

# 論文 サブストラクチャー仮動的実験によるプレストレス結合複合橋梁 構造物の地震応答性状

神山貴男 \* 1 · 睦好宏史 \* 2 · 町田篤彦 \* 3 · William TANZO \* 4

**要旨：**ラーメン構造の橋桁と橋脚上端の剛結部が、鉄筋コンクリート (RC) 構造の場合、及び PC 鋼材によるプレストレス結合の構造である場合の地震応答性状の違いを調べるために、その剛結部を取り出したサブストラクチャー仮動的実験を行った。プレストレス結合部のエネルギー吸収能は非常に小さいため、その剛結部のみならず橋脚下端の応答変位も大きくなり、その結果として橋梁全体に及ぼす影響が非常に大きいことが確認された。プレストレスによる結合部の復元力特性は、不規則なすべりが生じることから精度よいモデル化は困難である。従って、この種の構造物の地震応答性状を求めるためには、サブストラクチャー仮動的実験手法が有効である。

**キーワード：**プレストレス結合、仮動的実験、地震応答性状、エネルギー吸収能

## 1. はじめに

連続 PC ラーメン橋梁において、橋桁と橋脚上端を剛結する場合、通常の RC による方法、PC 鋼材により緊結する工法がある。PC により剛結する場合、桁及び橋脚の断面寸法を小さくすることが可能である。しかし、地震時における剛結部の力学的性状および構造物全体の応答性状が RC による場合と比べてどの程度相違するか明らかにされていない。本研究は連続ラーメン橋梁の中でもっとも単純な形式である 2 スパン連続 PC ラーメン橋梁を対象とし、橋脚上端の剛結部が RC 構造の場合、プレストレス結合の場合の地震応答性状をサブストラクチャー仮動的実験により明らかにすることを目的とした。

## 2. サブストラクチャー仮動的実験概要

### 2.1 システム構成

実験に使用したサブストラクチャー仮動的実験手法 [1] のシステムを図-1 に示す。本実験システムでは、構造物の中から対象とした部材を取り出してアクチュエーターにより載荷して復元力を得、他の部材の復元力はコンピューター内でモデル化して構造物全体の応答計算を行った。コンピューターとアクチュエーターは A/D 及び D/A 変換を通してオンラインで結ばれ、構成部材および構造物全体の地震応答性状は地震波継続時間にわたって自動的に得ることができる。

### 2.2 対象としたラーメン橋梁

対象とした構造物は 2 スパン連続 PC ラーメン橋梁で、図-2 に示す。橋脚はすべて RC 構造であるが、橋桁と剛結する橋脚の上端部分がそのまま RC 構造であるもの、またはプレストレス結合であるものの 2 種類とした。実験部材は、3 つの橋脚の中で最も大きな損傷を受けると考えられる中央の橋脚上端剛結部とした。なお、橋桁はすべて PC 構造である。各部材の耐力比、剛比、プレストレス量等は施工予定である橋梁 [2] を参考にして設計した。

\*1 埼玉大学大学院 理工学研究科建設工学専攻 (正会員)

\*2 埼玉大学助教授 工学部建設工学科、工博 (正会員)

\*3 埼玉大学教授 工学部建設工学科、工博 (正会員)

\*4 埼玉大学助手 工学部建設工学科、工博 (正会員)

