

内筒鋼管を用いたプレキャストPC橋脚の振動台実験

曾我部直樹¹・山野辺慎一²・新井崇裕³・運上茂樹⁴・堺淳一⁵

¹正会員 博（工） 鹿島建設（株）技術研究所（〒182-0036 調布市飛田給2-19-1）

²正会員 工修 鹿島建設（株）技術研究所（〒182-0036 調布市飛田給2-19-1）

³正会員 鹿島建設（株）技術研究所（〒182-0036 調布市飛田給2-19-1）

⁴正会員 工博（独）土木研究所 構造メンテナンス研究センター（〒305-8516 つくば市南原1-6）

⁵正会員 博（工）（独）土木研究所 構造メンテナンス研究センター（〒305-8516 つくば市南原1-6）

1. はじめに

プレキャスト工法では、コンクリート製品工場や施工現場周辺のヤードに熟練技術者を集中的に投入して、標準化された作業により製作されるプレキャスト（PCa）セグメントを用いるため、高い品質のコンクリート構造物を構築することができる。また、施工においては、セグメントの組立て・接合により構造物を構築することが可能なことから、場所打ち工法に比べはるかに急速な施工が可能になる。これらの利点から、プレキャスト工法は橋梁の上部構造等においては、すでに広く実用化されている。一方、プレキャスト橋脚構造は、国内にも数例の実績はあるが、上部構造に比べほとんど普及していない。その一因としては、耐震性に関する研究が少ないことなどが考えられる。しかし、近年、増加している都市内の連続高架橋の建設や、交通量の多い交差点の立体交差化事業においては、工期の短縮が大きな課題となっており、橋脚構造においても、プレキャスト工法の適用が望まれている。

これに対し、著者らは、既往の研究において、高さ方向に積み重ねた PCa セグメント部材に、プレストレスを導入したプレキャスト PC 橋脚構造を開発し、要素実験、および縮小模型に対する静的載荷実験などにより、その基本的特性を確認している¹⁾。しかしながら、こうした PC 橋脚構造の大規模地震時における動的な特性は、必ずしも十分に明らかにされていない。そこで、本研究では、本プレキャスト PC 橋脚構造の縮小模型を対象として、レベル 1 およびレベル 2 地震動による振動台実験を行い、地震時における耐震性能について検討を行った。

2. 内筒鋼管を用いたプレキャストPC橋脚

(1) 内筒鋼管を用いたプレキャストPC橋脚

本研究で対象とするプレキャスト PC 橋脚は、図-1 に示すように橋脚用 PCa セグメント、PC 鋼材、内筒鋼管、外筒鋼管からなり、工場あるいは現地製作ヤードにおいて、橋脚軸方向に輪切りにした形状で予め外筒鋼管を埋設した橋脚用 PCa セグメントを製作し、現地において構築する。構築手順は、製作した PCa セグメントを積上げて、外筒鋼管の中にその継目部を跨ぐように内筒鋼管を配置し、その中に PC 鋼材を挿入・緊張、一体化して構造体とする。そして、外筒鋼管と内筒鋼管の空隙、内筒鋼管と PC 鋼材の空隙にグラウトを充てんして完成させるものである。

本プレキャスト PC 橋脚構造では、PCa セグメントの継目部に作用するせん断力は、グラウトが充填された内筒鋼管と、その外部のグラウトならびに外筒鋼管を介して PCa セグメントに構造的に伝達する。一方、曲げに対しては、降伏強度が高い PC 鋼材が引張鋼材として機能するため、一般の RC 橋脚に比べ鋼材量および断面寸法を小さくすることができる。さらに、PC 鋼材によりプレストレス力を導入することにより、橋脚全体の復元力特性に原点指向性を付与し、地震後の残留変位を低減できる（図-2）^{1) 2)}。また、グラウトとの付着力が比較的小さな内筒鋼管を PC 鋼材のダクトとして利用し、地震時に橋脚が曲げ変形する際に、内筒鋼管とグラウトの付着が切れ、PC 鋼材のひずみが平滑化することにより、PC 鋼材が基部において局所的に降伏することを防いでいる¹⁾。

