

論文 繰返し荷重を受ける PCaPC 部材における圧着力減退の予測

谷 昌典^{*1}・西山 峰広^{*2}・岸本 一蔵^{*3}

要旨：分割要素法に基づいた解析方法を用いて，PCaPC（プレキャストプレストレストコンクリート）柱部材における PC 鋼材張力減退に起因する圧着力低下の予測を行い，過去の実験結果を精度良く算定できることを示した。さらに，軸力比，プレストレス力比，付着の有無，及びコンクリート強度を設計パラメータとして解析を行い，それらが部材及び PC 鋼材挙動に及ぼす影響について検討を行った。

キーワード：プレストレストコンクリート，PC 鋼材張力，圧着力，プレキャスト，付着

1. はじめに

プレキャストプレストレストコンクリート（以下 PCaPC と略記）部材の接合に用いられる圧着工法では，部材に大きな変形が発生すると PC 鋼材降伏及びコンクリート圧壊により鋼材張力が大きく減退し，地震後の建物の安全性及び修復性に大きな影響を及ぼす可能性がある。この点を考えると PC 鋼材張力の正確な挙動予測が必要である。PC 鋼材張力に関する研究は，過去に梁柱ト型接合部を対象とした研究¹⁾は行われているが，柱部材を対象としたものはほとんどない。

そこで本論文では，文献²⁾で発表した解析方法を用い，PCaPC 柱部材の PC 鋼材張力減退に関して検討を行う。張力減退の要因を明らかにするとともに，張力減退が部材の修復性に与える影響についても検討を行った。

2. 解析概要

2.1 解析モデル

本論文では，文献²⁾で発表した分割要素法に基づいて解析を行う。以下にモデル化の手法及び各材料特性について説明する。

本論文で使用する解析方法は，図-1 に示すように各部材を部材せい方向及び材軸方向にそれぞれ分割して剛性マトリックスを誘導する分割要素法に基づいている。図-2 に本解析で使用するモデル形状及び要素分割の概要を示す。なお，断面せい方向の分割数は 100 である。

コンクリートの応力ひずみ履歴は，その包絡線を NewRC 式³⁾により定め，繰返しルールを Watanabe らによって提案されたモデル⁴⁾とした。普通鉄筋は，Ramberg-Osgood 式に基づきパウジンガー効果を考慮した履歴モデル⁵⁾を，PC 鋼材は，Menegotto-Pinto 式に基づく履歴モデル⁶⁾を用いた。付着-すべり関係には，森田・角モデル⁷⁾を用い，PC 鋼材とコンクリート間の付着強度に，森田の研究⁸⁾で示される丸鋼とコンクリート間

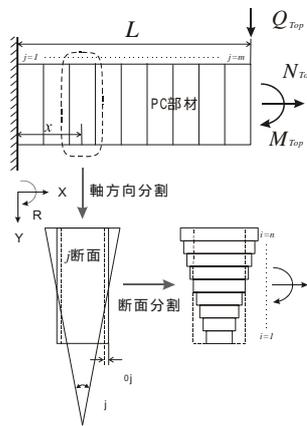


図-1 要素分割方法

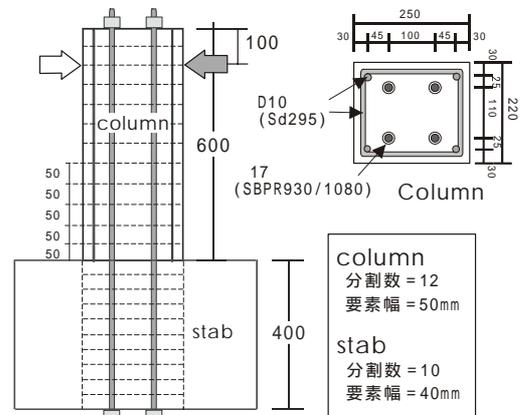


図-2 モデル形状と要素分割の概略

*1 京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻 博士課程 工修 (正会員)

*2 京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻 助教授 工博 (正会員)

*3 大阪大学大学院 工学研究科建築工学専攻 講師 工博 (正会員)

