

アンボンド高強度芯材入りRC橋脚の ハイブリッド地震応答実験

家村浩和¹・高橋良和²・曾我部直樹³

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)

Installing unbonded high strength bars into a RC pier, the post-yield stiffness can be easily increased. According to the results of cyclic loading tests, piers with positive post-yield stiffness show smaller residual displacement than that of conventional RC piers. And the proposed structural system also has the advantage because the post-yield stiffness can reasonably and efficiently realize the required ultimate restoring force against level II seismic design load. In this study, to verify the expected seismic performance, the hybrid loading tests are carried out. Under the Kobe JMA earthquake motion, the residual displacement of a RC pier with unbonded bar is smaller than that of a conventional RC pier. Under the Kobe Port Island earthquake motion, not only the residual displacement but also the maximum displacement response is smaller. These results suggest that the proposed structural system has excellent performance under strong earthquake ground motions.

Key Words : RC pier, unbonded bar, post-yield stiffness, two-level seismic design

1. はじめに

次世代の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た。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、このような高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。求められる高性能に対する合理的な耐震設計のための橋脚構造と、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。

著者らは、アンボンド芯材を活用して、容易にRC構造の塑性域における荷重-変位関係に正の二次剛性を付与することのできる構造を提案した²⁾。正負交番載荷実験により、アンボンド芯材を挿入することで、エネルギー吸収能を損なうことなしに、残留変位を低減できることを示した。本研究では、まず二段階耐震設計法において、本構造が合理的であることを示す。次にハイブリッド地震応答実験を行い、本構造による橋脚の地震時性能、特に地震後残留変位と最大応答変位について検討する。

2. アンボンド芯材入りRC橋脚

本研究で提案する橋脚構造 (以後 UBRC 構造と称す) の概念を図-1 に示す。基本的構成としては、通常のRC橋脚の断面内に芯材を配置し、アンボンドとすることで、RC橋脚の断面と独立に挙動させ、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。また芯材の両端は橋脚内に定着するが、下端部には間隙を設けることで、芯材が弾性的に作用する変形領域を調節することができるよう工夫した。

従来のRC橋脚の変位-復元力特性はほぼ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、弾性部材を付加することにより、塑性域における正の二次剛性を得ることができる。この弾性部材として構造用鉄筋より高強度なアンボンド芯材を用いることで、芯材の塑性化を遅らせ、大変形領域においても安定した二次剛性を発揮できるように工夫している。これにより、レベルII地震動に対する橋脚の耐震性能を高めることができるとともに、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、プレストレストコンクリート橋脚 (PC橋脚) に関する研究が進められている⁵⁾。PC橋脚の復元力特性は原点

