

経時変化を考慮したPC鋼材とグラウトの付着性状に関する実験的研究

(公財)鉄道総合技術研究所 修士(工学) ○高橋 健
 (公財)鉄道総合技術研究所 正会員 博士(学術) 渡辺 健
 (公財)鉄道総合技術研究所 正会員 博士(工学) 谷村 幸裕
 (公財)鉄道総合技術研究所 堀 慎一

Abstract : The broken and corrosion of PC tendons in post-tensioned PC beams due to insufficient grouting has been reported. If a PC tendon is broken, the crack occurs at the bottom surface and the load bearing capacity is decreased. Based on measured strain in the experiments, this study described the bond property of PC tendons in the PC beams, which was subjected to cyclic loading. In addition, the flexural capacity of PC beam with broken tendon after cyclic loading was discussed.

Key words : PC beams , Bond , Cyclic loading , Flexural capacity

1. はじめに

ポストテンション式プレストレストコンクリート桁(以下、PC桁)は、鉄道構造物として、多数架設され供用されている。近年、PCグラウト(以下、グラウト)の充てん不良から、PC鋼材が腐食し、破断に至っていることが報告されている。PC鋼材の破断に伴うプレストレスの減少によるひび割れの発生を予測するため、適切に補強するためにも、PC鋼材の破断がPC桁のプレストレスおよび曲げ耐力に及ぼす影響を把握することが必要である。

よって、本研究では、既設鉄道PC単純I形桁を対象とし、PC鋼材が破断したPC桁のプレストレスを、経時変化を考慮して把握することを目的とし、PC梁供試体のPC鋼材を切断し繰返し載荷を行い、PC鋼材破断、および繰返し載荷に伴うプレストレスの変化について検討した。また、繰返し載荷後に静的載荷実験を行い、繰返し載荷を受けたPC梁の曲げ耐力についても検討した。

2. PC鋼材の切断実験

2. 1 実験概要

表-1に供試体寸法、材料試験結果、PC鋼材切断時のコンクリートおよびグラウトの材齢を、図-1に供試体概要図を示す。コンクリートは、既設鉄道PC桁で使用された強度とし、PC鋼材種別を変化させており、グラウトは設計基準強度である20N/mm²以上を参考に20、40N/mm²を目標強度とした。PC鋼材の有効プレストレスは既設桁の設計図書を参考に決定し、フレシネー工法で定着した。

供試体にはPC鋼材切断のための開口部を設け、PC鋼材は一方より片引き緊張した。グラウト充てん

表-1 供試体諸元

| 供試体 NO. | 寸法 | | コンクリート | | | | グラウト | | | PC 鋼材 | | | | |
|------------|---------|---------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------|----|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------|-----------------|----------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| | d mm | L mm | f _c N/mm ² | E _c N/mm ² | 材齢 (日) | | f _g N/mm ² | E _g N/mm ² | 材齢 (日) 切断 | 種別 | 本数(本) 径(mm) | f _{pu} N/mm ² | E _p N/mm ² | σ _{pe} N/mm ² |
| | | | | | 緊張 | 切断 | | | | | | | | |
| S20 | 350 | 5000 | 48.3 | 29.0 | 7 | 17 | 22.0 | 8.1 | 7 | 鋼より線 SWPR7AL | 12 S12.4 | 1729 | 213 | 1003.4 |
| S40 | | | | | 4 | 12 | | | | | | | | 46.8 |
| C20 | 250 | 8000 | 48.7 | 27.5 | 7 | 17 | 24.9 | 10.6 | 7 | 鋼線 SWPR1BN | 12 φ8 | 1637 | 206 | 806.8 |
| C40 | | | | | 4 | 13 | | | | | | | | 52.0 |

※f_c:コンクリートの圧縮強度, E_c:コンクリートのヤング係数, f_g:グラウトの圧縮強度, E_g:グラウトのヤング係数, f_{pu}:PC 鋼材の引張強度, E_p:PC 鋼材のヤング係数, σ_{pe}:PC 鋼材切断直前の PC 鋼材の有効プレストレス応力, PC 鋼材切断時のコンクリート, グラウトの試験結果, 寸法は図1を参照

