

プレキャストPC3層骨組振動台実験のシミュレーション解析

静岡理科大学 正会員 博(工) ○丸田 誠
(株)ピーエス三菱 福岡 知也

Abstract : The simulation analysis of the precast prestressed concrete (PCaPC) three story shaking-table test, are conducted to know its dynamic characteristics. The pushover analysis and the dynamic response analysis are carried out using beam model and multi-spring assumption for bending behavior. The shaking-table tests of the bonded specimen and the unbonded specimen, were targeted to analysis. Input waves were 3 magnitude (Level 1-3) NewRC type of the artificial wave and the JR Takatori of a real recorded. The pushover analysis assumed A_i load distribution, is not exactly corresponded with the test result. Then, the distributed ratio of horizontal load is assumed 2:1.5:1 as 3rd, 2nd, 1st story, respectively. Its analyses are corresponded with the test results. The dynamic response analyses are carried out comparing with the test result. The analytical model of tri-linear elastic model with no loop, is roughly corresponded with the test results until Level 2 New RC input.

Key words : Precast Prestressed Concrete, Shaking Table Test, Simulation Analysis

1. はじめに

プレキャスト・プレストレスト・コンクリート造 (以下 PCaPC) 骨組は、複数のプレキャストコンクリート部材を PC 鋼より線や PC 鋼棒で圧着して接合する骨組であり、建築物の重層化には施工的にも適しているが、鉄筋コンクリート (RC) 建築物に比べ減衰性能が小さい等の動的な課題がある。そこで、PCaPC 架構の振動台を用いた動的实验を行い結果を報告した¹⁾が、十分な解析的検討はなされていない。今回、実験のシミュレーション解析を行い PCaPC 架構の静的および動的な性状を検討したのでここに報告する。

解析は、静的漸増解析 (PUSHOVER) と地震応答解析の 2 種類を行なった。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は、二方向(X,Y) 1 スパンの 3 層立体骨組である。各スパン長 2400mm×2400mm, 階高 1000mm であり、部材断面寸法は各階とも同じである。試験体の縮尺は実物の約 1/4 で、試験体数は 2 体とし、実験因子は梁の PC 鋼棒のボンド、アンボンドとした。以降、ボンド試験体とアンボンド試験体と称す。図-1 に試験体の全体立断面および柱と梁の断面図を示す。X 方向梁の上下の PC 鋼棒位置を外側-外側に配し、Y 方向の位置を内側-内側に配した。これは X 方向の入力を主としたためである。実験状況を写真-1 に示す。

試験体は柱、梁 (PCa : プレキャスト部材) を予め工場で作製し、実験場内で、PC 鋼材でポストテンション圧着接合を行い製作した。この時の PC 鋼棒の緊張力は日本建築学会 PC 規準²⁾に従い、規格降伏強度の 80% を導入した。各層の質量は両試験体とも概ね 60kN とした。この中で、おおよそ 40kN が鉛インゴットによる積載荷重である。

使用した材料の機械的性質をまとめて表-1 に示す。この中で D3 は特注した 3mmφ 異径棒鋼である。

2.1 入力波

入力地震波の一覧を表-2 に、NewRC 波レベル 2 の加速度時刻歴を例として図-2 に示す。表-2 の速

度の入力レベルは、模型実験用の入力でなく実大建物への入力速度として記載した。実入力に相似則に基づき 1/2 とした。最初に弾性時の挙動と固有振動数を把握するために 50gal の加振を実施した。入力地震動としては、人工地震波である NewRC ランダム波³⁾を X 方向加振に、レベル 2 加振後の X, Y 同時入力時の Y 方向には NewRC ランダム波 II³⁾を用いた。なお、図-2 の NewRC 波加速度を減幅、増幅させ入力レベルを調整した。最終は阪神淡路大震災時の J R 鷹取駅で観測された 2 方向地震波 NS,EW (Takatori X, Y (以下、鷹取波)) を同時に入力した。