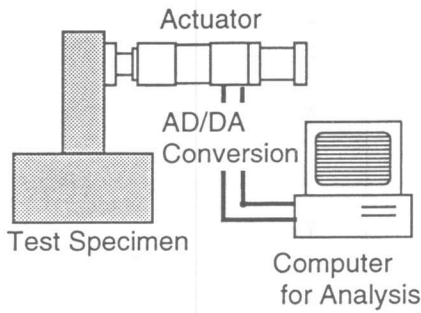


図-1 サブストラクチャー仮動的実験システム

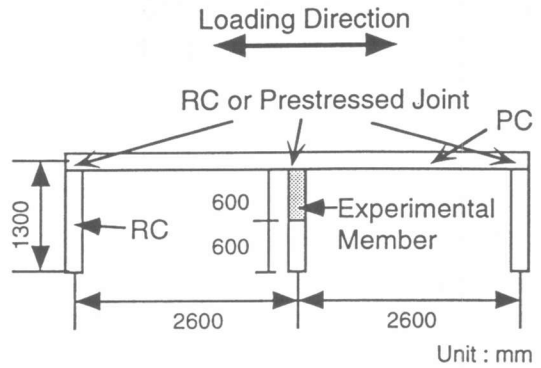


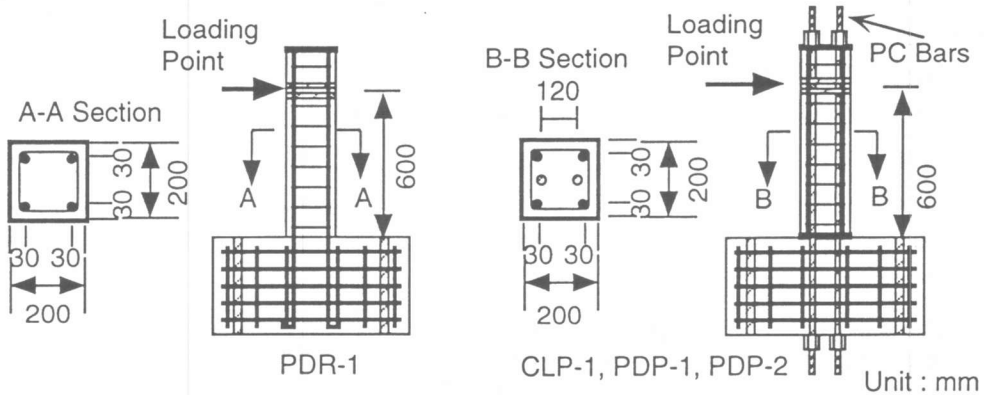
図-2 対象としたラーメン橋梁

### 2.3 応答計算手法

橋脚、および橋桁を部材レベルから応答解析を行うために、各部材毎に力学的モデルを設定する方法を採用した。構造物は複合橋梁構造物であるため、モードごとの減衰を決めるのは難しいが、構造物全体系はRCが支配的であると考えて一律2%の減衰を与えてモデルを作成した。質量マトリクスは整合質量マトリクスとし、さらに橋脚下端の軸応力が0.98MPaとなるように橋脚上端部分に質量を加えた。数値積分法は、積分条件が非常に緩やかなオペレータースプリッティング法[3]を用いた。実験部材以外の部材の復元力モデルは、RC部材には武田モデル[4]を、PC部材には加藤・岡本モデル[5]を使用した。また構造物の応答性状を計算のみにより求める場合には上記に加えて、橋脚上端がプレストレス結合の復元力モデルには正負交番載荷実験から求めたものを使用した。

### 2.4 供試体

サブストラクチャー仮動的実験に使用した供試体を図-3に示す。供試体は、2スパン連続PCラーメン橋梁の中央橋脚上端部を模したものである。供試体の断面形状及び寸法はRC構造、プレストレス構造ともに同じとし、主鉄筋にはD13を4本、帯鉄筋にはD6を80mmピッチで配置した。D13及びD6の鉄筋の降伏強度はそれぞれ372.8MPa、399.2MPaであり、実験時におけるコンクリートの圧縮強度の平均値は37.3MPaであった。



(a) RC 構造

(b) プレストレス構造

図-3 供試体の形状寸法及び配筋図

プレストレス結合の供試体の場合は、柱部分とフーチングの部分が完全に分離されているため、柱の断面、およびフーチングには、PC 鋼棒を通すためにφ20 のシース管を 120mm 間隔で 2 本配置した。今回実験に用いた PC 鋼棒は SBPR φ9.2、SBPR φ13 の 2 種類とした。なお、実験部材以外の解析部材の断面形状は、実験供試体と同一とした。プレストレスは実験の直前に導入して、フーチング部分と柱部分を緊結した。使用した PC 鋼棒の材料特性を表-1 に示す。

表-1 PC 鋼棒の材料特性

Type	Area (mm <sup>2</sup> )	Yielding Load (kN)	Breaking Load (kN)
SBPR φ9.2	66.48	87.6	95.0
SBPR φ13	132.7	176	193