不良を模擬するためグラウト未充てん区間を
 設け、ノンブリーディング型グラウトを充
 てんした。ひずみゲージは、PC鋼材および
 測定のために配置したD6の鉄筋に貼付した。
 PC鋼材はグラインダーを用いて切断した。

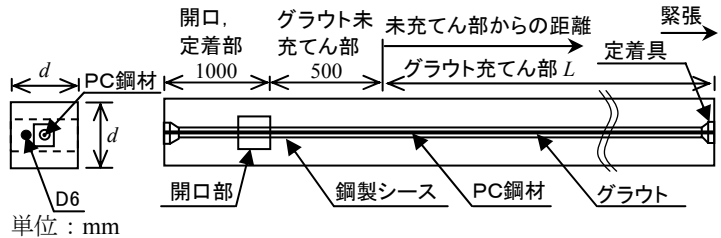


図-1 供試体概要図

2. 2 実験結果

図-2および図-3に、C20のプレストレス導入からPC鋼材切断までの期間の、PC鋼材および鉄筋のひずみ変化を示す。なお、本論文では、ひずみは引張を正、圧縮を負とする。図-2および図-3より、プレストレス導入からPC鋼材切断までの期間において、供試体全長で、PC鋼材と鉄筋のひずみは約 100×10^{-6} 減少している。PC鋼材と鉄筋のひずみが同程度減少していることから、PC鋼材とコンクリートは一体として挙動し、ひずみの減少は供試体の乾燥収縮およびクリープによるものと考えられる。

図-2より、PC鋼材切断後のグラウト未充てん部付近のPC鋼材のひずみは概ね0となっており、プレストレスが開放されたことがわかる。一方、PC鋼材のひずみは、グラウト未充てん部からの距離が増加するに従い増加し、グラウト未充てん部から2000mm程度以遠では、PC鋼材切断前から変化していない。図-3より、PC鋼材切断後のD6の鉄筋のひずみも、PC鋼材と同様にグラウト未充てん部から2000mm程度以遠では変化していない。よって、PC鋼材とグラウトの付着により、プレストレスが残存し、グラウト未充てん部から2000mm以遠では、PC鋼材切断前のプレストレスが維持されていた。

図-4にPC鋼材切断後のひずみを基準としたC20のひずみの経時変化を示す。図-4のプレストレス減少範囲に着目すると、グラウト未充てん部からの距離が増加するに従い、切断後20日のひずみが減少している。これは、PC鋼材切断直後のプレストレスが大きいほど、収縮量が大きいことを示している。乾燥収縮によって、供試体全長でひずみが一様に減少すると仮定すると、供試体部位によるひずみ減少量の差異は、残存プレストレスの差異によって発生したクリープの影響と考えられる。一方で、PC鋼材切断に伴いプレストレスが変化しなかった範囲では、切断後20日において、概ね一様にひずみが減少している。この範囲は、クリープによる収縮が一様であり、供試体のPC鋼材切断後のプレストレスが一定であったと考えられる。すなわち、PC鋼材切断に伴いプレストレスが減少する範囲は、PC鋼材切断時からPC鋼材切断後20日の期間において、概ね変化しなかったものと考えられる。

既往の研究では、PC鋼材切断時に発生する付着応力は位置、すなわちすべり量によらず一定であり、有効プレストレス力をプレストレス減少範囲とPC鋼材の周長で除して得られる付着応力を破断時の付着強度としている¹⁾。よって、プレストレス減少範囲が変化しない場合は、付着応力も変化しない。以上より、PC鋼材切断時に発生した付着応力は、切断後20日においても変化しなかったといえる。

