

繰返し载荷における PC 鋼材とコンクリートとの付着特性

コンクリート研究室 石田 智伸
 指導教官 丸山 久一
 下村 匠

要旨：プレストレストコンクリートの耐震性能には、PC 鋼材とコンクリートとの付着特性が大きく影響している。現状では、柱やはり部材の実験で履歴特性を確認しているが、有限要素解析等を用いるためには、荷重履歴における付着の構成則を確立する必要がある。

本研究では、プレストレストコンクリートの付着特性に関する構成則を求めるために、まず、引張部材の一軸繰返し载荷実験を行い、荷重 - 変位関係を確認した後、その関係を表現する解析モデル（付着構成則）を検討し、一般の部材に適用して、履歴特性を検討するものである。

キーワード：付着応力、プレストレストコンクリート、繰返し载荷

1. はじめに

プレストレストコンクリート部材（PC 部材）の復元力特性は、エネルギー吸収能力において鉄筋コンクリート部材（RC 部材）のそれより劣るが、除荷後の残留変位は小さくなり、耐震性能においては有利な面も有している¹⁾。PC 部材の耐震性能については縮小モデルを用いて、実験的に検討がなされ²⁾、部材レベルで復元力特性のモデル化もなされている³⁾。しかし、より一般的な有限要素解析では、材料の構成則に加えて、PC 鋼材とコンクリートとの付着に関する構成則、すなわち、付着応力 - 相対変位関係あるいはすべり特性をモデル化する必要がある。これまでのモデルは、ほとんどが RC 部材に適用するものであって、PC 部材に適用できるモデルは十分でない⁴⁾。さらに、荷重の繰返しの影響を考慮したモデルは RC 部材に関するものでも少なく^{5,6)}、PC 部材の耐震性能を解析的に照査する場合には、荷重の繰返しを受ける場合の付着特性を明らかにする必要がある。そ

こで、本研究では、実験を基に、大変形繰返し荷重を受ける PC 部材の付着特性を検討することを目的とした。

2. PC 部材の一軸繰返し引張試験

2.1 供試体概要

供試体の一覧を表 1 に示す。供試体は a-1, b-1 の 2 体である。コンクリートの圧縮強度は、40MPa を目標値とした。鉄筋比はコンクリート断面積に対する PC 鋼材の面積を示し、各プレストレス量はコンクリートの有効プレストレスを示している。供試体の寸法を図 1 に示す。各供試体とも、断面寸法 150mm × 150mm の正方形断面で、長さ 1800mm である。また、供試体断面中央に 32mm のシースを通して、プレストレスは、コンクリートの硬化後、シースに PC 鋼棒（B 種 1 号，SBPR930/1080）を通して、ポストテンション方式で与えた。プレストレス量は、a-1 供試体の PC 鋼材は規格降