の付着強度 ($\gamma=2.91 \text{ N/mm}^2$) を用いた。

2.2 解析時の載荷履歴

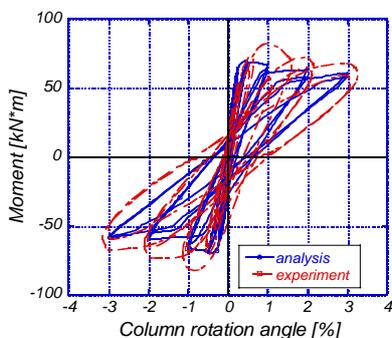
載荷は、各モデル所定のプレストレス力と軸力を加えた後、水平力を加えることによって行う。柱部材回転角で制御し、履歴は以下の部材回転角で各サイクル正負 2 回の繰返しを行う：0.25%、0.5%、1.0%、2.0%及び 3.0%。

3. 実験結果との比較

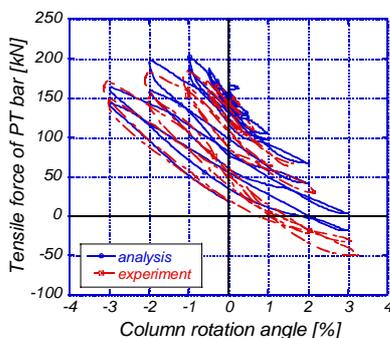
過去に行われたプレキャスト柱基礎圧着部材への載荷実験⁹⁾に本解析法を適用し、比較検討を行う。文献²⁾では、荷重-変形関係など部材全体の挙動を追跡できることが示されたが、本論文ではより詳細な検討を行うため、PC 鋼材張力に着目して実験と解析結果の比較を行う。

対象試験体（試験体名 *b2*、付着あり、軸力比 0.2、プレストレス力比 $P_e/f_c A_g=0.3$ ）の実験結果と解析結果の比較として、モーメント-部材回転角関係を図-3(a)に、PC 鋼材張力-部材回転角関係を図-3(b)に示す。図-3より、荷重-変形関係及び PC 鋼材の挙動を精度よく予測できていることが分かる。

なお、文献¹⁰⁾において、実験結果を精度良く追跡するには、柱部材では横補強筋によるコンクリート拘束効果の影響を文献³⁾で提案されているものより大きく算定する必要があるとされており、本論文でも前報²⁾と同様に NewRC 式における拘束効果の強度上昇係数 η を 4 として解析を行った。



(a) モーメント-部材回転角関係



(b) PC 鋼材張力-部材回転角関係

図-3 実験結果と解析結果の比較

4. パラメトリックスタディ

4.1 パラメータ及びモデル名称

柱部材設計を行う際に、部材断面に作用させる軸力比+プレストレス力比 (η_{N+P}) 及びプレストレス力比 (η_P) の設定に関する明確な基準は現在存在しない。そこで、これらの値を変化させて解析を行い、それぞれの値が部材挙動に及ぼす影響を検討する。なお、 η_{N+P} 及び η_P 以外に、付着の有無、コンクリート強度 (f_c) もパラメータとした。それぞれのパラメータを表-1に示す。各解析モデルの名称は図-4に示す方法による。

η_{N+P} は、長期許容応力度 $1/3f_c$ に対応した 0.33、地震力等による外乱時における軸力の増加を想定して短期許容応力度 $2/3f_c$ に対応した 0.67、その中間値 $1/2f_c$ に対応した 0.5 を用いる。また、有効プレストレス力が PC 鋼材降伏応力の 68% に相当するように、各モデルの PC 鋼材量を設定した。

また、本論文では、建築学会耐震性能評価指針の修復限界状態 及び終局限界状態に相当するものとして、部材回転角 1% 及び 2% 時のデータについて検討を行うものとする。

4.2 解析結果と考察

圧着工法において、PC 鋼材張力は部材の剛性や耐力を決定する大きな要因であり、地震時に発生する PC 鋼材張力の減退を把握することは非常に重要である。そこで、得られた解析結果や各パラメータとの関係から PC 鋼材張力減退