3. PC鋼材を切断したPC梁の繰返し載荷実験および静的載荷実験

3. 1 実験概要

表-2に材料試験結果および荷重振幅を、図-5に供試体概要図を示す。プレストレスにより発生す

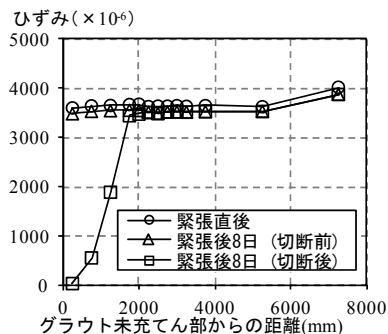


図-2 PC鋼材切断時のPC鋼材のひずみ分布変化 (C20)

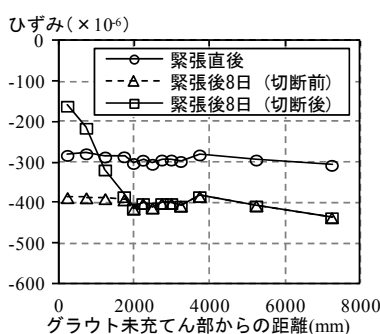


図-3 PC鋼材切断時の鉄筋のひずみ分布変化 (C20)

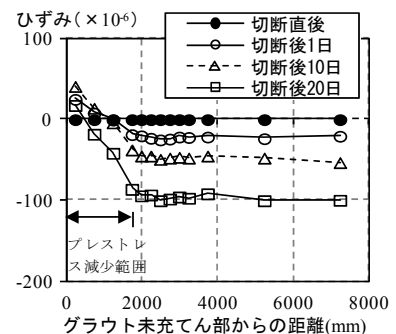


図-4 PC鋼材切断後の鉄筋ひずみの経時変化 (C20)

るPC鋼材の応力度およびコンクリートの応力度は、既往PC桁の設計図等を参考に決定した。PC鋼材および計測用に配置したD6の鉄筋にひずみゲージを貼付した。

1日12万回の4点曲げ載荷とし、グラウト充てん後7日でPC鋼材を切断し載荷を開始した。既設の鉄道PC単純I形桁の複線載荷時に発生する付着応力を再現するように、S20-90, S40-90, C20-70, およびC40-70の荷重振幅を決定した。S20-140は複線載荷の1.5倍程度、C20-35は単線載荷程度の荷重振幅とした。ひずみを計測するため、初期載荷、1000回、1万回、12万回、以降12万回載荷するごとに、繰返し載荷と同じ荷重振幅で静的載荷を行った。

3. 2 実験結果

(1) 結果概要

全供試体は 200 万回の繰返し載荷では破壊しなかったため、繰返し載荷後に静的載荷を行い、載荷点付近で曲げ圧壊させた。図-6 に、各供試体の荷重-変位関係を示す。PC 鋼より線 12s12.4 を用いた S シリーズおよび PC 鋼線 12φ8 を用いた C シリーズの供試体は、それぞれ概ね同様の荷重-変位関係を示し、最大荷重も同程度であった。パラメータとしたグラウト強度および繰返し載荷の荷重振幅は、繰返し載荷後の静的載荷時の荷重-変位関係および曲げ耐力には大きな影響を及ぼさなかった。

図-7 に S20-140 の静的載荷後のひび割れ状況を示す。静的載荷後のひび割れ状況は、全供試体で同様の傾向であり、緊張側と比較して PC 鋼材切断側にひび割れが多く発生した。ひび割れ状況から、PC 鋼材切断側のプレストレスが小さいことが推測できる。

(2) PC 鋼材切断時のひずみ変化

図-8 および図-9 に、S20-140 のプレストレス導入から PC 鋼材切断までの期間における、PC 鋼材および鉄筋のひずみ分布の変化を示す。PC 鋼材の切断に伴い、PC 鋼材および鉄筋のひずみは、グラウト未てん填部からの距離が 2000mm 程度の範囲 (以降：プレストレス減少範囲) まで変化した。