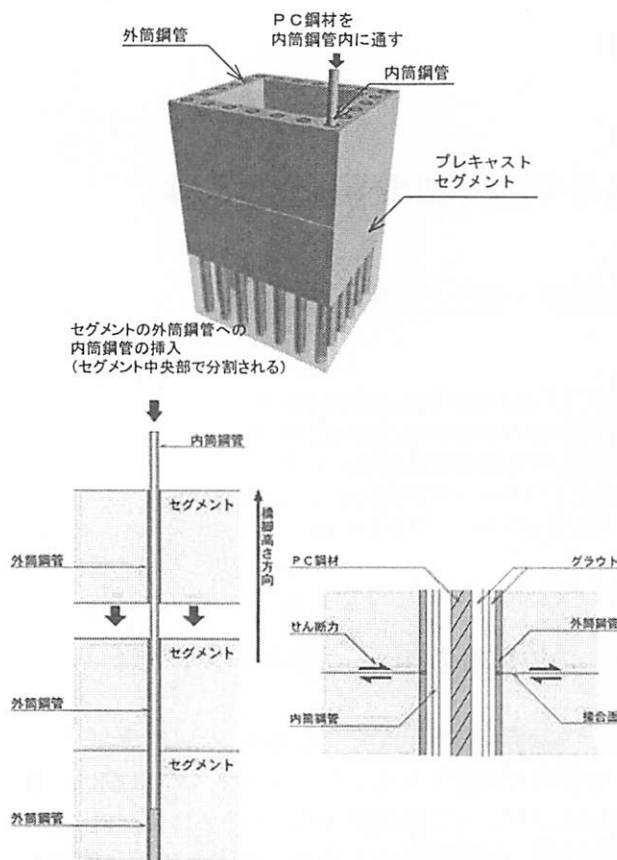


図-1 内筒鋼管を用いたプレキャスト PC 橋脚

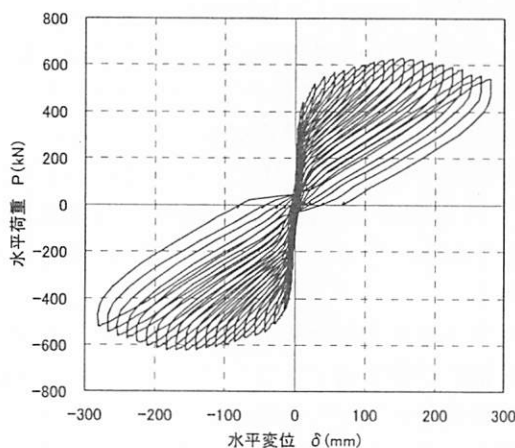


図-2 プレキャスト PC 橋脚の荷重-変位関係の一例

以上のような構造によりプレキャスト PC 橋脚は、一般の RC 橋脚に比べ橋脚断面が小さくなるほか、残留変位が小さいこと、PCa 継目部の貫通部材が内筒鋼管と PC 鋼材のみであるため急速施工性に優れること、工場製作の PCa 部材を使用するため高い品質を実現できること、などの特徴を有している。

(2) 耐震設計の考え方

プレキャスト PC 橋脚の耐震設計では、レベル1地震動とレベル2地震動を想定し、それぞれに対する耐震性能を照査する。レベル1地震動に対しては、

表-1 プレキャスト PC 橋脚の制限値

	PC鋼材	プレキャストセグメント	内筒鋼管
耐震性能1	引張応力が $0.8\sigma_{pu}$ あるいは $0.9\sigma_{py}$ の小さい方 の値より小さい	・最外縁コンクリートの曲げ圧縮応力が $0.5\sigma_{ck}$ 以内 ・コンクリートの平均せん断応力が 道路橋示方書IV下部構造編4.2に規定 される許容せん断応力以内	せん断応力が 60N/mm^2 以内
耐震性能2		・最外縁コアコンクリートの圧縮ひず みが 3500μ 以内 ・道路橋示方書V耐震設計編10.5によ るせん断耐力が作用せん断力以上	せん断応力が 降伏せん断強度以内