2.2 結果概要

ボンド試験体とアンボンド試験体は、最終的な損傷・破壊性状に差異は見られなかった。両試験体とも、ひび割れ、圧壊などの損傷は 1 階柱脚部、各階の梁端部の目地部分に集中し、他の部分には損傷は無かった。1 階柱脚部と各階の梁端の計測回転角から層間変形のひとつが、この回転角による変形の和となっていることが分かった。特にレベル 2 を超える大加振時にはこの傾向が強く、1 階柱脚部と各階の梁端部に層間変形の 100% 近くが集中していた。ボンド試験体とアンボンド試験体は、その応答性状に違いが見られた。両試験体ともレベル 1~レベル 2 加振時まで概ね弾性的な挙動を示したが、その応答層間変形角はアンボンド試験体の方

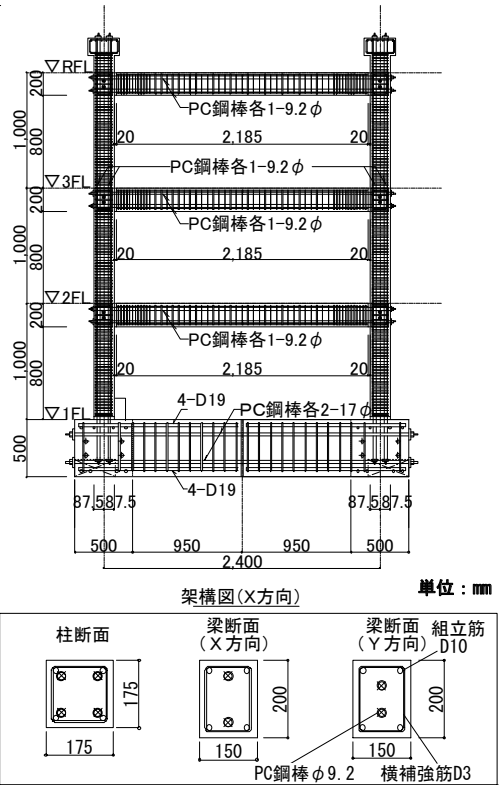


図-1 試験体概要

表-1 材料の機械的性質

(コンクリート)					
試験体	部位	試験時			
		圧縮強度 σ_c (N/mm ²)	引張強度 σ_t (N/mm ²)	ヤング率 E_c ($\times 10^4$ N/mm ²)	ポアソン比 ν
ボンド	柱・梁	66.5	3.6	3.86	0.24
	柱脚目地	101	2.9	2.68	0.21
	梁端目地	101	4.1	2.45	0.20
アンボンド	柱・梁	65.7	3.1	3.75	0.23
	柱脚目地	83.8	3.3	2.49	0.17
	梁端目地	96.2	3.2	2.88	0.19

(鋼材)						
呼び径	材質	降伏強度 σ_y (N/mm ²)	降伏ひずみ (μ)	引張強さ σ_u (N/mm ²)	破断伸び ϵ_u (%)	使用部位
D3	-	256	1381	301	-	横補強筋、スラブ筋
D10	SD345	388	-	533	27.1	柱梁組立筋
PC鋼棒 9.2φ	C種1号	1238	6785	1269	-	柱梁緊張用鋼材

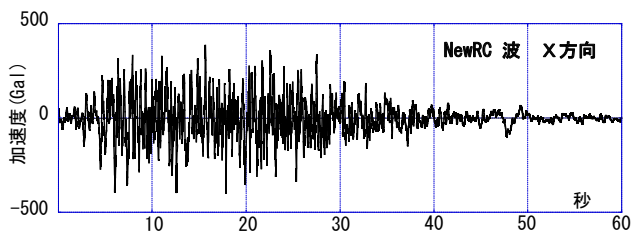


図-2 入力地震波 (NewRC レベル 2)