表-2 供試体緒元

| 供試体 | コンクリート | | | | | グラウト | | 軸方向鉄筋 | | PC 鋼材 | | | | 荷重 | | | |
|---------|----------------------------|----------------------------|-------|----|-------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------|-------------------------------|----------------------------|-------------|------------------------|-------------------------------|----------------------------|------------------------------------|----------|----------|
| | f_c N/mm ² | E_c N/mm ² | 材齢(日) | | | f_g N/mm ² | E_g N/mm ² | 材齢 (日) 切断 | f_{sy} N/mm ² | E_s N/mm ² | 種別 | 本数 (本) 径 (mm) | f_{pu} N/mm ² | E_p N/mm ² | σ_{pe} N/mm ² | 下限 kN | 上限 kN |
| | | | 緊張 | 切断 | 繰返し 後の静 的載荷 | | | | | | | | | | | | |
| S20-90 | 52.0 | 28.7 | 7 | 17 | 32 | 28.3 | 11.4 | 7 | 378.2 | 187.3 | SWPR 7AL | 12 S12.4 | 1729 | 213 | 948.4 | 10 | 100 |
| S20-140 | | | | | | | | | | | | | | | 923.7 | | |
| S40-90 | | | 53.4 | - | 4 | | | | | | | | | | 12 | | |
| C20-70 | 59.0 | 27.7 | 7 | 17 | 40 | 24.9 | 10.6 | 7 | 387.6 | 191.4 | SWPR 1BN | 12 φ8 | 1637 | 206 | 837.5 | 10 | 80 |
| C20-35 | | | | | | | | | | | | | | | 766.7 | | |
| C40-70 | | | 4 | 13 | 38 | | | | | | | | | | 52.0 | | |

※ f_c :コンクリートの圧縮強度, E_c :コンクリートのヤング係数, f_g :グラウトの圧縮強度, E_g :グラウトのヤング係数, f_{pu} :PC 鋼材の引張強度, E_p :PC 鋼材のヤング係数, σ_{pe} :PC 鋼材切断直前の PC 鋼材の有効プレストレス応力, コンクリートは繰返し載荷後の静的載荷時の試験結果, グラウトは PC 鋼材切断時の試験結果

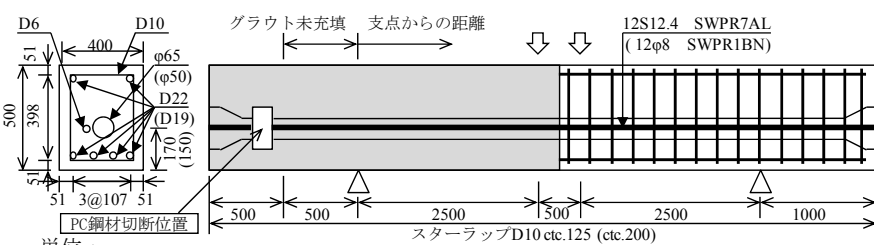


図-5 供試体概要図

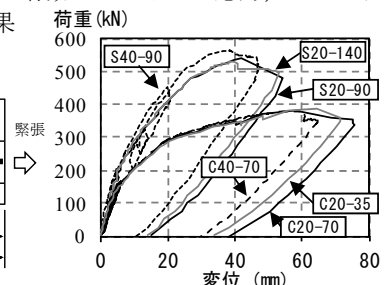


図-6 静的載荷時の荷重-変位関係

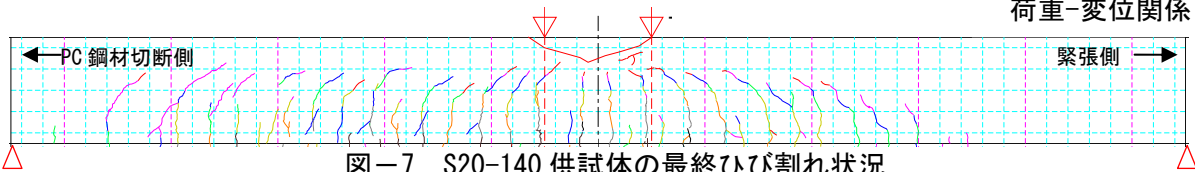


図-7 S20-140 供試体の最終ひび割れ状況

なお、2章で行った切断実験の供試体（以降：切断供試体）と同様に、緊張からPC鋼材切断までの期間で、乾燥収縮およびクリープに起因してひずみが減少した。

PC鋼材切断による鉄筋のひずみ変化を2直線近似し、プレストレス減少範囲を求め、有効プレストレス力をPC鋼材周長とプレストレス減少範囲で除して付着応力を求めた¹⁾。表-3にPC鋼材切断による付着応力を、同一鋼材種、同一グラウト強度の切断供試体と本章の供試体（以降：繰返し載荷供試体）で比較して示す。切断供試体と繰返し載荷供試体の付着応力は近い値を示している。