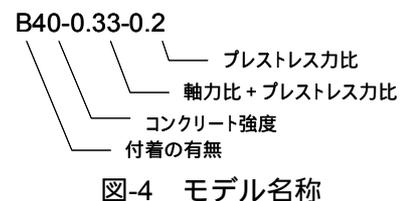


図-4 モデル名称

表-1 解析パラメータ

γ (N/mm ²)	0(Unbond), 2.91(Bond)
f_c (N/mm ²)	40, 60
η_{N+P}	0.33, 0.5, 0.67
η_P	0.1, 0.2, 0.3

の要因について検討を行い、張力減退のメカニズムを解明すると共に、PC 鋼材張力の減退が地震後の建物の修復性を示す指標である残留変形及び残存耐力に、どのような影響を及ぼすのかについても検討を行った。

各モデルの PC 鋼材降伏時の変形サイクル、1%及び2%変形後のコンクリート軸方向残留ひずみ、プレストレス残存比及び残留変形を表-2及び表-3に示す。なお、コンクリート軸方向残留ひずみは、圧着面中央位置のコンクリート要素の材軸方向ひずみ量により求めている。

(1) PC 鋼材張力減退要因について

PC 鋼材張力減退の要因としては、PC 鋼材が降伏することによる減退（PC 鋼材降伏先行型）と、コンクリートの軸圧縮ひずみが進行することによる減退（コンクリート圧壊先行型）の2種類が考えられる。そこで、PC 鋼材及び圧着面中央位置コンクリート要素の挙動と各パラメー

タとの関係を検証し、PC 鋼材張力減退の要因に関する考察を行う。

・ PC 鋼材及びコンクリートの挙動

表-2及び表-3より、PC 鋼材の降伏が発生したのは $N_{+P}=0.33$ のボンドモデルのみで、他のモデルでは部材回転角 3%まで PC 鋼材は弾性範囲で挙動した。また、コンクリート軸ひずみの進行は N_{+P} によって大きく異なることが分かる。コンクリート強度 60N/mm^2 、ボンドモデルを例に、軸ひずみの進行が最も顕著な B60-0.67-0.1 モデルと、最も進行が遅い B60-0.33-0.3 モデルの解析結果を比較したものを図-5に示す。表-2、表-3及び図-5が示す通り、B60-0.33-0.3では軸ひずみがほとんど進行しないのに対して、B60-0.67-0.1では、部材変形角 1%から軸ひずみが大きく増加している。

・ PC 鋼材張力減退メカニズム

前述の結果から、 N_{+P} が小さい場合は、軸力やプレストレス力による軸ひずみの進行が緩やかであるため、コンクリートが圧壊する前に PC 鋼材が降伏してしまう。 N_{+P} が大きい場合では、PC 鋼材の降伏は発生しないものの、早い段階でコンクリート合力が最大に達し、その後軸力を支えきれなくなって軸方向ひずみが急速に進行し、PC 鋼材張力の減退に繋がるものと考えられる。

具体的には、 $N_{+P}=0.33$ の場合、PC 鋼材の降伏は発生するものの、プレストレス残存比は1%変形後で約 80~90%、

表-2 解析結果（付着あり）

モデルNo.	PC鋼材降伏時 サイクル	コンクリート 軸方向残留ひずみ		プレストレス 残存比		残留変形角 (%)	
		1%時	2%時	1%時	2%時	1%時	2%時
B60-0.33-0.1	2%1回目	0.0031	0.0121	0.762	0.357	0.07	0.23
B60-0.33-0.2	2%1回目	0.0030	0.0091	0.829	0.536	0.06	0.17
B60-0.33-0.3	2%1回目	0.0027	0.0077	0.845	0.602	0.06	0.16
B60-0.5-0.1	降伏せず	0.0235	0.0999	0.188	-0.816	0.34	0.79
B60-0.5-0.2		0.0166	0.0629	0.461	-0.110	0.25	0.44
B60-0.5-0.3		0.0131	0.0456	0.590	0.187	0.19	0.34
B60-0.67-0.1	降伏せず	0.1179	0.2799	-1.238	-1.382	0.66	1.35
B60-0.67-0.2		0.0668	0.1152	-0.367	-0.903	0.49	0.52
B60-0.67-0.3		0.0500	0.0838	-0.003	-0.374	0.39	0.41
B40-0.33-0.1	1%1回目	0.0021	0.0043	0.636	0.286	0.05	0.09
B40-0.33-0.2	2%1回目	0.0021	0.0034	0.750	0.485	0.05	0.05
B40-0.33-0.3	2%1回目	0.0019	0.0028	0.803	0.489	0.05	0.08
B40-0.5-0.1	降伏せず	0.0092	0.0468	0.537	-0.106	0.15	0.56
B40-0.5-0.2		0.0073	0.0329	0.648	0.221	0.12	0.39
B40-0.5-0.3		0.0068	0.0284	0.720	0.406	0.10	0.37
B40-0.67-0.1	降伏せず	0.0436	0.1268	-0.261	-1.272	0.49	0.90
B40-0.67-0.2		0.0298	0.0786	0.141	-0.449	0.33	0.56
B40-0.67-0.3		0.0233	0.0595	0.340	-0.073	0.27	0.43