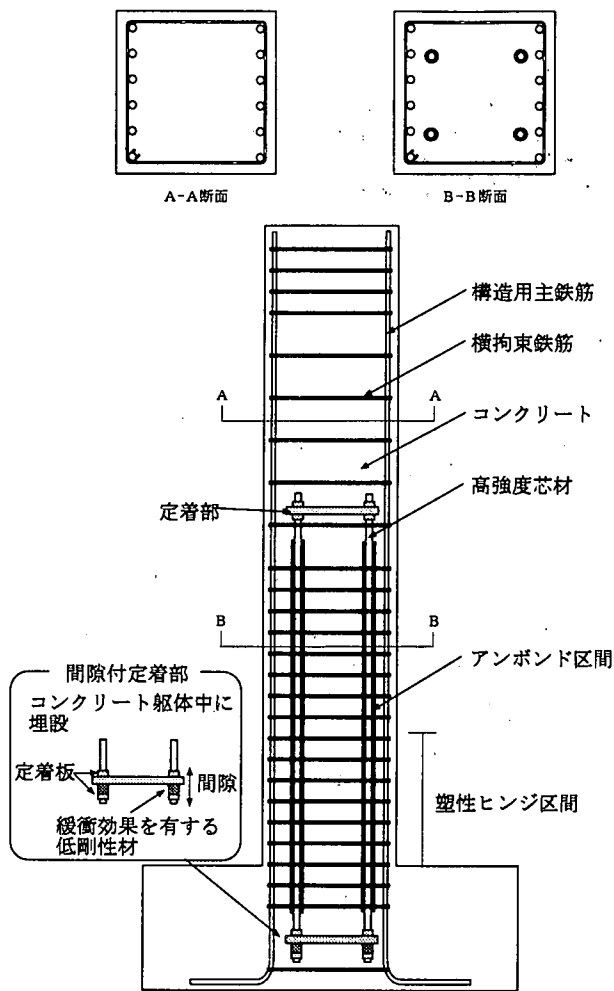


図-1 提案する橋脚構造の概念図

指向に近い場合、残留変形を低減される効果については優れているが、変形が大きくなると、PC鋼棒も降伏してしまう。またプレストレス力によるコンクリートの応力負担が大きく、変形性能に劣る傾向がある。UBRC構造では、芯材にプレストレス力を導入しないので、コンクリートの応力負担もなく、施工性にも優れており、残留変位低減効果も期待できる。また基部に設けている間隙付き定着部では、引張方向において芯材の効果が発揮する段階を遅らせることができるとともに、圧縮方向については直ちに圧縮力を分担するように設計されており、芯材が圧縮力を負担する点でも、PC橋脚構造とは異なっている。

また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有している。

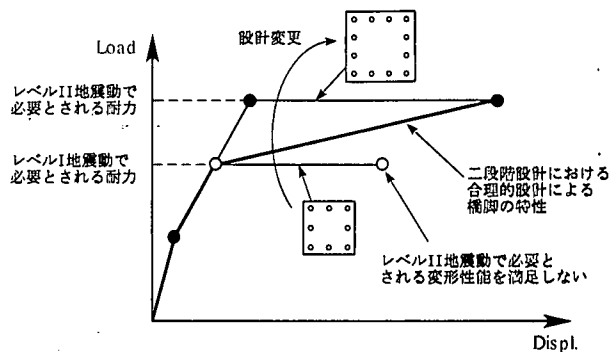


図-2 二段階設計における変位-復元力関係の概念図

3. 二段階耐震設計と二次剛性の活用

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零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わずかな二次剛性は現れるものの、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³⁾。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の二種類を考え、レベルI地震動では原則として構造物はほぼ弾性域内に納まり、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。鉄道構造物においても、L1、L2地震動を設計想定地震動として、同様の二段階耐震設計が行われている⁴⁾。

しかし実際にはレベルII地震動で要求される変形性能・耐力が大きいため、レベルI地震動で要求される耐力は、自動的に満足されている。レベルII地震動に対応するために、レベルI地震動対応の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場合が多い。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各々の耐力を結んだ変位-復元力特性を持つ構造物を構築でき、合理的な二段階の耐震設計ができることとなる(図-2)。

また通常のRC橋脚の二次剛性はほぼ零であることから、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。このため道路橋示方書では、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、その結果として、より大きな塑性率応答を許容でき、橋脚の耐震設計をより