表 1 供試体条件

供試体名	a-1	b-1
圧縮強度(MPa)	40	40
鉄筋比(%)	1.0	1.0
プレストレス量(MPa)	7.5	3.0



図 1 供試体寸法

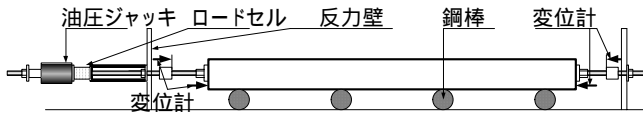


図 2 荷重装置

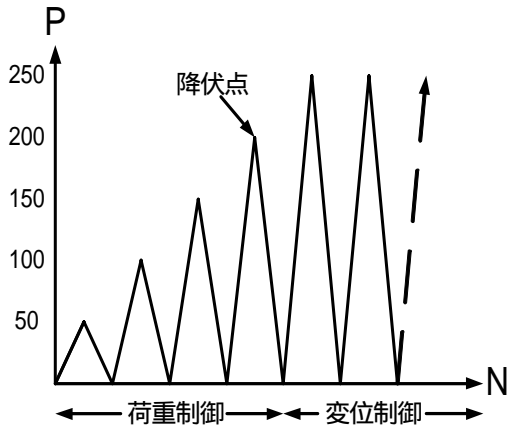


図 3 荷重ステップ

伏強度の約 64% ,b-1 供試体は 32%の引張力である。その後、シースにグラウトを注入し PC 鋼材とシースとの付着を確保した。

供試体は水平かつ、反力フレームと反力フレームの中央に設置し、反力フレームに設置した加力ジャッキによって引張力を与え、荷重試験を行った。図 2 に荷重装置を示す。

2.2 荷重条件

(1) 荷重ステップ

荷重ステップは、引張荷重が 50, 100, 150, 200kN の時にそれぞれ除荷、再荷重を行った。降伏後は PC 鋼材のひずみが約 1000 μ ごとに除荷、再荷重を行い、荷重ステップを図 3 に示す。

(2) 荷重制御方法

PC 鋼材が降伏するまでは荷重制御とし、0.5kN ごとに荷重の計測を行った。PC 鋼材が降伏した後はひずみ制御とし、ひずみがおよそ 500 μ 増加するごとに荷重の計測を行った。

2.3 計測方法

軸方向引張力はロードセルで計測した。また、変位計を図 2 に示すように設置し、コンクリートの変位およびコンクリートと鋼材の相対変位を測定した。PC 鋼材のひずみは、図 1 に示すような位置で計測した。ひずみゲージによ

表 2 コンクリートとグラウトの材料特性

コンクリート		
供試体名	a-1	b-1
圧縮強度(MPa)	54.8	54.7
弾性係数($\times 10^4$ MPa)	4.27	4.46
グラウト		
圧縮強度(MPa)	52.7	51.2
弾性係数($\times 10^4$ MPa)	1.94	1.81

表 3 鋼材の材料特性

鋼材種類	B種1号	17
降伏強度(MPa)	930以上	
引張強度(MPa)	1140以上	
弾性係数($\times 10^5$ MPa)	2.00	
公称断面積(mm ²)	227	
降伏ひずみ(μ)	5350	

る付着劣化の影響をできるだけ小さくし、かつ、鋼材のひずみ分布をより正確に求めるために、ひずみゲージの数を減らす工夫をした。コンクリートのひずみは、コンクリート表面に貼付したひずみゲージにより計測した。ひずみゲージの位置は、鋼材に貼付したひずみゲージの位置と対応するようにしている。