表-3 解析結果（付着なし）

モデルNo.	PC鋼材降伏時 サイクル	コンクリート 軸方向残留ひずみ		プレストレス 残存比		残留変形角 (%)	
		1%時	2%時	1%時	2%時	1%時	2%時
U60-0.33-0.1	降伏せず	0.0031	0.0153	0.848	0.646	0.06	0.29
U60-0.33-0.2		0.0030	0.0130	0.876	0.705	0.06	0.21
U60-0.33-0.3		0.0030	0.0116	0.902	0.753	0.06	0.20
U60-0.5-0.1	降伏せず	0.0286	0.1079	0.443	-0.661	0.40	0.69
U60-0.5-0.2		0.0206	0.0675	0.585	-0.079	0.27	0.43
U60-0.5-0.3		0.0173	0.0504	0.660	0.189	0.24	0.33
U60-0.67-0.1	降伏せず	0.1414	0.3164	-1.128	-1.362	0.69	1.52
U60-0.67-0.2		0.0813	0.1222	-0.293	-0.847	0.44	0.45
U60-0.67-0.3		0.0594	0.0867	0.045	-0.346	0.37	0.29
U40-0.33-0.1	降伏せず	0.0022	0.0058	0.869	0.777	0.05	0.12
U40-0.33-0.2		0.0022	0.0054	0.892	0.804	0.05	0.10
U40-0.33-0.3		0.0022	0.0053	0.913	0.824	0.05	0.11
U40-0.5-0.1	降伏せず	0.0099	0.0508	0.715	0.120	0.16	0.53
U40-0.5-0.2		0.0083	0.0365	0.763	0.348	0.13	0.37
U40-0.5-0.3		0.0076	0.0295	0.797	0.471	0.12	0.29
U40-0.67-0.1	降伏せず	0.0531	0.1456	0.061	-1.144	0.57	0.82
U40-0.67-0.2		0.0377	0.0885	0.308	-0.409	0.39	0.44
U40-0.67-0.3		0.0289	0.0636	0.459	-0.037	0.29	0.32

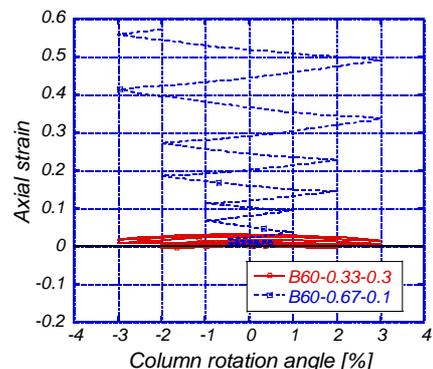


図-5 コンクリート軸方向ひずみの進行

2%変形後でも30~70%と高い。また、 $N_{+P}=0.5$ の場合では、PC鋼材の降伏も発生せず、プレストレス残存比(= P/P_{ini})も1%変形後で約20%~80%であるが、2%変形後にはプレストレス力が消失してしまうものもあった。そして $N_{+P}=0.67$ の場合には、ほとんどのモデルでプレストレス力が消失している。このことから、PC鋼材が降伏してもプレストレス力の大きな減退は発生せず、高い軸力とプレストレス力によるコンクリート軸ひずみの急速な進行が、大きなプレストレス力減退の原因になっていると考えられる。