写真-1 実験状況

表-2 入力地震波

地震波	入力レベル		方向
	弾性	50gal	
NewRC -random 波	レベル 0.5	12.5kine	1 方向
	レベル 1	25kine	1 方向
	レベル 1.5	37.5kine	1 方向
	レベル 2	50kine	1 方向
	レベル 2	50kine	2 方向
	レベル 3	75kine	1 方向
JR 鷹取波	原波レベル (642-NS, 666gal-EW)		2 方向

が大きかった。ボンド試験体ではレベル3加振で梁のPC鋼棒が降伏したが、アンボンド試験体では、鷹取波加振の最大振幅時と遅かった。

鷹取波の加振時に試験体は大きく塑性化し、最大層間変形がボンド試験体で 5%rad.(1/20), アンボンド試験体で 6.25%rad.(1/16)となったが、全体としての試験体の損傷は小さく、残留層間変形は 0.1%rad.以下となり、良好な性状を示した。

3. 解析結果

3.1 解析モデル

静的漸増解析, 地震応答解析とも任意形状立体フレーム弾塑性解析プログラム (SNAP Ver.6) ⁴⁾を用いた。

解析モデルは、柱や梁を線材でモデル化し、交差部には剛域を設定した。各スパン、部材断面寸法は実験と同等とし、床部分はモデル化していない。実験では設置していた基礎梁をなくし1階柱脚部分を固定端とし、鉛インゴッドや床荷重などの層荷重は梁に均等分布させた。部材モデルは、柱は、曲げをマルチスプリングで、梁の曲げもプレストレスを考慮するため柱と同様にマルチスプリングでモデル化し軸方向力を導入し、せん断は柱、梁ともに単軸バネでモデル化した。このマルチスプリング要素は長さを考慮しないため、曲げや軸応力は部材端の応力として扱う ⁴⁾。

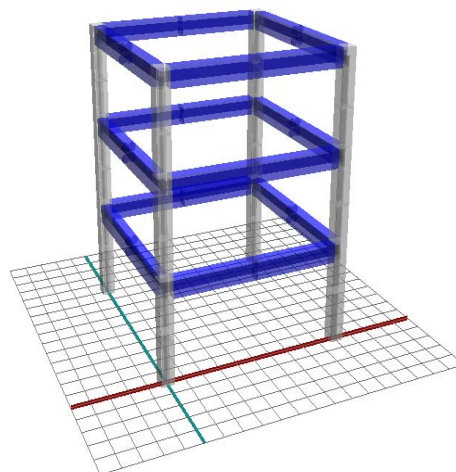


図-3 解析モデル

表-3 解析ケース一覧

試験体	解析ケース	減衰定数	履歴モデル
ボンド 解析モデル	ケース1	h=3%	武田 (剛性低減型)
	ケース2	h=2%	
	ケース3	h=1%	3線逆行型
	ケース4	h=3%	
	ケース5	h=4%	
	ケース6	h=5%	
アンボンド 解析モデル	ケース7	h=3%	3線逆行型
	ケース8	h=4%	
	ケース9	h=5%	

解析プログラムの関係で PC 鋼棒 9.2φ を D10 と置換し、鋼材比と降伏強度との積 $P_g \times \sigma_y$ を一致させて用いた。この場合の最大曲げ強度は、両者で一致することを確認している。他の材料定数は実験と同様な値を用いた。解析モデル立面図を図-3 に示す。各材料定数は実験で得られた数値を用いた。ただし、目地とグラウト材は考慮していない。アンボンド試験体では、梁の曲げ強度をボンド試験体の 0.8 倍した値 ⁵⁾とするため、鋼材の降伏強度を 0.8 倍として与えた。また、この際の最大曲げ強度計算値がボンド梁の 0.8 倍となっていることを確認した。