## 2.5 実験要因

実験要因を表-2 に示す。実験は、プレストレス結合の基本的な性質を調べるための正負交番載荷実験として CLP-1、RC 構造の仮動的実験 (PSD Test) として PDR-1、プレストレス結合の仮動的実験として PDP-1、PDP-2 とした。CLP-1、PDP-1 では SBPR φ9.2 の PC 鋼棒を 2 本用い、導入プレストレスは 1 本あたり 41.2kN とし、PDP-2 では SBPR φ13 の PC 鋼棒を 2 本用い、導入プレストレスは 1 本あたり 82.3kN とした。また、すべてのプレストレス結合の供試体において、PC 鋼棒の定着方法はアンボンド式とした。

サブトラクチャー仮動的実験に用いた入力地震波はすべての実験において EL Centro 1940NS 成分とし、橋軸方向に入力した。作製した供試体は実構造物に対して約 1/16 であるが、構成部材が降伏以後の応答性を明確にすること、および PC 鋼棒が破断しないようにすることから、最初の 20 秒間を実時間刻みで、最大加速度を 640gal に拡大して用いた。

表-2 実験要因

Specimen	Test Type	Max. Input Acc. (gal)	PC Bars Used	Introduced Prestress (kN)
CLP-1	Cyclic Loading Test (PC)	-	SBPR φ9.2 × 2	41.2 × 2
PDR-1	PSD Test (RC)	640	-	-
PDP-1	PSD Test (PC)	640	SBPR φ9.2 × 2	41.2 × 2
PDP-2	PSD Test (PC)	640	SBPR φ13 × 2	82.3 × 2

## 3. 実験結果

### 3.1 正負交番載荷実験結果

仮動的実験を行う前に、実験部材以外の部材の復元力を求めるために正負交番載荷実験を行った。図-4(a) に φ9.2 の PC 鋼棒を使用したプレストレス結合供試体 (CLP-1) から得られたモーメント-回転角曲線を示す。この履歴曲線から、変位の負側では変位が増大するとフーチングと柱の接合面ですべりが見られた。その結果履歴ループを描く形となり、弾性的な挙動ではあるが原点を通過しない履歴曲線となった。この場合の復元力のモデル化として、図-4(b) のように単純化したものを用いた。この復元力モデルはラーメン橋脚上端がプレストレス結合と考えたときの実験部材以外の剛結部、すなわち左右の橋脚上端に用いた。表-3 に供試体別の橋脚 (左側、中央、右側) 上端の剛結部の形式を示す。ここで、ANP-1 とは解析のみのケースである。

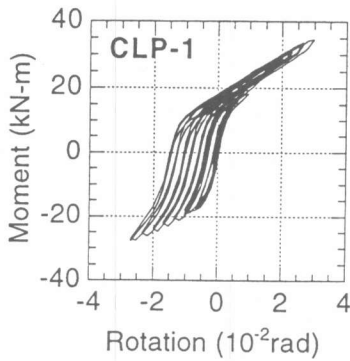


図-4(a) 履歴曲線 (CLP-1)

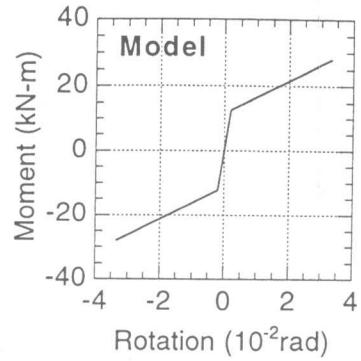


図-4(b) モデル化した履歴曲線

表-3 橋脚上端剛結部

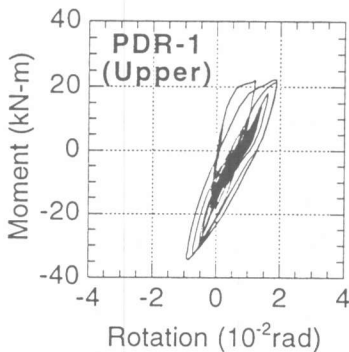
Specimen	Left Side	Middle	Right Side
PDR-1	RC (Takeda Model)	RC (Specimen)	RC (Takeda Model)
PDP-1	PC (Model from CLP-1)	PC (Specimen using $\phi 9.2$ )	PC (Model from CLP-1)
PDP-2	PC (Model from CLP-1)	PC (Specimen using $\phi 13$ )	PC (Model from CLP-1)
ANP-1	PC (Model from CLP-1)	PC (Model from CLP-1)	PC (Model from CLP-1)