・導入力率

本論文のここまでの解析においては、PC鋼材降伏耐力の68%を有効プレストレス力として導入するものとしてPC鋼材量を決定していたが、有効プレストレスの鋼材降伏応力に対する比を小さく抑えれば、PC鋼材を降伏しにくくすることが可能である。

そこで、有効プレストレス時に鋼材に導入されている応力の鋼材降伏応力に対する比を導入力率(= p_e/p_y)と定義する。PC鋼材降伏が発生したB60-0.33-0.2を例に、導入力率を50%として解析を行い、得られた部材回転角-PC鋼材張力関係を図-6に示す。図-6に示す通り、導入力率を50%に下げることによってPC鋼材降伏は発生しなくなる。また、変形が0に戻った時の鋼材張力はほぼ同じ値であるが、張力の変動幅が大きくなっている。これは、鋼材断面積を増加することにより、同じ変形ではPC鋼材張力が引張側では大きく、圧縮側では小さくなる。よって、

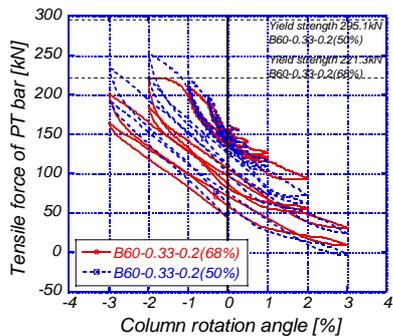


図-6 導入力率によるPC鋼材張力比較

導入力率引き下げはPC鋼材降伏を防ぐ点では有効な手段であると言えるが、張力の変動幅が大きくなることに注意しなければならない。

(2) 残留変形

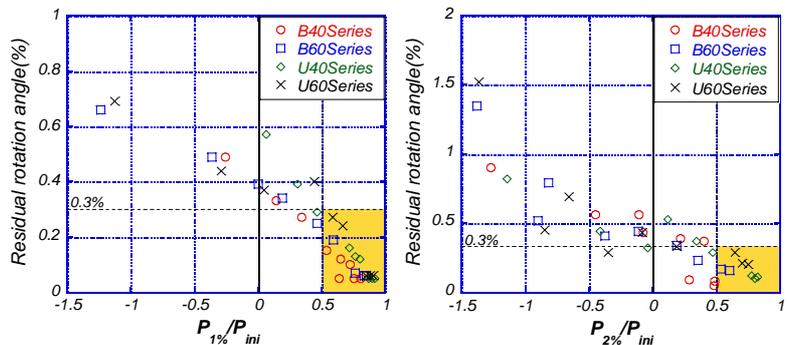
地震後の残留変形は、建物の地震後の修復性を測る上で重要な指標であり、残存するPC鋼材張力が大きな影響を与えられられる。

1%及び2%サイクル終了後の残留変形及びプレストレス残存比をそれぞれ縦軸及び横軸にとり、各モデルの解析結果をプロットしたものを図-7に示す。図-7に示す通り、プレストレス残存比が高い程、残留変形は小さくなる。1%及び2%サイクル終了時にPC鋼材張力が載荷前の有効プレストレス力の半分以上残存していれば(プレストレス残存比>0.5)、残留変形は部材回転角0.3%以下に抑えられることが分かった。従って、変形後も高いPC鋼材張力を確保できれば、残留変形を小さくすることができ、地震後の修復性向上を図ることが可能となる。

(3) 残存耐力

損傷を受けた後に保有している残存耐力も、建物の地震後の修復性を測る指標として非常に重要である。そこで、修復限界状態相当の変形を受けた部材が、その後終局限界状態相当の変形において保有する耐力に関して検討を行う。

横軸に“1%サイクル終了時のプレストレス残存比”を、縦軸に“2%変形時耐力の最大耐力に対する比(2%耐力残存比)”をとり、図-8に示す。図-8より、2%変形時に最大耐力の80%が残存するためには、1%サイクル終了時にPC鋼材