3.2 静的漸増解析結果

実験は主に X 方向の加振を行なったため、解析も X 方向の静的漸増解析を示す。最初に解析の外力分布は通常の設計で行なわれている A_i 分布を仮定して静的漸増解析を行った結果を図-4 に示す。この図には動の実験で得られた各層の荷重-変形関係の包絡線と解析結果を併せて示す。ボンド、アンボンドの両試験体とも 1 層では実験値に比べ解析値が小さく、2 層では両者は一致し、3 層では解析値が実験値より大きくなった。実験では A_i 分布のような外力分布とならなかったことが分かる。実験は動的であり、外力分布は絶えず変化しているが、最大応答時を参考に外力分布の比を上から 2 : 1.5 : 1 と仮定した場合の解析を行った。その結果を図-5 に示す。この外力分布比での解析値は A_i 分布の場合に比べ良好となり、各層とも実験値と概ね一致できた。

3.3 地震応答解析結果

解析モデルは、静的漸増解析と同じ線材モデルで解析を行なった。解析の履歴モデルは①剛性低減型 (武田 ⁶⁾) モデル、②逆行型 ⁷⁾の 2 種類を用いた。ここで、剛性低減型 (武田) モデルの除荷時の剛性低減指数を 0.2 とした。②逆行型では履歴ループによる減衰が期待できないため、減衰定数 h により

減衰を付加する。また解析では瞬間剛性比例減衰とした。入力地震波は実験で用いた New RC 波レベル 1, 2, 3 と鷹取波を用いて解析する。今回解析で用いた地震波の入力レベルは表-2 の網がけ部分で示し、解析ケースを表-3 に示す。なお、実験では地震波を小さい順番に試験体に加振していったが、解析では連続で地震波を入力する解析はせず、1 波毎で解析を行なった。最終の鷹取波では 2 方向入力を実施した。

解析は、表-3 に示すように①のモデルでは $h=1\sim3\%$ の間で組み合わせ、②のモデルでは $h=3\sim5\%$ の間を組み合わせ、ボンド試験体 6 ケース、アンボンド試験体 3 ケースの合計 9 ケースについて解析を行なった。アンボンド試験体ではボンド試験体以上に履歴ループが小さいため、降伏後比較的大きなループを描く①のモデルでの検討は行わない。ボンド、アンボンド試験体ともレベル 1 での最大強度時の変形が解析結果では実験結果より 20~40% 小さかったが、おおよそ一致した復元力の傾向を示す。

紙面の都合上、実験結果と一番近似になったボンド試験体のケース 5、アンボンド試験体のケース 8 についてレベル 1、レベル 2、レベル 3 加振の解析と実験の比較を図-6 示す。②の 3 折線逆行型モデルでは、他のケース (h の変化) の解析間の応答結果は大きくは異ならなかった。アンボンド試験体で剛性が高いのは、ボンドと同様な平面保持仮定状態のマルチスプリングを用いているため、過大評価となっていることが伺える。レベル 1 はひび割れ直後程度なので逆行型でもシミュレートできていることが分かる。レベル 2 でもボンド試験体では、解析結果は実験結果と概ね良好な対応を示している。アンボンド試験体ではレベル 2 で解析の応答変形角が 1, 3 層で急増した。レベル 3 でも最大強度近傍まで発散せず解析はできたが、ループ形状は乱れた結果となった。鷹取波での解析も行なったが、応答値が安定しなかった。逆行型の解析モデルでは、履歴減衰が無い場合入力が大きくなった場合、折曲点で変形角応答が急増することがあり、大変形では解析で追従できなくなる。

レベル 3、鷹取波加振のボンド試験体の①のモデルのケース 1 の解析と実験の結果を図-7 に示す。鷹取波では X 方向の結果を示す。図には無いが、ケース 1~3 間の応答結果は大きな差異は見られなかった。また、レベル 1、レベル 2 の応答結果は①逆行型モデルと大きく変わらなかった。レベル 3 入力では、剛性低減型の武田ループであるため、ループ面積が大きくなっている。最大の鷹取波入力では変形が解析では実験ほど大きくならず、また強度も発揮できなかった。履歴減衰の影響も大きいですが、実験ではそれまでの損傷の蓄積があるが解析はそれを考慮できていないためと考えられる。大変形時の地震応答解析については、今後の課題としたい。