(3) 初期載荷時のひずみ変化

図-10にS20-140の初期載荷時に発生したPC鋼材のひずみを示す。切断側である左側のスパンで載荷に伴い発生するひずみは、支点からの距離に比例せず、右側のスパンに発生するひずみと比較して小さい。そのため、初期載荷時のPC鋼材のひずみ変化について検討することとした。

図-11に載荷直前のひずみを基準とする、S20-140の初期載荷時における左支点から1.25m位置および4.75m位置の荷重-ひずみ関係を示す。図-11より、PC鋼材切断時のひずみ変化が無かった範囲（以降：健全範囲）である左支点から4.75m位置では、載荷時と除荷時の荷重-ひずみ関係の勾配が一致し、載荷前後でひずみは変化しなかった。一方、載荷時にPC鋼材とグラウトにすべりが生じたものと考えられるが、プレストレス減少範囲である左支点から1.25m位置では、載荷時は除荷時と比較して荷重に対するひずみの変化量が小さく、除荷後にひずみが減少した。以上より、プレストレス減少範囲においては、初期載荷に伴いプレストレスが減少したといえる。なお、載荷前に残存するPC鋼材のひずみが 3000×10^{-6} 程度であるのに対し、初期載荷に伴うひずみ減少量は 12×10^{-6} と小さく、初期載荷に伴うプレストレスの減少量は軽微であった。

図-12に繰返し載荷に伴う、静的載荷時の荷重/PC鋼材のひずみの変化を示す。健全範囲である4.75m位置の荷重/ひずみは、載荷回数によらず概ね一定である。一方で、1.25m位置の荷重/ひずみは、初期載荷時は 10^3 回載荷時と比較して大きい、 10^3 回以降は概ね一定である。1.25m位置では、初期載荷時にすべりが生じ、載荷に伴い発生するひずみが小さく、除荷後にプレストレスが減少する。一方、 10^3 回以降の載荷によってはすべりが生じず、プレストレスは減少しないものと考えられる。

