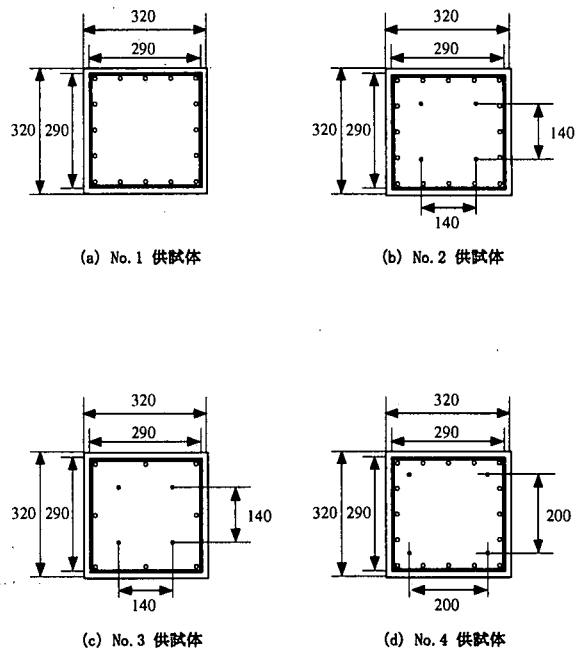
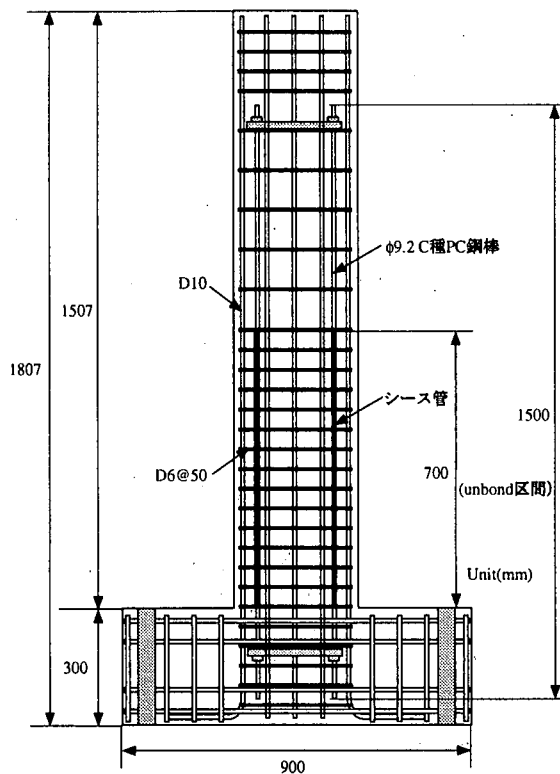


図-4 供試体図

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

3. 実験概要

(1) 供試体

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。

検討項目は高強度鉄筋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。

高強度鉄筋として、C 種 PC 鋼棒を用いた。高強度鉄筋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。また高強度鉄筋の両端は、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 に高強度鉄筋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

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 φ9.2	1185	1331

は高強度鉄筋を配置しても 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 は高強度鉄筋を No.2 より外側に配置したものであり、高強度鉄筋の降伏の影響を知ることができる。

(2) 載荷システム

載荷システムを図-5 に示す。

軸方向には、表-1 に示した所定の軸応力度に相当する軸力をアクチュエーターにより荷重制御により載荷

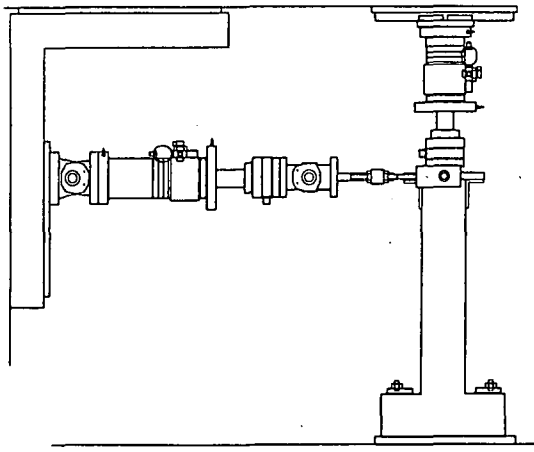


図-5 荷重システム

した。

横方向は RC 橋脚模型 (No.1) の降伏変位 5 mm を基準とする振幅漸増正負交番荷重で行った。一定振幅での繰り返し回数は 3 回である。

4. 実験結果および考察

(1) 履歴特性

各供試体の荷重-変位関係の比較を図-6 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、高強度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、高強度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はほぼ等しい。No.4 ではその他のものと比べて、高強度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。

(2) 損傷性状

ひび割れの進展状況 (図-7) 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力のような効果となり、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、ひび割れの数に他に比べて少ない。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、高強度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量の主鉄筋を配置することが重要であることが分かる。