2.4 使用材料

(1) コンクリート

セメントには早強ポルトランドセメントを、粗骨材には 20mm の砕石を使用した。

また、荷重試験日に行ったコンクリート圧縮試験の結果から、各供試体のコンクリート材料特性を表 2 に示す。

(2) PC 鋼材

PC 鋼材の材料特性を表 3 に示す。PC 鋼材の降伏強度、引張強度は試験値である。

(3) グラウト

シース内部に注入したグラウトは、セメントには普通ポルトランドセメント、混和材としてグラウト用無収縮セメントを使用した。

また、荷重試験日に行ったグラウト圧縮試験の結果から、各供試体のグラウト材料特性を表 2 に示す。

3. 試験結果および考察

3.1 PC 鋼材の荷重 ひずみ曲線

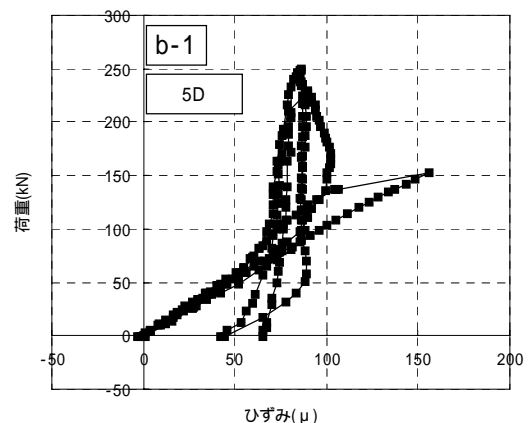
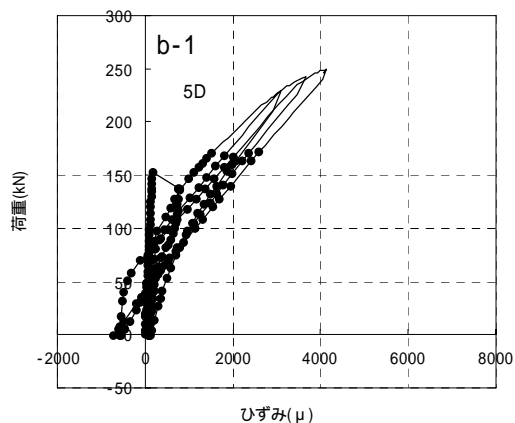
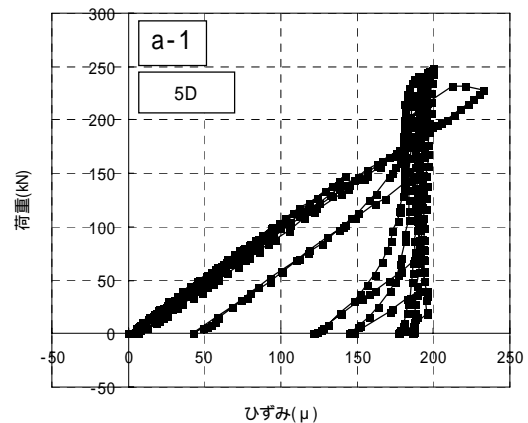
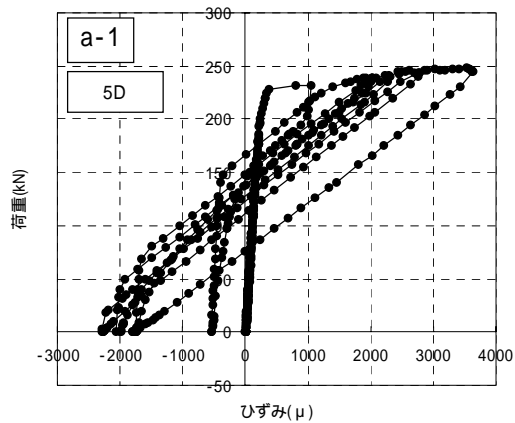


図 4 PC 鋼材荷重 ひずみ曲線

図 5 コンクリート荷重 ひずみ曲線

a-1 および b-1 供試体における PC 鋼材の荷重 - ひずみ曲線を図 - 4 に示す。ひずみの計測位置は、供試体中央から 5D 離れた位置である。この図より、供試体に加えた引張力が導入プレストレスより小さい範囲内では弾性挙動を示し、引張力が導入プレストレスを超えても、PC 鋼材が降伏するまでは、ひずみは線形で増加することが認められる。PC 鋼材降伏後除荷時で、最初の载荷サイクルにおいてのみコンクリートと PC 鋼材の付着の影響が認められるが、繰返しが 2 回目以降では、付着の影響はほとんど認められない。また、降伏後除荷時に、PC 鋼材のひずみが初期プレストレス導入時よりも小さくなり、プレストレス導入量が減少していることが認められた。

このことから、引張力が導入プレストレス力を超えるまではコンクリートと PC 鋼材はほぼ一体化して挙動し、PC 鋼材降伏後の大変形繰

り返しにより、付着の影響が認められなくなると考えられる。

3.2 コンクリートの荷重 ひずみ曲線

a-1 および b-1 供試体におけるコンクリート表面の荷重 - ひずみ曲線を図 - 5 に示す。

この図より、PC 鋼材が弾性範囲内でも、導入プレストレス内で繰返しが行われている時は、ひずみは線形的に変化する。初降伏時に限り、導入プレストレスが解除された後も、PC 鋼材に付随した引張挙動を示すが、途中で付着が切れ、引張前の位置に戻る現象が見られる。この後、繰返し载荷を行っても、導入プレストレスが解除されてからはコンクリートのひずみに変化がなく、付着による変形がないということが認められる。