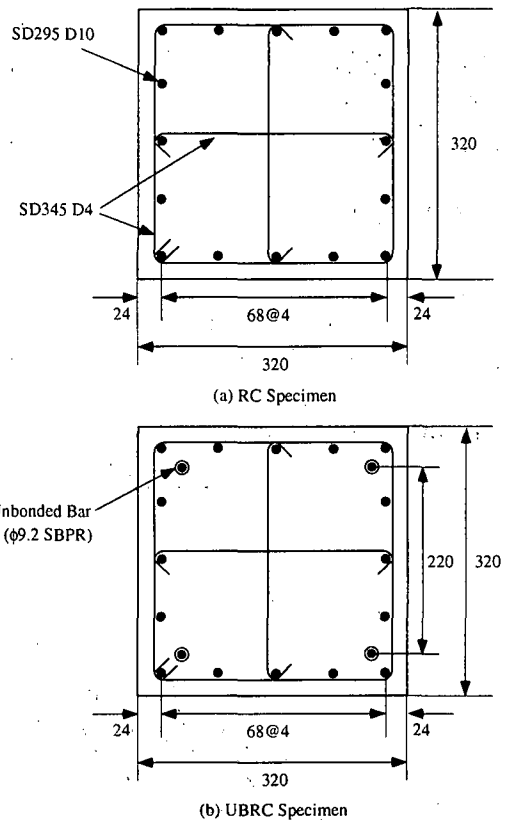
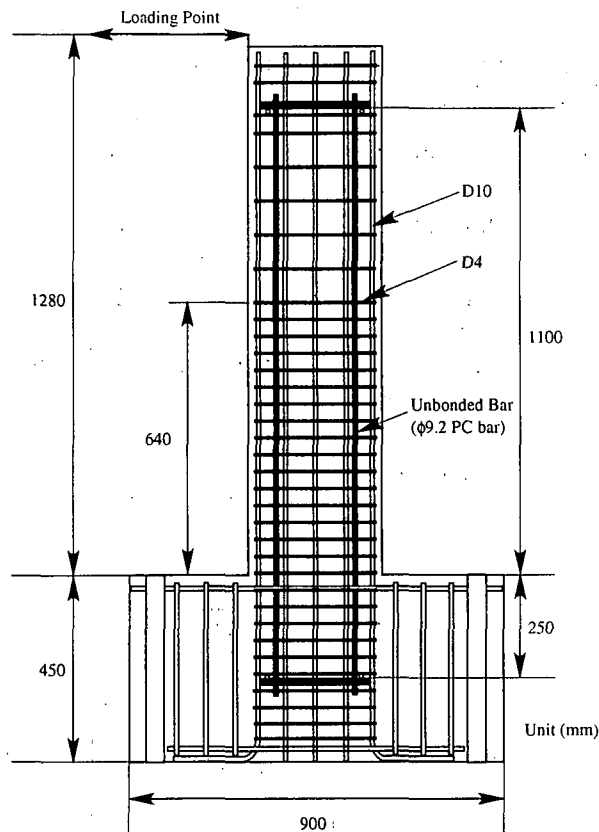


図-3 供試体図

合理化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アンボンド芯材入りRC橋脚(UBRC橋脚)が、次世代の高耐震性能橋脚としての性質を備えていることが分かる。

4. 実験概要

(1) 供試体構造

UBRC橋脚構造の芯材効果について検討するため、通常のRC橋脚とそれにアンボンド芯材を配置したUBRC橋脚の2種の供試体を作成した。

供試体は断面 2.4×2.4 m、高さ9.6 mの道路橋橋脚⁸⁾を想定し、その7.5分の1縮小モデルを作成した。柱部の断面寸法は 32×32 cm、荷重スパンは1.28 mとなる。軸方向鉄筋としてD10を16本、帯鉄筋としてD4を40 mmの間隔で配置し、中間帯鉄筋も用いることで帯鉄筋比を合わせている(図-3)。UBRC橋脚の場合には、断面中央より110 mmの位置に、φ9.2のC種PC鋼棒をアンボンド処理したものを配置した。芯材の両端は機械的に定着している。

(2) 実験ケース

作成した供試体の基本的特性を得るため、RCおよびUBRC橋脚に対して正負交番荷重実験を行った。これより得られる諸量を、ハイブリッド実験の基本データとして用いた。

ハイブリッド地震応答実験では、地震応答特性を検

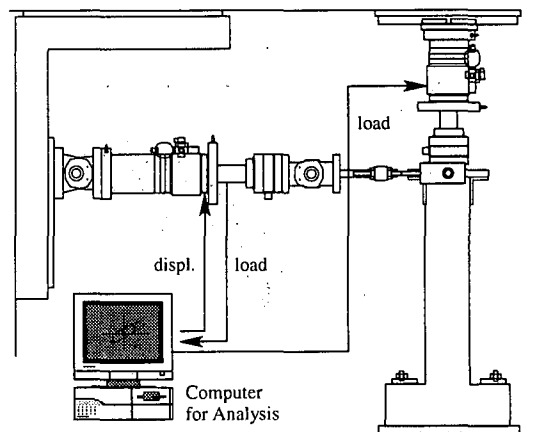


図-4 荷重実験システム

討するために、神戸JMA記録NS成分および神戸ポートアイランド記録EW成分を用いた。実験は縮小モデルで行うものの、相似則を勘案して、コンピュータ内では実大構造物に対する地震応答計算を行っている。想定する上部工重量は、鋼I桁を想定して約5000 kNと設定した。