コンクリート、PC鋼材、内筒鋼管のそれぞれが健全であることを確保する。レベル2地震動に対しては、PCaセグメントの帯鉄筋および中間帯鉄筋に拘束されるコンクリートが圧縮力を保持できる状態であると共に、PC鋼材の引張降伏、内筒鋼管のせん断降伏を防ぐ。これは、地震時にPC鋼材が降伏すると導入されているプレストレスの大きさが地震の前後で変化し、耐震性能が低下することが考えられるためである。また、内筒鋼管がせん断降伏した場合には、継目部でずれが残留する可能性も想定される。つまり、レベル2地震動に対して耐震性能2を満足することができれば、地震後においてもPC鋼材の交換、プレストレスの再導入を実施しなくても地震前と同様の性能を確保することができる。表-1にプレキャスト PC 橋脚における耐震性能1、2に対する制限値を示す。それぞれの制限値については、既往の実験結果¹⁾に基づき設定している。

3. プレキャスト PC 橋脚の振動台実験

(1) 試験体

試験体は、図-3に示すように、都市内高架橋³⁾を想定して耐震設計されたプレキャスト PC 橋脚の縮小模型（相似率：1/4.36）とした。断面は、 $550\times 550\text{mm}$ の正方形断面であり、 $280\times 280\text{mm}$ の中空部分を有している。プレキャスト柱部は、高さ550mmの躯体セグメント3個、高さ173mmの躯体セグメント1個からなる。

断面内にはPC鋼材としてSWPR19 1S21.8を隅角部に4本配置し、SWPR19 1S19.3を8本、ウェブ、フランジ部に配置した。PC鋼材は、内筒鋼管と外筒鋼管で被覆し、内筒鋼管については、セグメントの継目部における必要せん断耐力から、高圧力配管用炭素鋼管（外径：42.7mm、厚さ：6.4mm、降伏強度： 245N/mm^2 ）を適用し、外筒鋼管については、一般構造用炭素鋼管（外径：60.5mm、厚さ：2.3mm）を適用した。なお、帯鉄筋については、セグメントのせん断耐力が曲げ耐力を上回るように配置した。コンクリートについては、設計基準強度 60N/mm^2 で