除荷時は、コンクリートにプレストレスが再導入されるまでひずみに変化はなく、プレスト

レスが再導入されると、ひずみに変化が生じる。

4. 一軸繰返し引張試験のモデル化

4.1 ひずみ

本解析では、PC 部材の一軸引張時の挙動と付着の関係を明らかにすることにより、実構造物での繰返し载荷によるプレストレスロスや、変形挙動を評価できるものと考えた。ここでは、PC 鋼材のひずみに着目して解析を行った。

考えを簡略化するためにアンボンドの状態の PC 鋼材とコンクリートを考える。その後付着を考慮したモデルを作成した。また、付着を考慮する状態で、付着の程度を表現する方法として付着係数 α を導入した。基本的な考えとして、図 6 に示すように付着の強弱を PC 鋼材の変位差として考えた。アンボンド状態の場合、変形量は、付着のあるものと比べ変形量の差が大きくなり、これをひずみに置き換えると、アンボンドのひずみ量に比べ、付着がある場合はひずみ量も減少する。ここで、付着を考慮した場合は付着、すべりの影響を全て含んでいることから、実際のひずみ分布を平均化したものと考えることができる。よって、 α は供試体全域の付着状態、PC 鋼材の変形量を平均化したものと考えることができる。

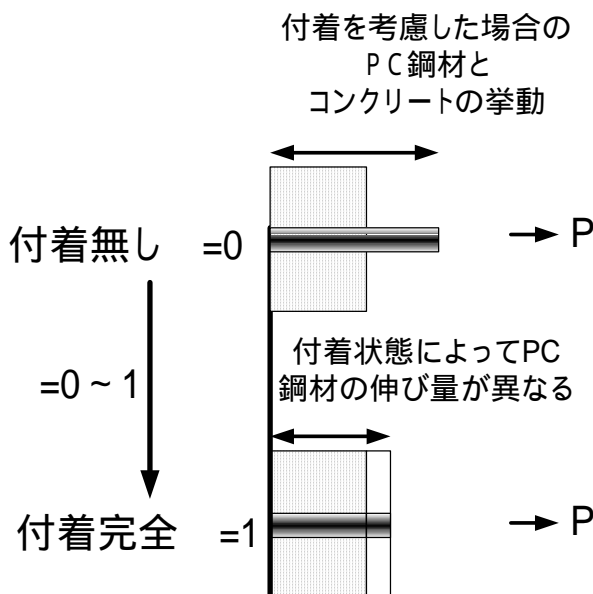


図 6 付着係数によるひずみの影響

4.2 プレストレス力

PC 鋼材に、塑性ひずみ領域が生じると、除荷後、鋼材端部がコンクリート端に再接触した後は、初期導入プレストレスよりも再導入されるプレストレスが減少するという現象がみられる。これは、塑性ひずみにより PC 鋼材の長さが長くなったためと考えられる。ここから、塑性ひずみ量 $\Delta\delta_{pl} = \int_0^l (\varepsilon_{pl} - \varepsilon) dx$ (ε : PC 鋼材の塑性前のひずみ量, ε_{pl} : PC 鋼材の塑性後のひずみ量) が発生する。このひずみ量から減少するプレストレス量 $P_{loss} = \Delta\delta_{pl} A_s E_s$ が決定し、再導入プレストレス量は $P_s^* = P - P_{loss}$ になる。

また、これから再導入されるプレストレスひずみ

$$\varepsilon_c^* = \frac{P_s^*}{(A_s E_s + A_c E_c)}$$

が決定される。

4.3 コンクリートひずみ

図 7 に示す、本研究実験結果のコンクリートの応力 ひずみ関係から、これからモデル化する付着状態を検討する。このコンクリート応力 ひずみ関係は PC 鋼材の平均ひずみから算出しており、すべり、付着の影響を含んでいる。また、ひずみ、応力ともゼロ値は、プレストレスが導入される前の値である。

コンクリートに導入されたプレストレスを超える引張荷重が作用すると、まだ付着が十分な場合、コンクリートに引張応力が発生する。

そして、コンクリート応力がある引張応力に達すると、引張応力が減少していることから付着が切れたと考えられる。

次に、PC 鋼材との付着が切れたところから除荷を行うと、コンクリートと PC 鋼材のとの付着力は無いが、コンクリート間に摩擦力が発生すると考える。その後、コンクリートにプレストレスが再導入されると再び圧縮応力が発生する。