供試体諸元および実験ケースを表-1に示す。

(3) 荷重実験システム

荷重実験システムを図-4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荷重

表-1 供試体諸元

供試体名	実験種類 (MPa)	軸応力度 (MPa)	コンクリ ート強度	帯筋	アンボンド芯材	軸方向鉄筋
RC-1	正負交番載荷	0.88	24.0	D4@40 +中間帯筋		16×D10
UBRC-1	正負交番載荷	0.88	24.0	D4@40 +中間帯筋	4×SBPR φ9.2	16×D10
RC-2	ハイブリッド (神戸海洋気象台 NS)	0.88	24.0	D4@40 +中間帯筋		16×D10
UBRC-2	ハイブリッド (神戸海洋気象台 NS)	0.88	24.0	D4@40 +中間帯筋	4×SBPR φ9.2	16×D10
UBRC-3	ハイブリッド (ポートアイランド EW)	0.88	24.0	D4@40 +中間帯筋	4×SBPR φ9.2	16×D10

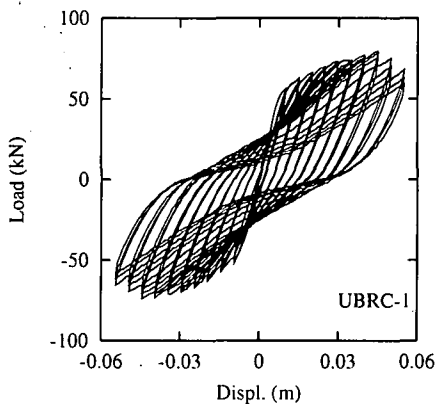
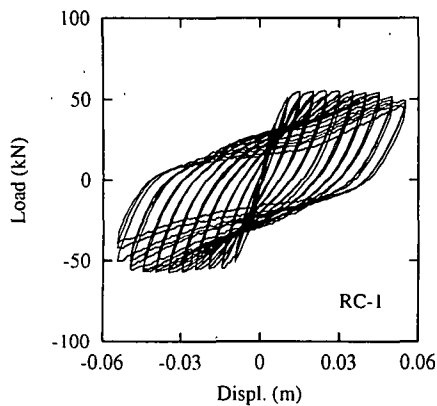


図-5 実験による荷重-変位関係

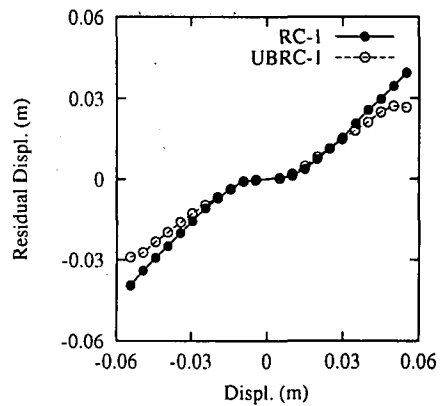


図-6 残留変位と載荷点変位の関係

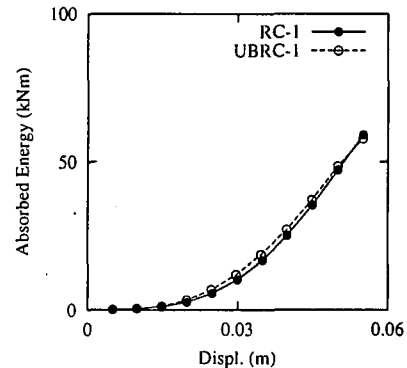


図-7 累積吸収エネルギーと載荷ステップの関係

した。

横方向は RC 橋脚模型の降伏変位 5 mm を基準とする振幅漸増 3 回繰り返し波を、ハイブリッド実験では応答解析による変位を変位制御により載荷した。

5. 正負交番載荷実験結果

正負交番載荷実験による荷重-変位関係を図-5 に示す。従来の RC 橋脚模型では、降伏後の二次剛性がほぼ 0 であるのに対し、アンボンド芯材を導入した UBRC 橋脚では正の二次剛性が確認でき、耐力低下が生じる