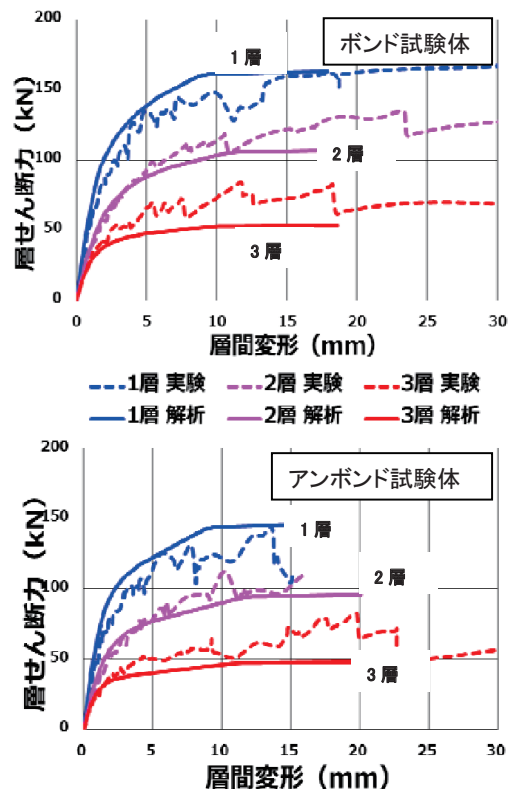


図-4 静的漸増解析 (Ai 分布)

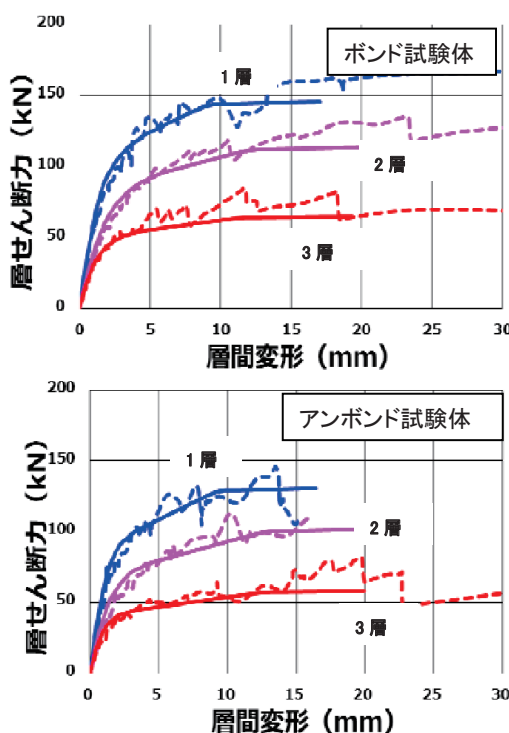


図-5 静的漸増解析 (2:1.5:1 分布)