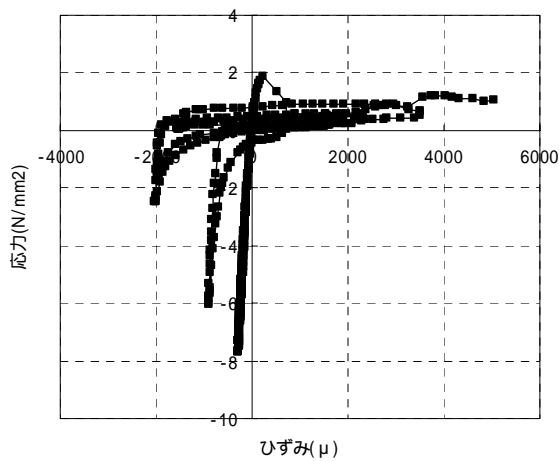


図 7 コンクリートの応力 ひずみ曲線

一度付着が切れた状態から，再載荷を行いコンクリートに導入されているプレストレスが解除されると，コンクリートには引張応力が発生しない．これは，付着劣化の影響から付着力が存在していないと考えられる．

その後の除荷においても，プレストレスが再導入されるまでは応力に変化が見られないことから付着はなく，アンボンドの状態に近いと考えられる．

5 解析結果

図 8 にアンボンド状態と付着の影響を考慮した解析結果と同条件での実験結果の比較を示す．

解析条件は付着の影響を考慮した解析で付着係数が 0.9 である．

アンボンド状態での解析値と実験値との違いは，PC 鋼材が初降伏する直前の導入プレストレスを超える引張荷重が作用したとき，PC 鋼材ひずみが，解析値はコンクリートと PC 鋼材の付着が無いために，ひずみが増大するのに対し，実験値は，まだコンクリートとの付着が十分にあるため，PC 鋼材のひずみの増加が抑えられている点である．

付着を考慮した解析で，その荷重時での解析値と実験値を比較すればひずみの増加が一致しており，付着が存在していることが確認できる．

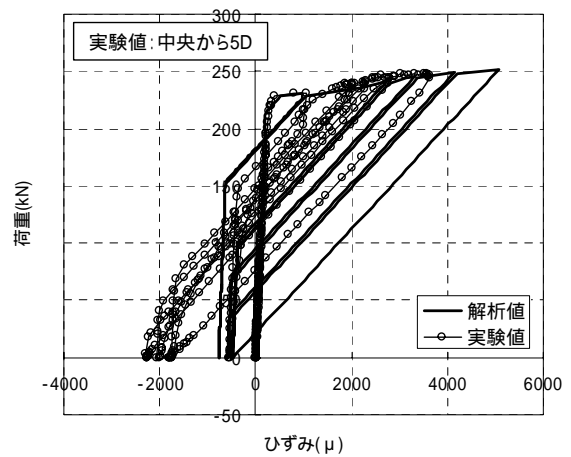
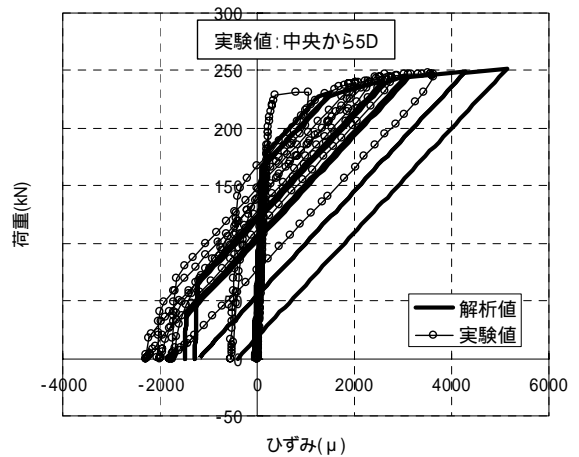