まで、安定した剛性を示している。

各供試体の残留変位の比較を図-6 に示す。これより、RC 橋脚に比べて UBRC 橋脚では残留変位が低減されていることが分かる。

各供試体の累積吸収エネルギーの比較を図-7 に示す。これによると RC 橋脚と UBRC 橋脚のエネルギー吸収量はほとんど差がないことが分かる。これより構造用主鉄筋の配置が同じであれば、アンボンド芯材の挿入より、荷重-変位関係に剛性が付与されるだけで、エネルギー吸収能は変化しないことが分かる。

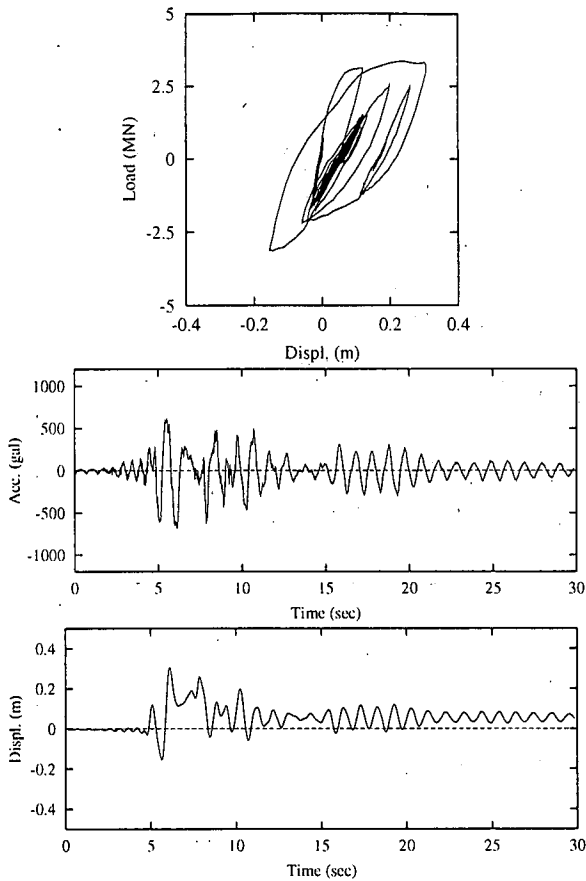


図-8 ハイブリッド地震応答実験結果 (RC-2)

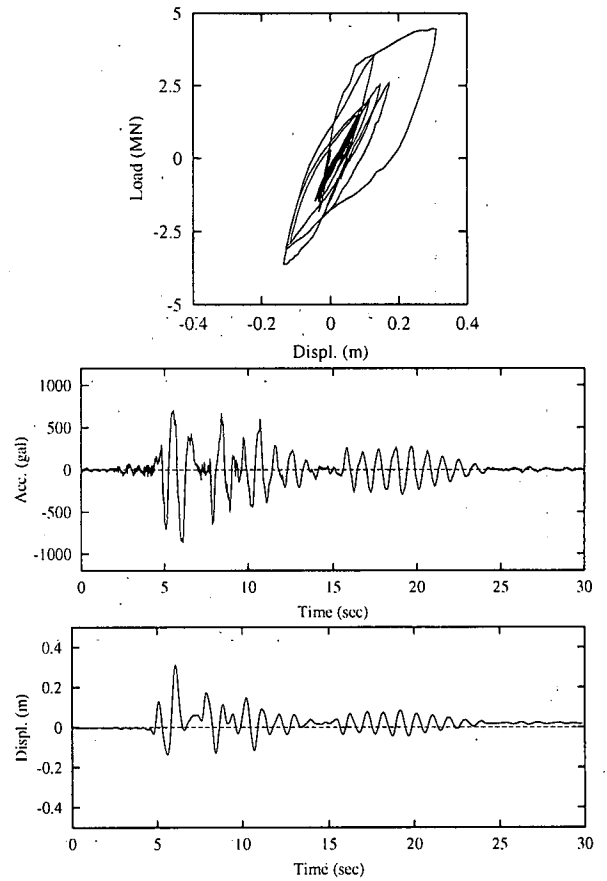


図-9 ハイブリッド地震応答実験結果 (UBRC-2)