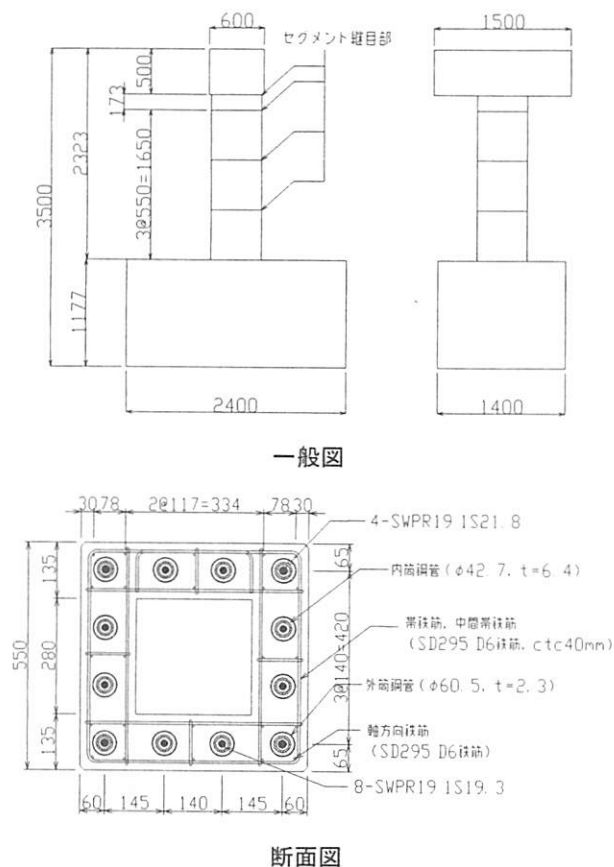


図-3 試験体

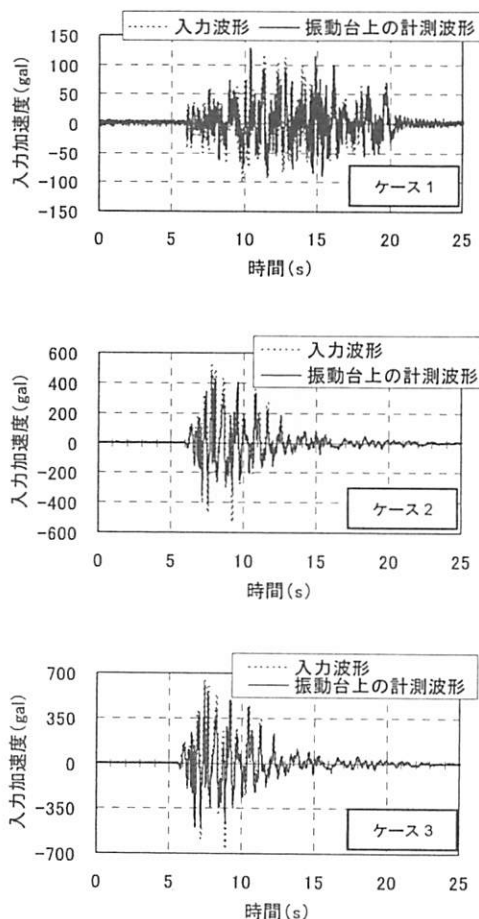


図-4 入力地震動

表-2 実験ケース

実験ケース	入力地震動	スケール	確認項目
(1)	道路橋示方書 レベル1地震動2種地盤	100%	レベル1地震動相当に対する耐震性能1の確認
(2)*	道路橋示方書 レベル2・タイプII地震動2種地盤	80%	レベル2・タイプII地震動相当に対する耐震性能2の確認
(3)	道路橋示方書 レベル2・タイプII地震動2種地盤	110%	レベル2地震動経過後におけるさらに大規模な地震動に対する耐震性能

*スケールについては、実橋を対象とした予備解析において、ゴム支承、地盤バネを考慮しない解析モデルの最大応答が両要因を考慮する解析モデルにおける最大応答と同等となるようなスケールを設定した

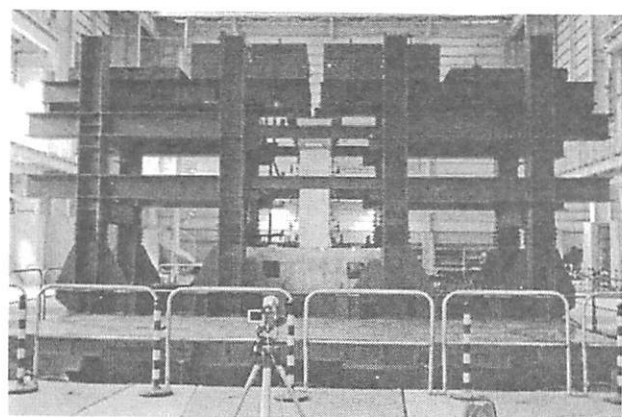


写真-1 振動台実験の状況

最大の粗骨材を寸法10mmとした。

(2) 加振方法と入力地震動

試験体への加振は、(独)土木研究所保有の三次元大型振動台を用いて行った(写真-1)。試験体へは、487kNの錘を上載する2連の桁の慣性力が、フーチング上より2.523mの位置でピン支承を介して伝達される。なお、加力方向は、1方向とした。

振動台実験で入力する地震動は、図-4に示す3ケースとした。また、実験ケースを表-2に示す。ケース1は、道路橋の耐震設計に用いられるレベル1地

震動であり、プレキャストPC橋脚の耐震性能1に対する性能検証を目的とする。ケース2は、設計に用いられるレベル2・タイプII地震動であり、耐震性能2に対する性能検証を目的としている。ケース3は想定外に大きな地震動が作用した場合のプレキャストPC橋脚の損傷および破壊過程を評価することを目的とした。地震動の加振振幅については、実橋を対象とした予備解析において、ゴム支承、地盤バネを考慮しない解析モデルの最大応答が両要因を考慮する解析モデルにおける最大応答と同等となるようなスケールを設定した。なお、図-4の地震動の時間軸は相似率に基づいて縮小している。