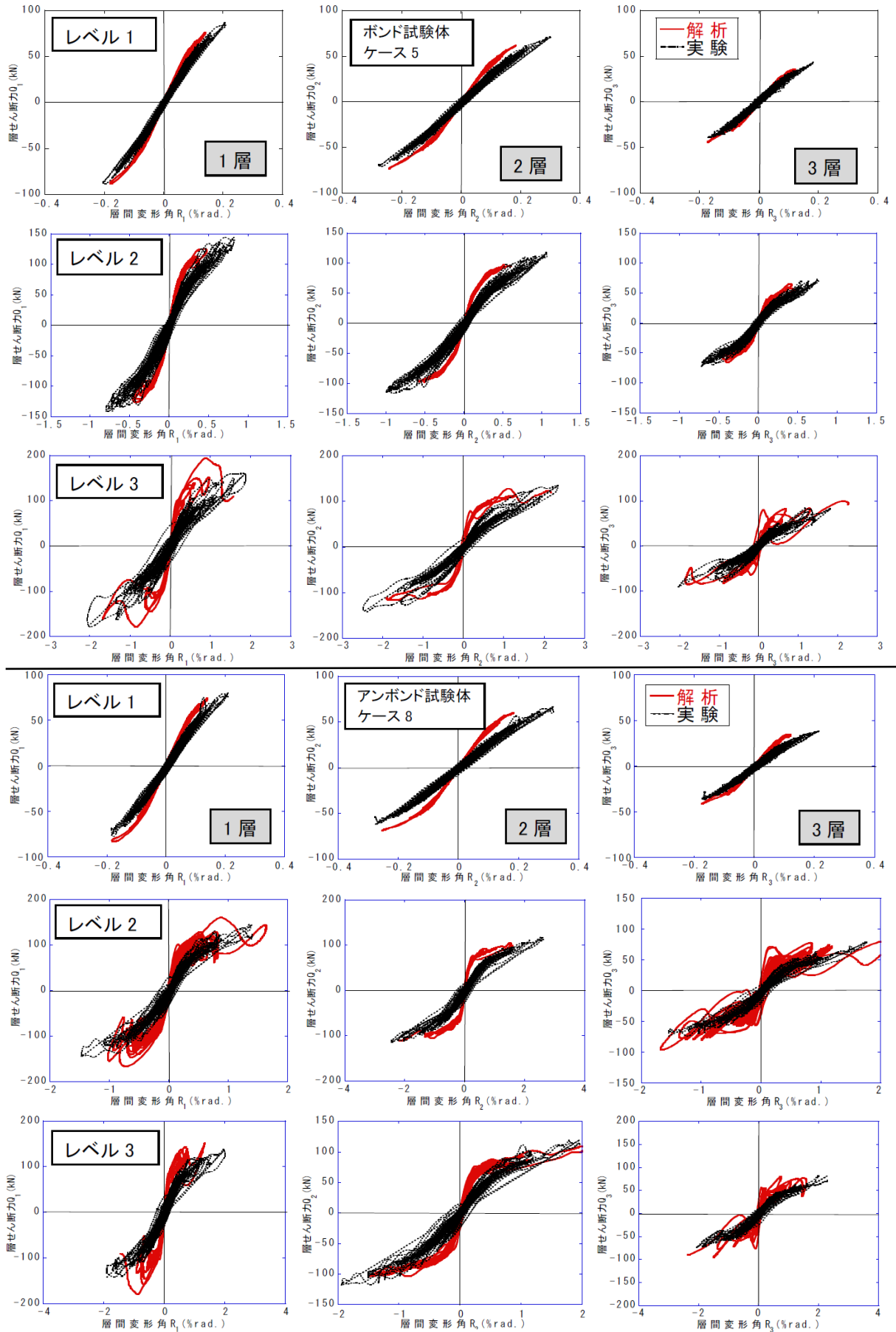


図-6 層せん断力—層間変形関係 (上: ケース5 ボンド, 下: ケース8 アンボンド レベル1~3)