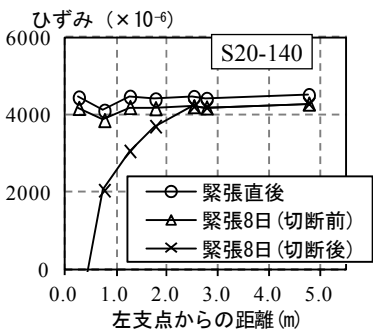


図-8 PC鋼材切断によるPC鋼材のひずみ変化

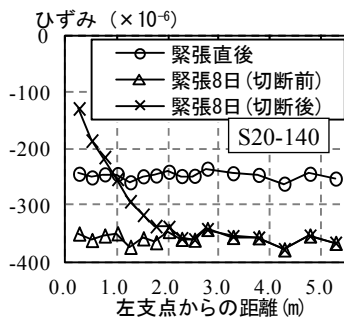


図-9 PC鋼材切断による鉄筋のひずみ変化

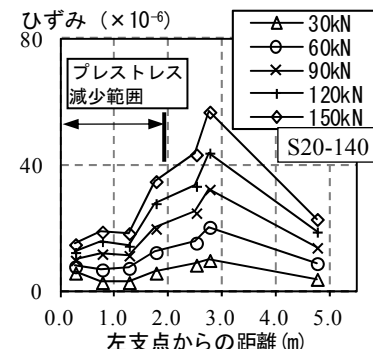


図-10 初期載荷時のPC鋼材のひずみ分布変化

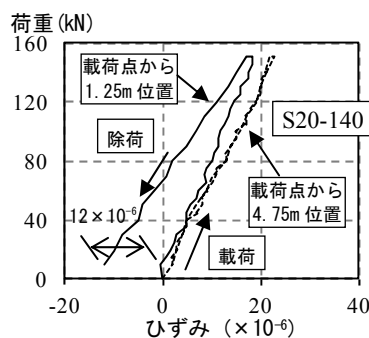


図-11 初期載荷時の荷重-PC鋼材のひずみ関係

表-3 プレストレス減少範囲、付着応力

| 切断供試体 | | 繰返し載荷供試体 | | | |
|-------|---------|------------------------|---------|---------|------------------------|
| 供試体 | 減少範囲 mm | 付着応力 N/mm ² | 供試体 | 減少範囲 mm | 付着応力 N/mm ² |
| S20 | 2025 | 0.95 | S20-90 | 1893 | 1.19 |
| | | | S20-140 | 1898 | 1.16 |
| S40 | 1456 | 1.57 | S40-90 | 1455 | 1.58 |
| C20 | 3397 | 0.47 | C20-70 | 2914 | 0.57 |
| | | | C20-35 | 2522 | 0.61 |
| C40 | 1892 | 0.77 | C40-70 | 2267 | 0.68 |

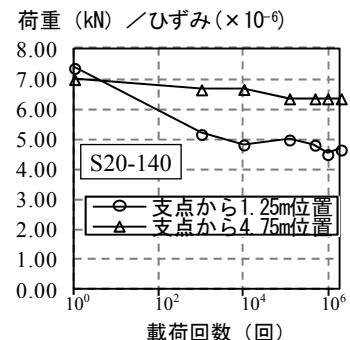


図-12 繰返し載荷による荷重/PC鋼材のひずみの変化

図-13に、初期荷重に伴いPC鋼材のひずみ分布が変化する概念を示す。PC鋼材切断時にプレストレス減少範囲において、PC鋼材とグラウトには破断時の付着強度相当の付着応力が発生する(図-13(a))。PC鋼材とグラウトが完全付着している場合には、荷重に伴い、せん断スパンには一定の付着応力が発生する(図-13(b))。しかしながら、プレストレス減少範囲においては、PC鋼材切断時に破断時の付着強度相当の付着応力が発生しており、荷重によってPC鋼材のひずみは増加しない。健全範囲においては、荷重によってPC鋼材のひずみが増加するため、健全範囲とプレストレス減少範囲との境界付近ですべりが生じ、破断時の付着強度程度の付着応力が発生する(図-13(c))。除荷時には、PC鋼材のひずみが減少するため、プレストレス減少範囲の付着応力は荷重前と比較して減少する(図-13(d))。このような機構により、図-11に示した挙動が観察されたと考えられる。なお、1.25m位置では、すべりは生じているが、PC鋼材のひずみは増加しており、破断時の付着強度を上回る付着応力が初期荷重時に発生していたと考えられる。

(4) 繰返し荷重によるひずみ変化

図-14および図-15に、S20-140の繰返し荷重過程で行った、静的荷重、荷重10kNでのPC鋼材および鉄筋のひずみ変化を示す。なお、繰返し荷重供試体の200万回荷重時の経過日数は、概ね、切断後20日程度である。図-14より、PC鋼材のひずみは 100×10^6 程度減少しているが、ひずみ分布は概ね変化していないことが分かる。また、図-15より、図-4に示した切断供試体と同様に、健全範囲では、概ね一様に鉄筋のひずみが減少していることから、このひずみ変化はクリープおよび乾燥による変化であり、繰返し荷重によっては、鉄筋のひずみは大きく変化しなかった。

なお、支点から2.75m位置のPC鋼材においては、200万回荷重時にひずみが減少した。PC鋼材緊張時や切断時にひずみゲージのコーティングが傷んだことが原因と考えられ、グラウト充てん後から、隣接するゲージと挙動が異なり、次第にひずみが減少するゲージが存在した。2.75m位置のひずみゲージには、上述の現象が発生したものと考えられる。