(a) 1%サイクル後

(b) 2%サイクル後

図-7 残留変形-プレストレス残存比関係

張力が70%以上残存(プレストレス残存比>0.7)していなければならないことが分かる。ただし、本解析においてはPC鋼材の定着端を固定(抜出し剛性を無限大)として扱っており、大変形時には圧縮側に配置されたPC鋼材が圧縮材として働くことにより耐力上昇が生じている場合もある。ボンドモデルでは付着による応力伝達でPC鋼材が圧縮力を負担することも考えられるが、アンボンドモデルではPC鋼材が圧縮力を負担することはなく、定着端での状況に応じて端部の境界条件を見直す必要がある。

また、地震時には外柱に作用する軸力の増加が想定されるため、軸力の増加が残存耐力に与える影響についても検討を行う。コンクリート強度 60N/mm^2 のモデルを例に、 p についての耐力残存比-プレストレス残存比関係を図-9に示す。

図-9より、常時荷重を想定した $N_{+P}=0.33$ ではプレストレス力比に関係なく最大耐力の約90%程度を保有しているが、地震時の軸力増加を想定した $N_{+P}=0.5$ 及び 0.67 では耐力が大きく低下している。特に、 $p=0.1$ のモデルでは、 N_{+P}

が 0.33 から 0.67 に増加することによって、残存耐力が最大

耐力の40%以下となり、 $p=0.2$ 及び 0.3 のモデルでも、60~70%程度にまで低下した。同じプレストレス力で軸力が増加した場合、コンクリートの軸ひずみが増大し、その結果としてプレストレス力の減退が大きくなり残存耐力が低下するものと考えられる。このことから、地震時に軸力の増加が想定される外柱では、残存耐力が大幅に低下する可能性があり、特に注意が必要である。

次に、変形の増大によって耐力が低下する要因に関する検討も行う。主な要因としては、PC鋼材降伏及びコンクリート圧壊が考えられ、PC鋼材の降伏が発生した B60-0.33-0.2 を例に検討を行う。B60-0.33-0.2 の最大強度時(0.385%)、1%、2%及び3%変形時の圧着面コンクリート応力分布を図-10に示す。また、表-4にそれぞれの変形時に対応する耐力、コンクリート合力、合力作用位置(材軸からの距離)、コンクリート負担モーメント及びPC鋼材張力を示す。表-4に示すとおり、コンクリート合力は1%時に最大となるが、中立軸の低下によりコンクリート合力作用位置も下がり、コンクリートが負担するモーメントは最大強度時から単調に減少する。PC鋼材は2%サイクル時で一旦降伏ひずみに達するが、3%サイクル時にはコンクリート軸圧縮ひずみの進行により再び降伏応力に達することはな