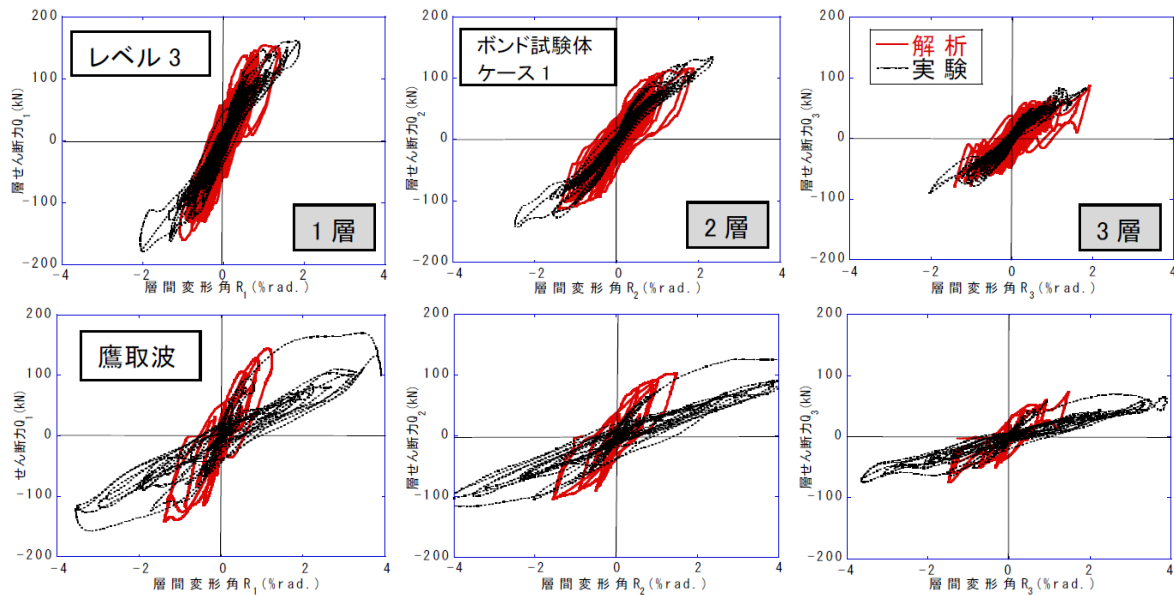


図-7 層せん断力—層間変形関係 (ケース1 ボンド レベル3&鷹取波)

4. まとめ

上記解析を行ない、以下の知見を得た。

- 1) A_i 分布を仮定した静的漸増解析と実験の包絡線との比較では、ボンド、アンボンド試験体とも 1 層では実験値に比べ解析値が小さく、2 層では両者は一致し、3 層では解析値が実験値より大きくなった。
- 2) A_i 分布の代わりに外力分布の比を 3, 2, 1 層を 2 : 1.5 : 1 と仮定した場合の静的漸増解析で実験結果の包絡線と概ね一致した。
- 3) 履歴ループを持たない 3 折線逆行型の履歴特性での解析は、NewRC 波レベル 2 まで概ねシミュレーションできた。アンボンド試験体では NewRC 波レベル 3 で解が安定しなくなった。
- 4) 剛性低減型の武田ループでは、変形量は小さいが NewRC 波レベル 3 まで概ねシミュレートできた。ただし、JR 鷹取波の実験結果は十分シミュレートできず、今後の課題である。

参考文献

- 1) 丸田誠, 浜田公也: プレキャスト・プレストレストコンクリート 3 層骨組の振動台実験: 日本建築学会構造系論文集 第 75 巻 第 648 号, pp.405-413 2010 年 2 月
- 2) 日本建築学会: プレストレストコンクリート設計・施工規準同解説, 1998
- 3) (財)国土開発技術センター: 建設省総合技術開発プロジェクト 鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発 平成 4 年度 New RC 研究開発概要報告書, 平成 5 年 3 月
- 4) SNAP Ver.6 テクニカルマニュアル 株式会社 構造システム
- 5) 是永健好, 岡本晴夫: アンボンド PC 部材の終局耐力算定式に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.945~pp.946, 2001.9
- 6) Takeda, T., Sozen, M.A. and Nielsen, N.N.: Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.96, No.ST12, pp.2557~pp.2573, 1970.12
- 7) (一社)長寿命建築システム普及推進協議会 設計分科会: アンボンド PC 圧着工法を用いた建物の試設計検討—限界耐力計算と時刻歴応答解析法—, プレストレストコンクリート, Vol.57, No.4, July-Aug, pp.82-pp.87, 2015