6. ハイブリッド地震応答実験結果

(1) 神戸 JMA 記録 NS 成分入力

図-8と図-9に、芯材の有無に関する検討として、神戸 JMA 記録 NS 成分による実験結果を示す。なお、ハイブリッド地震応答実験結果は、実大構造物スケールに換算した値で示している。

まず履歴形状を見ると、UBRC-2 橋脚では RC-2 橋脚に見られない二次剛性が現れていることが分かる。また降伏耐力も UBRC-2 橋脚の方が大きく、履歴形状も全体的に線形性を帯びたものとなっており、正負交番載荷実験で見られた芯材配置効果が、UBRC-2 橋脚に現れていることが分かる。

時刻歴応答変位を見ると、最大応答変位については、RC-2、UBRC-2 橋脚とも約 30 cm であり、芯材配置による相違、すなわち二次剛性の差による最大応答の低減は見られなかった。これは別途検討した結果、入力地震動が想定した構造物の固有周期帯において、二次剛性に鈍感であることが原因であることが分かっている。しかし、地震後残留変位については、RC-2 供試体が約 5 cm であるのに対し、UBRC-2 橋脚では約 1.5 cm と大きく低減しており、予期していたような芯材配置による地震後残留変位の低減効果が確認できた。

変位応答性状については、6～7 秒付近の挙動に大きな違いが現れている。UBRC-2 橋脚の波形については、6～7 秒付近において変位がほぼ零まで戻っているのに

対し、RC-2 橋脚では 0.1～0.12 m 程度しか戻っていない。これより芯材を配置した方が、構造物の復元性が高まるといえる。

(2) 神戸ポートアイランド記録 EW 成分入力

本研究では、入力地震動の特性が二次剛性による地震時応答の低減効果に与える影響について検討するため、UBRC-3 供試体として、三種地盤用 Type II 地震動である神戸ポートアイランド記録 EW 成分を用いた実験を行った。なお、同地震波を用いて RC 橋脚に対する実験は実施していないので、比較検討には、RC-2 供試体により得られた構造特性値を用いた解析により代替する。図-10に RC 橋脚の解析結果、図-11に UBRC-3 橋脚の実験結果を示す。

最大応答変位については、神戸海洋気象台記録を入力した時とは異なり、RC 橋脚では約 25 cm であるのに対し、芯材を配置した UBRC-3 橋脚では約 20 cm と、二次剛性による地震時応答低減効果が確認された。また地震後残留変位についても、UBRC-3 橋脚はほぼ零となり、残留変位低減効果も確認できる。

7. まとめ

本研究では、アンボンド芯材入り RC 橋脚の地震時挙動を検討するため、ハイブリッド地震応答実験を行った。本研究で得られた結果をまとめると次のようになる。

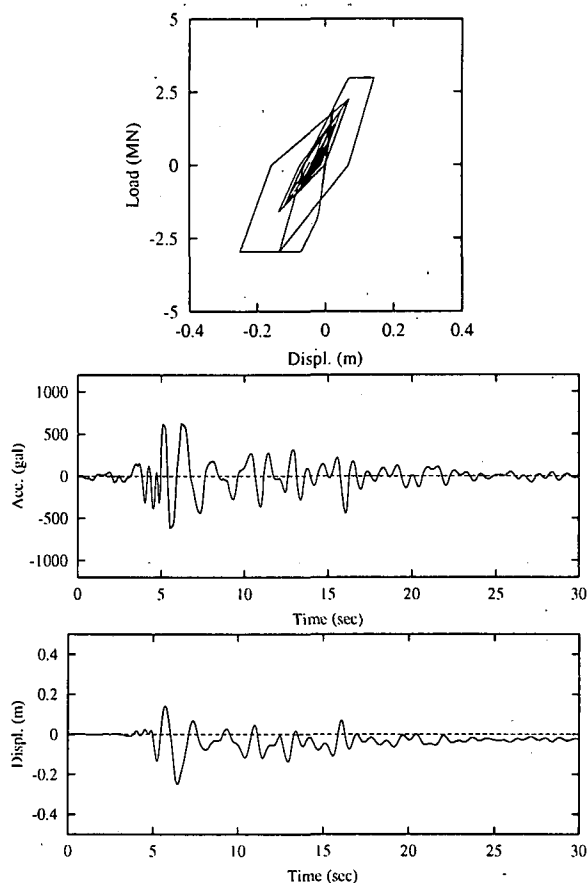


図-10 地震応答解析結果 (RC)