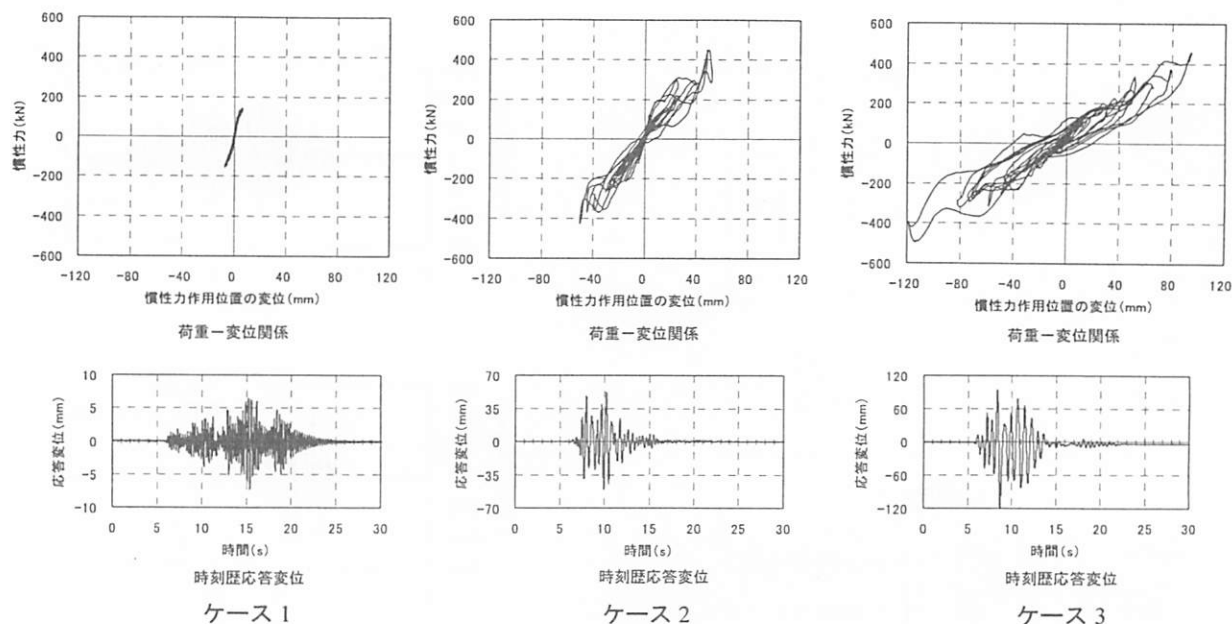


図-5 振動台実験の結果

(3) 計測方法

試験体の上部構造の慣性力作用点にレーザー変位計および加速度計を設置し、実験中における応答を計測した。また、試験体に入力された加速度を計測するために、加速度計については振動台上にも設置した。さらに、PC鋼材や内筒鋼管およびコンクリートの表面にひずみゲージを設置し、そのひずみについても計測を行った。

4. 振動台実験の結果

図-5 に各実験ケースの慣性力-慣性力作用点変位関係（以下、荷重-変位関係と称する）、応答変位の時刻歴を示す。荷重-変位関係の形状については、一般的な RC 橋脚に比べ、原点指向性が大きく、エネルギー吸収、残留変位が小さくなっていることが分かる。応答加速度、変位については、地震動の強度が大きくなるほど（ケース 1→ケース 3）、大きくなっているが、残留変位については、ケース 3 を除き、ほぼゼロとなっている。また、ケース 3 についても残留変位は小さい。応答波形については、地震動の強度が小さいほど、短周期であり、その強度が大きくなるにつれて長周期化する傾向が確認できる。これは、内筒鋼管とグラウトの付着が試験体の変形に伴って徐々に切れ、PC 鋼材のひずみが平滑化することにより橋脚全体の剛性が小さくなることと、基部における損傷が大きくなることにより、試験体の固有周期が長周期化していることに起因するものであると考えられる。図-6 にケース 1, 2 における試験体の応答変位に対する、PC 鋼材の試験体高さ方向のひずみ分布の比較を示す。図-6 より、

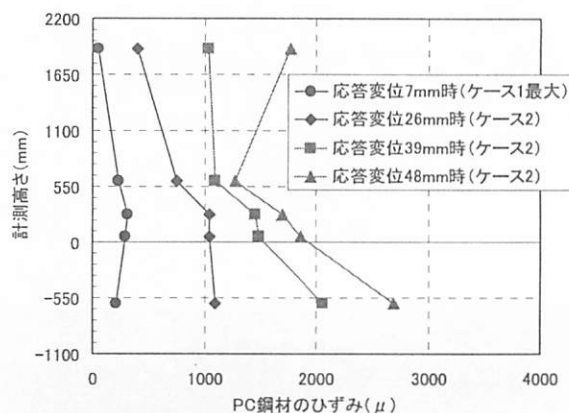


図-6 PC 鋼材のひずみ分布の変化

試験体の応答変位が大きくなるに従って、基部のひずみよりも上部のひずみの増加が大きくなっていることが分かる。これは、試験体の曲げ変形に伴って、内筒鋼管とグラウトの付着が切れ、PC 鋼材のひずみが平滑化したことを示している。また、写真-2 に示すように、地震動の強度が大きくなるほど基部のコンクリートの損傷も大きくなっている。