(3) 残留変位

各供試体の残留変位の比較を図-8 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高強度芯

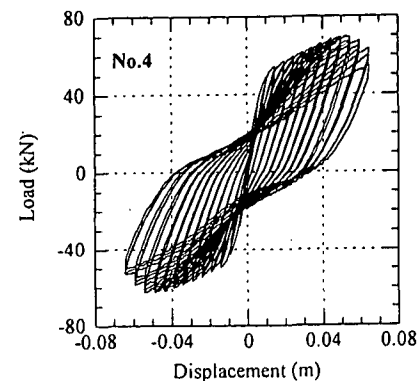
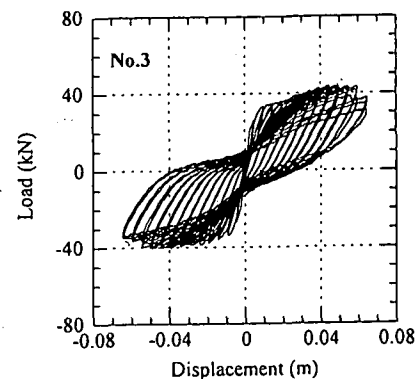
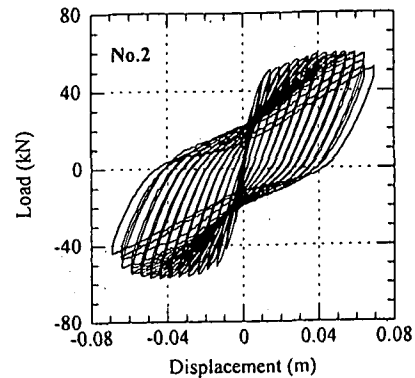
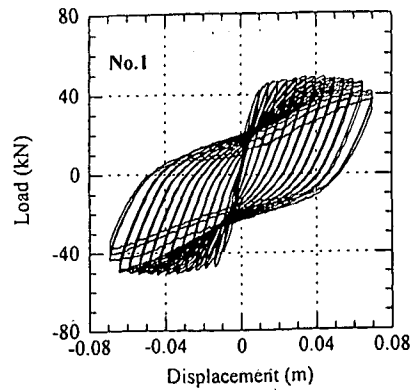


図-6 実験による荷重-変位関係

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高強度鉄筋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。

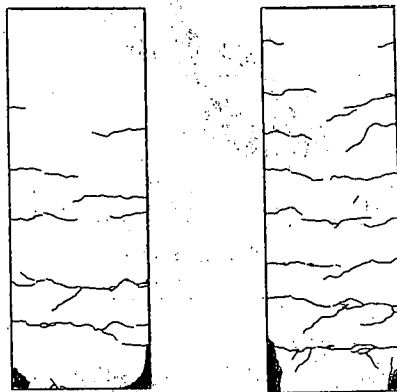
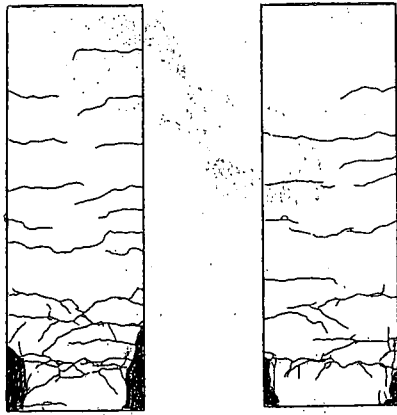


図-7 ひび割れ状況

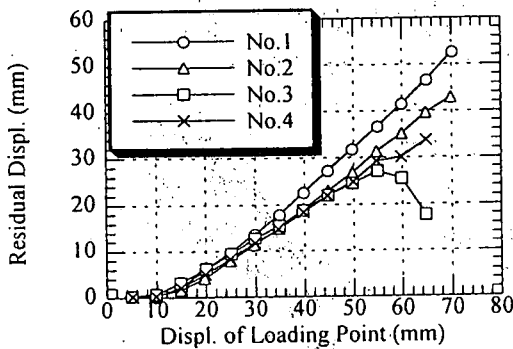


図-8 残留変位と荷点変位の関係

(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-9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、高強度芯材は履歴形状を変えることなく、