### 3.2 サブストラクチャー仮動的実験結果

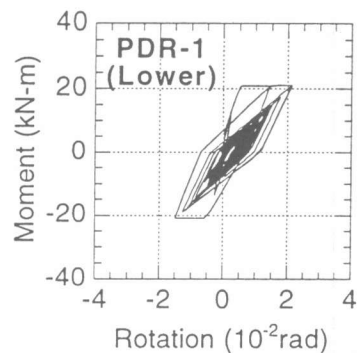
図-5(a)にサブストラクチャー仮動的実験から得られた供試体 PDR-1 のモーメント-回転角曲線を、図-5(b)にその橋脚下端のモーメント-回転角曲線を示す。以下同様にして図-6(a)、(b)に供試体 PDP-1、図-7(a)、(b)に供試体 PDP-2 を用いた実験結果をそれぞれ示す。

PDR-1 (RC 構造) は橋脚上端の剛結部がすべて RC であるため、剛結部においてエネルギーを十分吸収していることが分かる。またこのことにより橋脚下端の応答変位が小さく押さえられている。

一方 PDP-1 (PC 構造) では、復元力が正負それぞれの最大値に向かう時、接合部がせん断荷重に耐えきれなくなり、復元力が一定のまま応答変位のみが増加する傾向が見られた。履歴ループの面積は大きいですが、これは柱部分とフーチング部分がすべることによるものである。橋脚下端における応答変位が PDR-1 と比較してかなり大きいことから、橋脚上端のプレストレス剛結部のエネルギー吸収能が RC と比べて小さいことが考えられる。



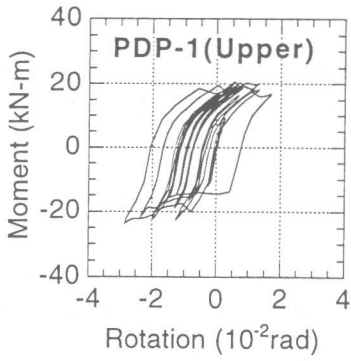
(a) 中央橋脚上端



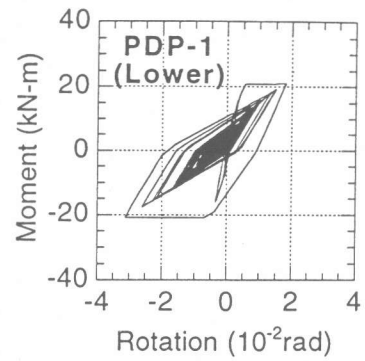
(b) 中央橋脚下端

図-5 モーメント-回転角曲線 (PDR-1)

これに対して PC 鋼棒の径を太くしてプレストレス量を増やした PDP-2 は、橋脚上端および下端の応答変位は、PDP-1 より小さくなっており、RC 構造と同程度のエネルギー吸収能が期待できる。これは接合面でのすべりが減り、耐力が上昇したためであると考えられる。

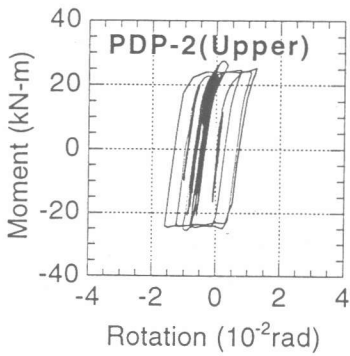


(a) 中央橋脚上端

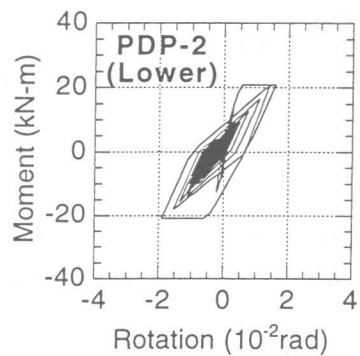


(b) 中央橋脚下端

図-6 モーメント-回転角曲線 (PDP-1)