表-3 に各実験ケースで計測された応答加速度、変位および PC 鋼材のひずみ、内筒鋼管のせん断ひずみ、コンクリートの圧縮ひずみの最大値を示す。なお、実験の進行に伴い損傷した計測機器による結果については除外した上で最大値を抽出している。レベル 1 地震動相当を想定したケース 1 の場合、PC 鋼材、内筒鋼管のせん断ひずみおよびコンクリートの圧縮ひずみは、全て、耐震性能 1 に対する制限値を満足する範囲内に留まっている。また、レベル 2 地震を想定したケース 2 でも、PC 鋼材の引張ひずみ、内筒鋼管のせん断ひずみが、耐震性能 2 を満足

表-3 各ケースの最大応答値

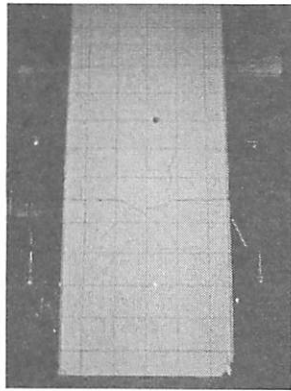
項目	単位	ケース1	ケース2	ケース3	備考
最大絶対 応答加速度	正側	271.4	760.8	880.2	
	負側	-296.1	-753.8	-919.6	
最大応答変位	正側	6.5	51.9	94.0	
	負側	-7.3	-50.3	-119.1	
PC緊張材ひずみ*	μ	317	3036	5373	降伏ひずみ: 6400 μ **
内筒鋼管の せん断ひずみ*	μ	427	2075	—	60N/mm ² 時ひずみ: 780 μ *** 降伏ひずみ: 2200 μ
コンクリートの 圧縮ひずみ*	μ	-739	—	—	0.5 σ_{ck} 時ひずみ: -800 μ ****

* 損傷した計測機器による計測値を除外したものの中から最大値を抽出している。

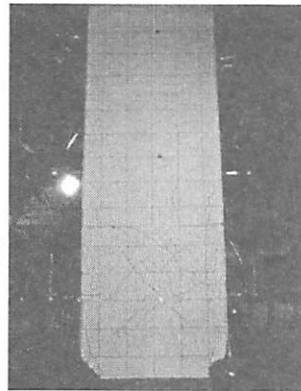
** PC鋼より線の降伏ひずみ(7800 μ)からプレストレス導入時のひずみ(1400 μ)を差し引いた値

*** 内筒鋼管のせん断応力が60N/mm²のひずみをせん断弾性係数を 7.7×10^4 N/mm²として算出した値

**** 材料試験結果において圧縮応力が30N/mm²時のひずみ(-1000 μ)から軸力およびプレストレス分の初期ひずみ200 μ を差し引いた値



ケース2終了後



ケース3終了後

写真-2 加振終了後の試験体の状況

する範囲内に留まっている。さらに、写真-2 に示すように、基部におけるコンクリートの損傷状況は、かぶりコンクリートが若干剥離している程度であることから、耐震性能 2 に対するコアコンクリートの制限値も満足していると推測される。ケース 3 においては、PC 鋼材の引張りひずみが大きくなり、基部の損傷もコアコンクリートまで進展しているが、橋脚としての軸力の保持機能は安定し、残留変位も小さく、想定外の地震動に対しても、橋脚の損傷が使用性を保持できる程度であることが分かる。

5. 解析的検討

(1) 解析の概要

本研究では、振動台実験の再現解析として、図-7 に示す解析モデルによる動的解析を行った。プレキャスト PC 橋脚が地震により曲げ変形し、導入プレストレスを超えるような増加応力が PC 鋼材に作用した場合、内筒鋼管とグラウトとの付着力が小さいため、その付着が切れ、PC 鋼材はアンボンド PC 鋼材のような挙動を示す。そのため、プレキャスト PC 橋脚では、通常の RC 橋脚のように曲げひび割れが分散せず、最下部セグメントとフーチング