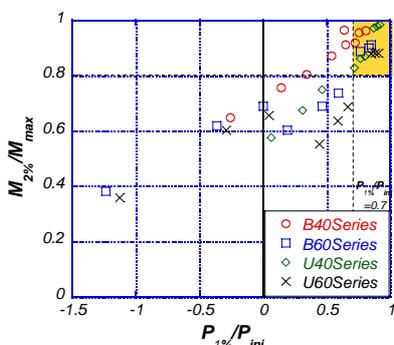


図-8 PC鋼材張力残存比と残存耐力比の関係

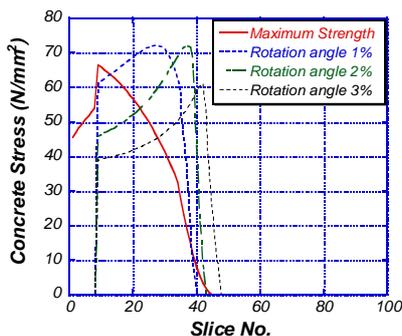


図-10 コンクリート応力分布

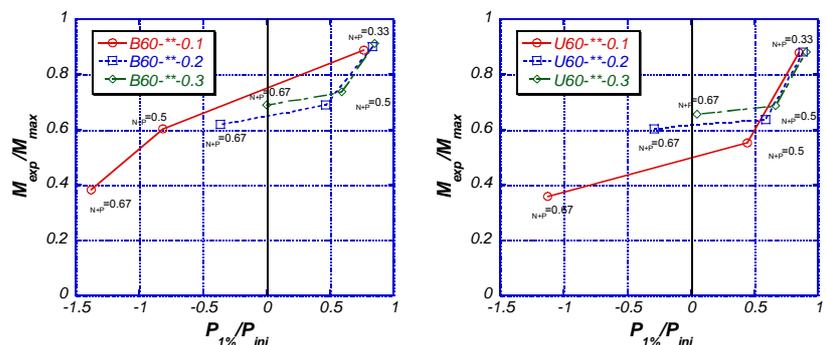


図-9 p 毎に比較

表-4 変形時の各合力

	最大耐力 (kN・m)	コンクリート合力 (kN)	コンクリート合力作用位置 (mm)	コンクリート負担モーメント (kN・m)	圧縮側PC張力 (kN)	引張側PC張力 (kN)	PC鋼材負担モーメント (kN・m)
最大強度	82.5	1039.4	80.3	83.5	143.3	185.0	2.1
1%	77.0	1058.4	67.5	71.4	126.2	211.0	4.2
2%	74.2	1018.6	60.2	61.3	93.5	220.2	6.3
3%	71.8	937.3	54.6	51.2	30.8	208.4	8.9

く、大変形時でも PC 鋼材側には耐力的に余裕がある。軸力が増加すれば、コンクリート軸圧縮ひずみの進行はさらに大きくなるため、PC 鋼材張力は大きく減退し、PC 鋼材はさらに降伏しにくくなる。また、PC 鋼材が負担するモーメントは、コンクリート負担分と比較して小さいことから、コンクリートの圧壊により負担可能なモーメントが低下することが、部材の耐力低下に大きく影響している。

5. まとめ

本研究によって以下の結果を得た。

- ・ PC 鋼材の付着を考慮した解析により、PC 鋼材張力の履歴を精度よく予測することができた。
- ・ N_{+P} が小さい場合には PC 鋼材降伏の発生が確認されたが、PC 鋼材張力の減退は小さい。逆に、 N_{+P} が大きい場合には、コンクリート軸ひずみの急速な進行に伴って、PC 鋼材張力の減退が急激に進行し、PC 鋼材の降伏は発生しない。
- ・ コンクリート軸圧縮ひずみは、 N_{+P} が 0.33 ではほとんど進行しないのに対して、0.67 では部材回転角 1%時から大きく増加する。
- ・ 導入力率の低減は、PC 鋼材降伏の発生防止に有効であるが、張力の変動幅が大きくなる。
- ・ 1%及び2%サイクル終了時に PC 鋼材張力が有効プレストレス力の半分以上残存していれば、残留変形は 0.3%以下になる。
- ・ 部材回転角 2%時に最大耐力の 80%が残存しているためには、部材回転角 1%サイクル終了時に PC 鋼材張力が有効プレストレス力の 70%以上残存している必要がある。

参考文献

- 1) 足立将人, 西山峰広: 緊張材の付着特性を考

慮したプレレストコンクリート圧着骨組の曲げ挙動に関する解析研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 532 号, pp.161-168, 2000.6

- 2) 前田博司, 岸本一蔵, 西山峰広: PC 鋼材の付着すべりを考慮したプレキャスト PC 部材の履歴挙動解析法, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.709-714, 2004
- 3) 崎野健治: 直線型横補強材により拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, 第 461 号, pp.95-104, 1994.7
- 4) F.Watanabe, J.Y.Lee, M.Nishiyama: Structural Performance of Reinforced Concrete Columns with Different Grade Longitudinal Bars, ACI Structural Journal, vol.92, No.4, pp.412-418, 1995.7-8
- 5) 田川浩之, 西山峰広: PC 鋼棒の応力度-ひずみ度関係のモデル化, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.885-886, 1997.9
- 6) 榎本秀文: PRC 梁の履歴性質に関する解析的性質, 大阪大学大学院修士論文, 1981
- 7) 森田司郎, 角徹三: 繰返し荷重下における鉄筋とコンクリート間の付着特性に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 第 229 号, 1975.3
- 8) 森田司郎: 鉄筋コンクリートにおける付着とひびわれに関する研究, 京都大学大学院博士論文, pp.55, 1968
- 9) 稲田剛知, 西山峰広: アンボンド PC 圧着柱の耐震性能, プレレストコンクリート技術協会第 13 回シンポジウム論文集, pp.79-84, 2004.10
- 10) 河野進他: 軸力と 2 方向曲げを受ける実大 RC 柱の損傷評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, 2002