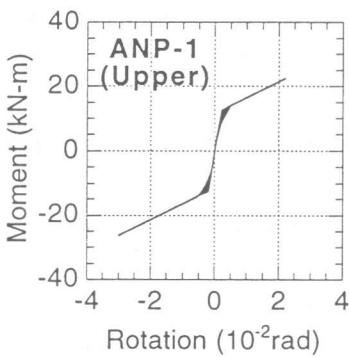


(a) 中央橋脚上端

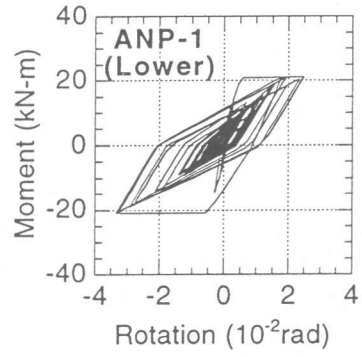


(b) 中央橋脚下端

図-7 モーメント-回転角曲線 (PDP-2)



(a) 中央橋脚上端



(b) 中央橋脚下端

図-8 モーメント-回転角曲線 (ANP-1)

### 3.3 数値解析結果

本研究で対象とした構造物に対し、数値解析を行った。ここでは、PDP-1 に対応する場合について述べることにする。プレストレスによる剛結部の復元力のモデルは、CLP-1 の実験結果を基にして作成した(図-4(b))。計算結果を図-8(a)、(b) に示す。図から分かるように、橋脚上端でのエネルギー吸収能がほとんど期待できない場合には、他の箇所すなわちこの場合では、橋脚下端に損傷が集中する。これは、PDP-1 の応答性状と同様の傾向を示している。したがって、桁と橋脚をプレストレスにより緊結する場合には地震による損傷の程度および生じ方が RC の場合と異なることを考慮する必要がある。また、本構造物の地震応答性状を求める手法として、サブストラクチャー仮動的実験手法は有効であると言える。

### 4. まとめ

2 スパン連続 PC ラーメン橋梁の上端剛結部が RC 構造である場合、プレストレス結合である場合の地震時応答性状を詳細に検討するために、サブストラクチャー仮動的実験を行い、構成部材および構造系全体の応答性状を明らかにした。本研究の範囲から以下のことが結論される。

1) 桁と橋脚をプレストレスにより結合した場合、プレストレス量により結合箇所のエネルギー吸収能が異なる。このため、地震による橋脚の損傷の程度および生じ方が通常の RC の場合と異なることが明らかとなった。

2) 桁と橋脚をプレストレスにより結合した場合の復元力は、すべりを伴う複雑な挙動を示した。このような部材を有する構造物の応答性状を求める手法として、サブストラクチャー仮動的実験は有効な手法である。

### 謝辞

本実験を遂行するに当たり、元大学院生の富川哲氏(現東急建設)、元卒論生の松村明裕君(現青森県庁)の協力を得た。さらに、元卒論生の保坂勲君(現埼玉大学大学院生)には供試体作製から実験の準備、データ整理など多大な協力を得た。ここに感謝する次第である。

### 参考文献

- 1) 貞末和宏・睦好宏史・William TANZO・町田篤彦：サブストラクチャー仮動的実験による RC2 層ラーメン橋脚の地震時弾塑性応答、コンクリート工学論文報告集、Vol.16、No.2、pp.1118-1124、1993.6
- 2) 高速道路技術センター：松山自動車道 PC プレキャストブロック工法に関する技術検討(その3) 地震時全体構造の検討、1994.6
- 3) 中島正愛・石田雅俊・安藤和博：サブストラクチャー仮動的実験のための数値積分法、日本建築学会構造系論文報告集、第417号、pp.107-117、1990.11
- 4) S. Otani, SAKE, a computer program for inelastic of R/C frame to earthquake. Research Report UILU-ENG-74-2029, Illinois University, November 1974
- 5) 岡本伸・加藤博人・林三雄・石井孝幸：プレキャストプレストレストコンクリート造建物の地震応答性状について、プレストレストコンクリート、Vol.35、No.4、pp.41-52、1993.7