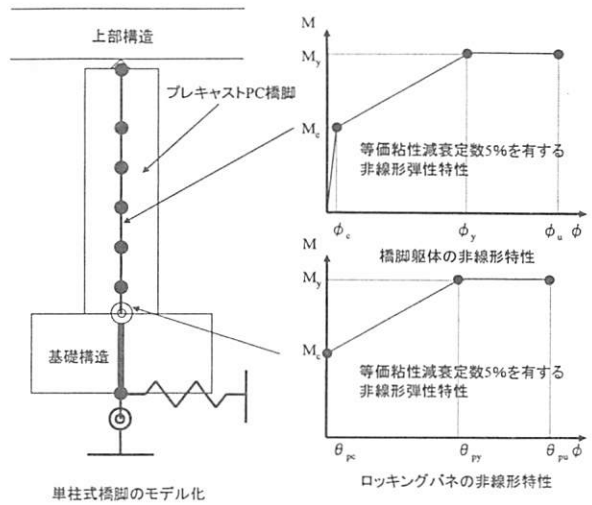


図-7 プレキャスト PC 橋脚の解析モデル

との境界部が大きく目開きしてロッキングするような曲げ変形性状を示す¹⁾。そこで、本研究では、解析モデルにおいて、ロッキングが最も大きくなる最下部セグメントとフーチングの境界部に、ロッキングの特性をモデル化した非線形回転バネ要素を設け、それより上部については、通常の RC 部材と同様にモーメント-曲率関係からなる梁要素により構成した。なお、非線形回転バネ要素の特性は、地震時に想定される内筒鋼管とグラウトの付着切れにより、PC 鋼材のひずみが平滑化する区間と、それに伴うロッキング挙動から設定する。実験では、前述のように各実験ケースで付着切れ区間が異なっているため、以下の解析では、各実験ケースにおける同区間を実験結果から仮定し、ケース 1 ではゼロ、ケース 2 では 2100mm、ケース 3 では 2900mm というように、地震動の強度が大きいくほど、付着切れ区間を長くして、非線形回転バネ要素の特性を設定した。

履歴特性としては、プレキャスト PC 橋脚では、導入されたプレストレスにより原点指向性が大きく、履歴吸収エネルギー量が小さくなることから、非線形弾性特性モデルとした。ただし、プレキャスト PC 橋脚でも、コンクリートの非線形挙動や PC 鋼材の摩擦等により、一定の履歴吸収エネルギー性能があることから、プレキャスト PC 橋脚の履歴面積に応じた減衰定数を用いることにより、これらを考慮することとした。例えば、プレキャスト PC 橋脚に対する既往の実験¹⁾では、PC 鋼材の降伏までの各載荷サイクルの履歴面積から 5% 程度の等価粘性減衰定数が得られている。そこで、再現解析における履歴特性では、等価粘性減衰定数を 5% として、Rayleigh 減衰により考慮した。