(5) 繰返し荷重後の静的荷重によるひずみ変化

図-16にS20-140の静的荷重時に発生したPC鋼材のひずみ分布を示す。図-16より、荷重の増加に伴いPC鋼材のひずみが増加している。S20-140は150kNが最大履歴荷重である。付着応力の最大値がPC鋼材切断時から一定であると仮定すると、最大履歴荷重を超える荷重範囲においては、PC鋼材とグラウトにすべりが生じ、プレストレス減少範囲のPC鋼材のひずみは増加しない。しかしながら、最大履歴荷重以上である400kN荷重時においても、PC鋼材のひずみが増加している。以上より、静的荷重時には、破断時の付着強度より、大きな付着応力が発生していたといえる。

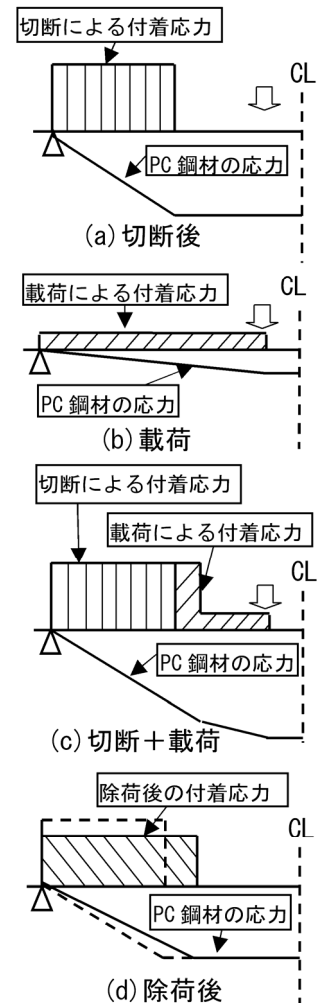


図-13 荷重に伴うひずみ分布の変化の概念

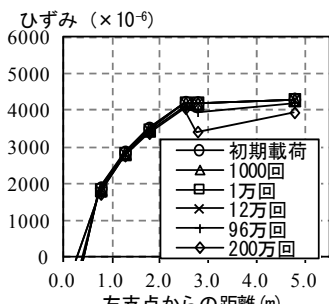


図-14 繰返し荷重に伴うPC鋼材ひずみの経時変化

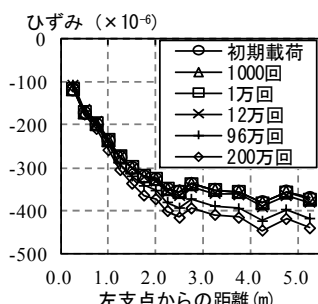


図-15 繰返し荷重に伴う鉄筋ひずみの経時変化

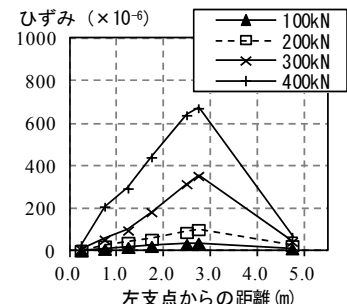


図-16 繰返し荷重後の静的荷重時のPC鋼材のひずみ分布変化

4. 曲げ耐力の評価

PC 鋼材とグラウトの付着を考慮した場合、および PC 鋼材はグラウトと完全付着していると仮定した場合の曲げ耐力を算定し、実験値結果と比較した。付着を考慮した曲げ耐力を算定するにあたり、表-3 に示した各供試体の付着応力を PC 鋼材の周長とグラウト未充てん部からの距離で積分し、供試体各位置の PC 鋼材の見かけの降伏点とした¹⁾。なお、鉄道構造物等設計標準・同解説 (コンクリート構造物)²⁾ に従い、曲げ耐力を求めた。

表-4 に実験結果より得られた曲げ耐力と計算値を比較して示す。全供試体の実験より得られた曲げ耐力は、付着を考慮して求めた曲げ耐力ではなく、完全付着を仮定して求めた曲げ耐力と近い値を示した。