図 8 PC 鋼材荷重 ひずみ曲線の比較
上段：アンボンド，下段：付着係数 0.9

PC 鋼材降伏後の挙動においては，解析値と実験値で大きな違いは見られない．解析において付着が一度切れるとその後の付着力は無視しており，実験値と解析値で違いが見られないということは，一度付着が切れた状態で除荷をした後，再載荷を行っても付着力が戻らないと考えられる．

図 9 は実験値から得られたひずみを，平均化してからプレストレスロスを計算し，実験の結果と比較したものである．図中の解析値は解析でのプレストレスロスを示す．図に示すように，ひずみを平均した値を用いたところ多少のずれはあるものの，ひずみ分布の計測の正確性を勘案すれば，ほぼ妥当な評価であると考えられる．

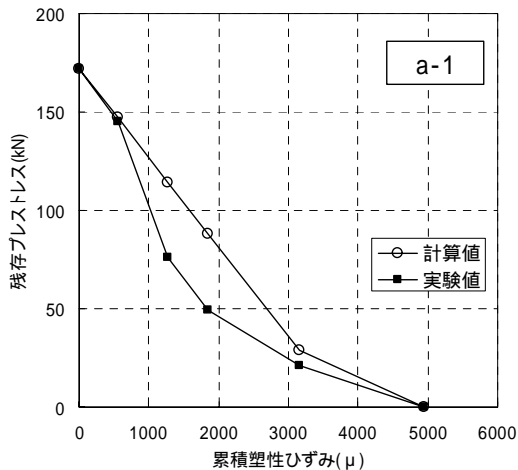


図 9 プレストレスロスの比較

今後は、正確な挙動をつかむために、ひずみ分布を考慮した解析が必要であると言える。

6. まとめ

PC 部材の一軸引張試験結果および数値解析結果より、以下の結論が得られた。

PC 鋼材は、降伏後の除荷において、初期プレストレスを導入した初期ひずみより、減少する。

PC 鋼材降伏後、除荷を行うと、コンクリートに導入されるプレストレスが減少する。

履歴に関しては、一度付着が切れ、PC 鋼材が降伏した後であれば、付着の影響は無視できるものと考えられる。

アンボンドとボンド状態の解析を比較することで付着の影響は、PC 鋼材降伏直前の、付着応力が付着強度に達するまでが最も影響が大きい。

塑性ひずみ量からでプレストレスロスが計算できることが分かった。

以上のまとめより、PC 部材は PC 鋼材が降伏した後の挙動が重要な要因になることが分かった。

また、PC 部材の実験において、その付着力、コンクリートと PC 鋼材の相対変位、PC 鋼材ひずみ、コンクリートひずみに起因するのは、PC 鋼材比、導入プレストレス量、初期の付着状態である。今回の実験ではその限られたパラ

メーターでの挙動であり、付着応力を定量化するまでに至らなかった。つまり、付着応力を定量化するには以上のような要因をすべて考慮した実験を行い、どのような影響をもたらすかについて調べることが必要であると言える。今後の課題としては、ひずみ分布は、付着と密接な関係があると考えられるため、ひずみ分布を考慮したモデルを作成する必要がある。

参考文献

- 1) 稲田文展, 睦好宏史, Wael Zatar: プレストレスを導入した RC 橋脚の耐震性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No3, pp.739-744, 1998.6
- 2) 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能に関する研究, プレストレストコンクリート, Vol.40, No.5, pp.40-47, 1998
- 3) 葛野 敦, 山口隆裕, 池田尚治: プレストレストコンクリート橋脚の地震応答挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No3, pp.883-888, 1999.6
- 4) 足立将人, 高津比呂人, 西山峰広: PC 鋼より線の付着特性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No3, pp.739-744, 1998.6
- 5) 壹岐直之, 清宮 理: 静的繰り返しが異形鉄筋の付着特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No3, pp.1195-1200, 2000.6
- 6) 壹岐直之, 清宮 理: 除荷時における異形鉄筋の局所付着特性に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No2, pp.817-822, 2002.6
- 7) 岡村 甫, 前川宏一: 非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991