再現解析における入力波形については、各実験ケースにおいて振動台上で計測された加速度を用いた。

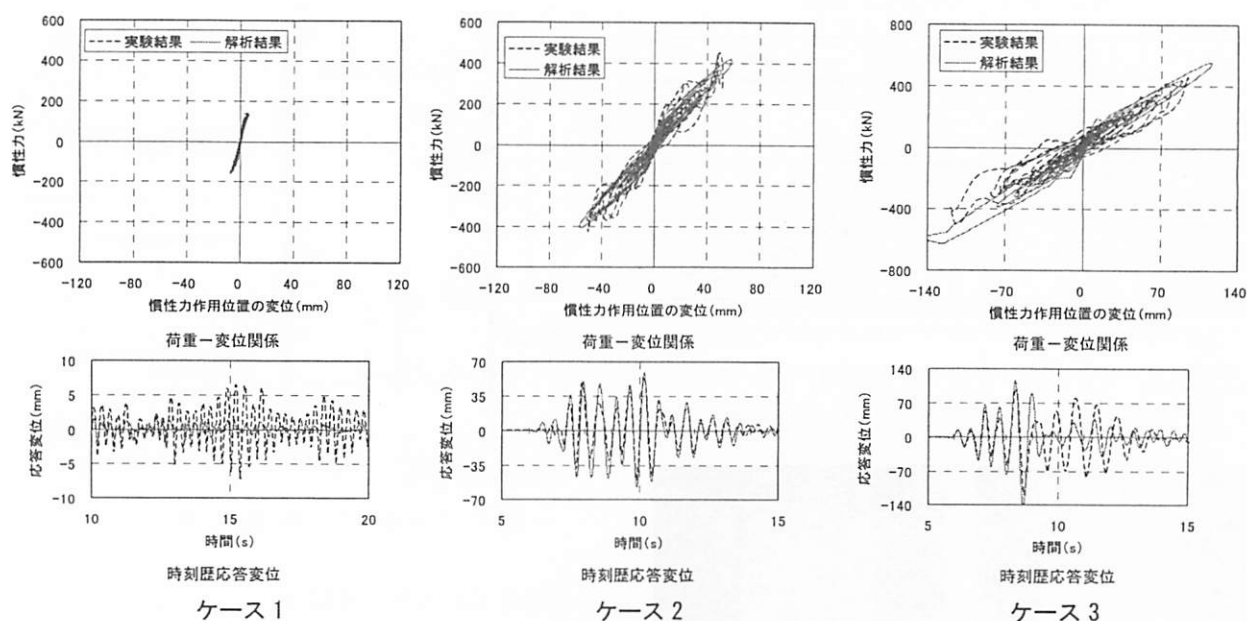


図-8 再現解析の結果

(2) 解析結果

図-8 に荷重－変位関係および時刻歴応答変位について実験結果と解析結果の比較を示す。

ケース 1 では、解析結果の剛性が概ね実験結果と一致していることが分かる。また、応答変位波形も、位相について良い一致が確認できる。ただし、応答の大きさについては、解析結果は実験結果よりも小さくなっている。この原因としては、解析モデルでは、履歴による減衰を等価粘性減衰定数を 5%として考慮しているが、ケース 1 のような微小な変形領域では、それが 5%よりも小さかったことが考えられる。一方、ケース 2 では、荷重－変位関係における剛性および応答変位波形の位相、大きさについても実験結果と解析結果が良く一致していることが分かる。また、ケース 3 では、加振中に実験結果の応答波形の位相が変化し、8 秒付近以降において、解析結果の位相、周期が実験結果に比べ短くなっている。荷重－変位関係についても、負側において、解析よりも実験結果の剛性が小さくなっている。これは、加振中に基部の損傷がコアコンクリートまで進展したことが、主要要因であると考えられる。

以上より、図-7 に示す解析モデルにおいて、内筒鋼管とグラウトの付着切れによって、PC 鋼材のひずみが平滑化する区間を適切に設定すれば、PC 鋼材が降伏せず、コアコンクリートまで損傷が進展しない範囲において、本プレキャスト PC 橋脚の動的な挙動を評価できることが確認された。本プレキャスト PC 橋脚では、前述のようにレベル 2 地震動に対して、PC 鋼材の降伏やコンクリートの大きな圧壊を許容しないため、レベル 2 地震動に対する耐震設計におい

て本解析モデルが有用であると考えられる

6. まとめ

本研究では、内筒鋼管を用いたプレキャスト PC 橋脚の地震時における耐震性能について、その縮小模型に対する振動台実験により検証した。その結果、耐震設計されたプレキャスト PC 橋脚は、レベル 1 およびレベル 2 地震動に対して、必要とされる耐震性能を満足し、想定外の地震動に対してもその使用性が顕著に失われることがないこと、レベル 2 地震時における動的な挙動を、内筒鋼管とグラウトの付着が切れ、PC 鋼材のひずみが平滑化することを考慮した解析モデルで再現できることを確認した。

なお、本研究は、（独）土木研究所と民間 3 社（鹿島建設（株）、（株）ピーエス三菱、三井住友建設（株））との共同研究（「耐震性に優れたプレキャストコンクリート橋脚構造の耐震設計法」、平成 18～19 年度）として実施したものである。

参考文献

- 1) 新井、日紫喜、須田、山本、滝沢、尾鍋；新しいプレキャスト PC 橋脚の開発、鹿島技術研究所年報、第 48 号、pp.25-30、2000 年
- 2) 池田、森、吉岡；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 年
- 3) （社）日本道路協会；道路橋の耐震設計に関する資料、1997 年