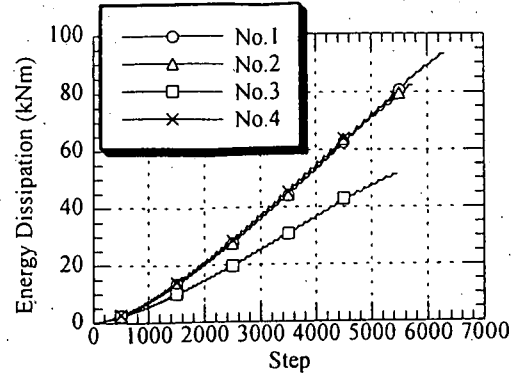


図-9 累積吸収エネルギーと荷ステップの関係

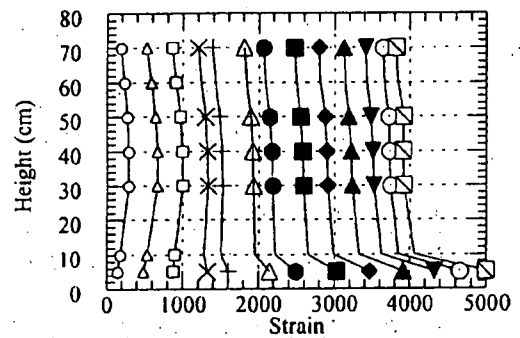


図-10 高強度鉄筋の高さ方向のひずみ分布

剛性のみを変化させていることが分かる。

(5) アンボンド効果

No.2について、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-10に示す。高強度鉄筋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、荷終了時まで高強度鉄筋はほぼ弾性域に止まっていた。

5. 解析的検討

実験供試体に対する解析的検討として、ファイバーモデルによる正負交番荷解析を行った。

解析対象は、No.1からNo.3の3つである。通常のファイバーモデルでは断面保持の仮定を用いるため、アンボンドの影響を取り入れることはできない。そこでここでは高強度鉄筋以外についてはファイバーモデルによりモデル化するが、高強度鉄筋についてはアンボンド区間の両端ではファイバーモデル断面と一緒に挙動するが、区間内では独立に挙動するようにモデル化し、解析を行った。

図-11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-11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。また実験では橋脚基部の鉄筋の抜け出しが確認されている。解析では終局が実験と一致するよう、調整してある。これと図-6を比較すると、耐力や剛性などほぼ実験を再現できることがわかる。

6. まとめ

本研究では、従来のRC橋脚にアンボンド高強度芯材を導入することにより、強震後の耐震性能を容易に向上できる構造を提案し、性能確認のための基礎的実験を行った。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た。
- 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。
- 高強度芯材をアンボンドとするため、シース管を用いた結果、圧縮力に対する芯材の抵抗が十分に得られなかった。今後は圧縮力に対しても有効に作用するアンボンド構造を開発、採用の予定である。

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) 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。
- 3) 白浜寛・山口隆裕・池田尚治：軸方向プレストレスを有するコンクリート橋脚の地震応答挙動，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20, No.3, pp.745-750, 1998。
- 4) 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。
- 5) 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返し変形特性に関する

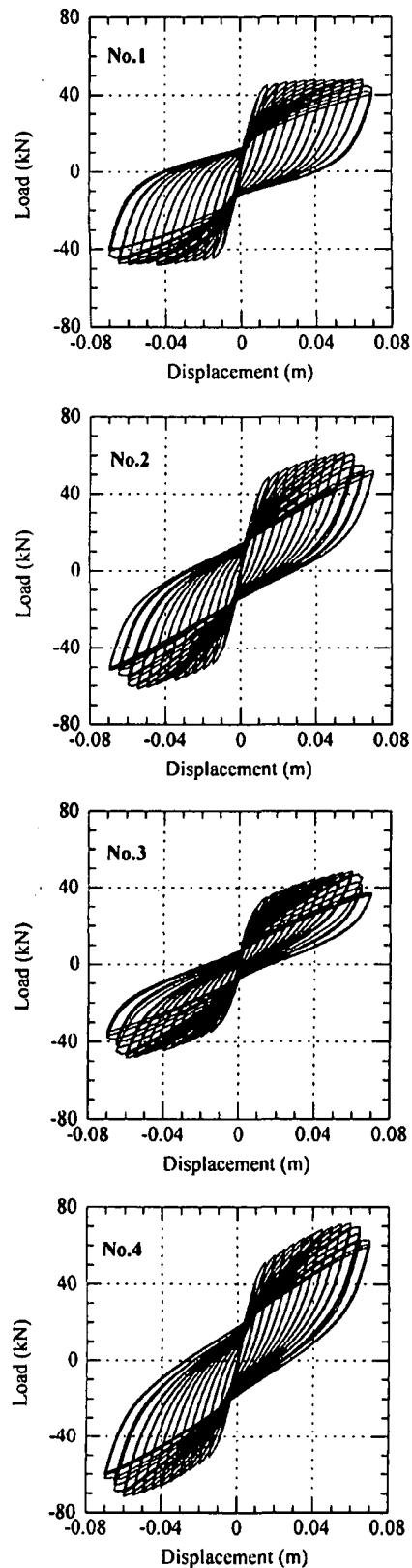


図-11 解析により得られた荷重-変位関係

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。