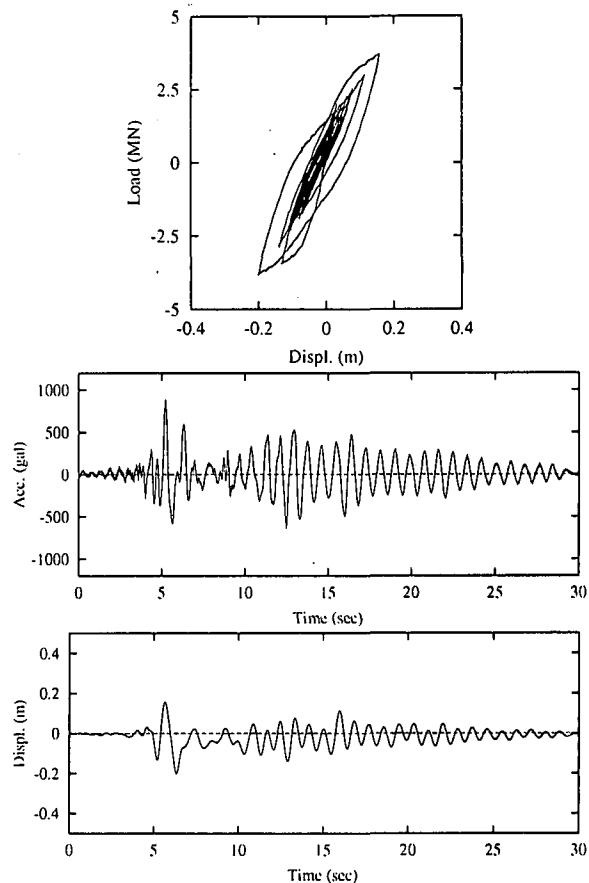


図-11 ハイブリッド地震応答実験結果 (UBRC-3)

- アンボンド芯材を導入することにより、正の二次剛性を有する荷重-変位関係を持つ構造を容易に実現することができる。また二段階耐震設計の観点からも、UBRC 橋脚は有利である。
- 神戸海洋気象台記録を用いた実験では、RC 橋脚と UBRC 橋脚の最大応答変位はほぼ同一であったものの、地震後残留変形は UBRC 橋脚の方が小さくなった。これは芯材を配置したことにより、履歴形状が原点指向に近くなることによるものであり、静的載荷実験だけでなく、地震時にも芯材効果が有効に発揮されることが明らかとなった。
- 神戸ポートアイランド記録を用いた実験では、地震後残留変形だけでなく、最大応答変位も RC 橋脚に比べて UBRC 橋脚は小さくなった。今後、構造物の二次剛性と地震時応答との関係を検討し、有効な芯材配置法を検討する必要がある。
- 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ハイブリッド地震応答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。

謝辞： 本研究は、科学技術振興調整費「構造物の破壊過程解明に基づく生活基盤の地震防災性向上に関する研究」の一環として実施したものである。(社)土木学会技術推進機構に設置された第3分科会委員各位から貴重な意見を頂いた。ここに謝意を表する。

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) 家村浩和・高橋良和・曾我部直樹・鶴飼正裕：アンボンド高強度芯材による高耐震性能 RC 橋脚の開発，第 1 回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集，pp.157-162, 2000。
- 3) 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。
- 4) 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。
- 5) 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。
- 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返し変形特性に関する実験的研究，第 25 回地震工学研究発表会講演論文集，pp.717-720, 1999。
- 8) 星隈順一・運上茂樹・長屋和宏：実大鉄筋コンクリート橋脚に対する正負交番載荷実験，第 3 回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.189-194, 1999。