図-18 に S20-140 の最大荷重時に発生するモーメント、付着を考慮した場合、および完全付着を仮定した場合の曲げ耐力の分布を示す。図-18 より、付着を考慮した曲げ耐力は、左支点からの距離が増加するに従い増加するが、曲げ圧壊した位置である左載荷点付近においては、実験結果を過小評価することが分かる。付着応力が大きくなると、図-18 に示した曲げ耐力の勾配は大きくなり、勾配変化点は左支点側に移動する。よって、PC 鋼材のひずみが増加する現象に加え、曲げ耐力からも静的荷重時には破断時の付着強度より大きな付着応力が発生していたことが分かった。

破断した PC 鋼材はその存在を無視し、既設 PC 桁の性能評価を行うのが一般的である。これに対し、PC 鋼材切断時に発生する付着応力を考慮し、各位置の PC 鋼材の降伏強度を変化させる手法を用いることにより、安全側の評価となるが、破断した PC 鋼材を評価して曲げ耐力を算定できること、また、PC 鋼材の破断により曲げ耐力が低下する範囲を推定できることがわかった。付着を考慮し、破断した PC 鋼材を評価することによって、合理的、かつ適切な補強が可能になると考えられる。

5. まとめ

本研究で実施したPC鋼材の切断実験、PC鋼材を切断したPC梁の繰返し荷重実験、および繰返し荷重後の静的荷重実験から得られた知見を以下に示す。

- (1)PC鋼材切断に伴いプレストレスが減少する範囲のプレストレスは、初期荷重時に減少するが、減少量は有効プレストレスと比較して小さく、初期荷重前の有効プレストレスを維持することがわかった。
- (2)PC鋼材切断後20日のひずみ変化を計測した結果、および最大で鉄道PC桁に複線荷重で発生する付着応力振幅の1.5倍程度で200万回の繰返し荷重を行った結果、付着に起因したプレストレスの大きな経時変化は発生せず、PC鋼材破断直後の有効プレストレスを概ね維持することがわかった。
- (3)PC鋼材破断時に発生する付着応力を考慮することで、破断したPC鋼材を評価し、PC桁のプレストレスの状態、曲げ耐力、およびPC鋼材の破断により曲げ耐力が低下する範囲を推定できることがわかった。

本研究は国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

参考文献

- 1)前田友章, 徳永光宏, 田所敏弥, 谷村幸裕: 鋼材破断時の付着特性に着目したPC梁の曲げ耐力に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, 2010
- 2)財団法人鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 (コンクリート構造物), 2004.04

表-4 曲げ耐力の実験値と計算値の比較

| 供試体 | 曲げ耐力 | | | | |
|---------|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | M_{uex} kN・m | M_{ucal1} kN・m | M_{uex}/M_{ucal1} | M_{ucal2} kN・m | M_{uex}/M_{ucal2} |
| S20-90 | 676 | 548 | 1.23 | 693 | 0.97 |
| S20-140 | 705 | 556 | 1.27 | 693 | 1.02 |
| S40-90 | 664 | 623 | 1.06 | 686 | 0.96 |
| S20-70 | 480 | 317 | 1.51 | 463 | 1.03 |
| S20-35 | 475 | 338 | 1.41 | 463 | 1.03 |
| S40-70 | 486 | 354 | 1.37 | 463 | 1.05 |

M_{uex} : 実験結果より得られた曲げ耐力

M_{ucal1} : 付着を考慮して求めた曲げ耐力

M_{ucal2} : 完全付着を仮定して求めた曲げ耐力

※左載荷点位置の曲げ耐力

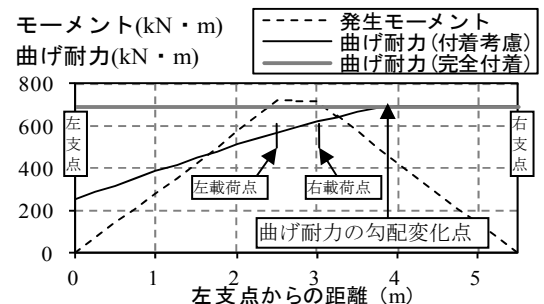


図-18 発生モーメントと曲げ耐力の比較