

論文 PC 鋼材切断および桁切断による長期供用された撤去 PC 桁の残存プレストレス評価

桑野 仁成*1・岩波 光保*2・福田 圭祐*3・志岐 仁成*4

要旨: 50年以上供用された PC 桁の残存プレストレスを評価するために、PC 鋼材切断および PC 桁切断時のひずみを計測するとともに、設計図書をもとに復元設計を行い、計測結果と比較検証した。その結果、PC 鋼材の残存引張力は引張強度設計値の約 40~50%であり、残存引張力計測結果と復元設計結果の平均値は一致していた。しかし、PC 桁切断試験によって得られた応力分布は復元設計(現行基準)とは約 16%の差が確認された。PC 鋼材切断試験と、PC 桁切断試験の結果の差異は季節変動によるコンクリート表面のひずみ変動が大きな要因であると推測された。

キーワード: 撤去 PC 桁, 長期供用, 残存プレストレス, 解放ひずみ, 復元設計

1. はじめに

プレストレストコンクリート桁(以下、PC 桁)は、PC 鋼材を使用して、コンクリートにプレストレスを導入し、ひび割れを抑制する構造である。PC 桁の耐荷性能を評価するうえで、残存プレストレスを把握することは重要となる。

Wouter ら¹⁾は、70年以上供用されていたポストテンション方式 PC 桁に対して載荷試験を行い、ひび割れ発生荷重から残存プレストレスを推定している。また、二井谷ら²⁾は、応力解放法を用いて撤去された PC 桁の残存プレストレスを推定している。このように、ひび割れ発生荷重や応力解放法から供用されていた PC 桁の残存プレストレスを評価した事例はあるものの、PC 鋼材や PC 桁自体の切断によって PC 鋼材の残存引張力や PC 桁の残存プレストレスを評価した事例は見当たらない。

そこで、著者らは、50年以上供用された撤去 PC 桁に対して、PC 鋼材および PC 桁を切断して、PC 鋼材の残存引張力および PC 桁の残存プレストレスを計測した。また、設計図書をもとに復元設計を行い、PC 鋼材の残存引張力の設計値と計測値を比較検証した。

2. 対象 PC 桁の概要

2.1 構造諸元

建設から 50 年以上経過後に撤去された鉄道 PC 桁を対象に試験を実施した。対象 PC 桁の諸元を表-1 に、対象桁の外観や側面図および支間中央の断面図を図-1 から図-4 にそれぞれ示す。対象桁は昭和 40 年代に整備された国鉄時代の標準設計桁³⁾である。なお、試験実施前に、対象桁にひび割れなどの外観変状は確認できなかった。

なお、切断後に主ケーブル断面を確認したところ、グラウトは十分に充填されていた。

各桁で実施した試験内容を表-2 に示す。G1 では、PC 鋼材の残存引張力を評価するために、PC 鋼材切断試験を実施した。一方、G2 桁では、PC 桁の残存プレストレスを評価するために、PC 桁の切断試験を実施した。また、対象桁のコンクリート材料特性値を把握するために、両主桁からコンクリートコアを採取し、コンクリート材料

表-1 構造諸元

項目	諸元
橋梁形式	ポストテンション方式 単純単線 2 主 PCI 型桁橋
建設時期	1971 年
支間長	31.3m
コンクリート設計基準強度	40N/mm ²
PC 鋼材	主ケーブル 12φ7mm(17 本/主桁) 引張強度 1550N/mm ²
	横締め鋼棒 φ24mm(SBPC110) 引張強度 1110N/mm ²

表-2 実施試験まとめ

試験対象	実施試験
G1 桁	コンクリート材料試験, PC 鋼材切断試験
G2 桁	コンクリート材料試験, PC 桁切断試験 PC 鋼材引張試験



図-1 PC 桁の外観

*1 東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 土木工学コース (学生会員)

*2 東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 教授 博士(工学) (正会員)

*3 ジェイアール西日本コンサルタンツ(株) 土木設計本部技術統括室 (正会員)

*4 東電設計(株) 土木本部 土木設計部 保全技術グループ (非会員)

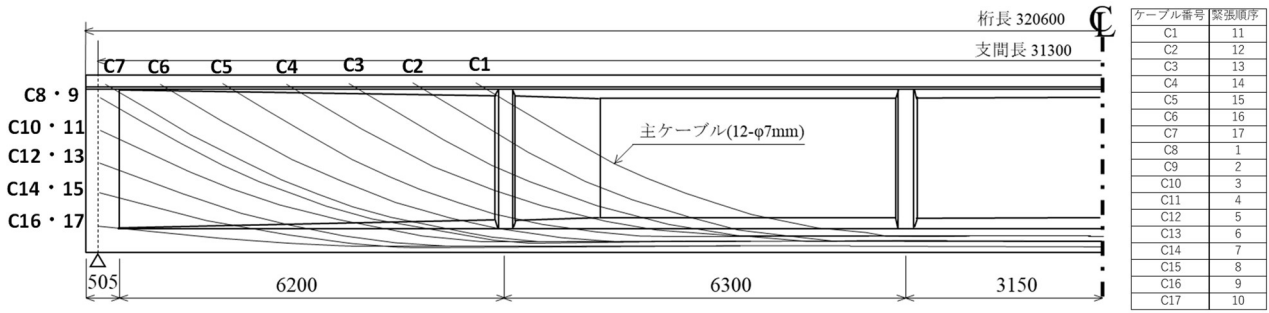


図-2 PC 桁側面図

(単位：mm)

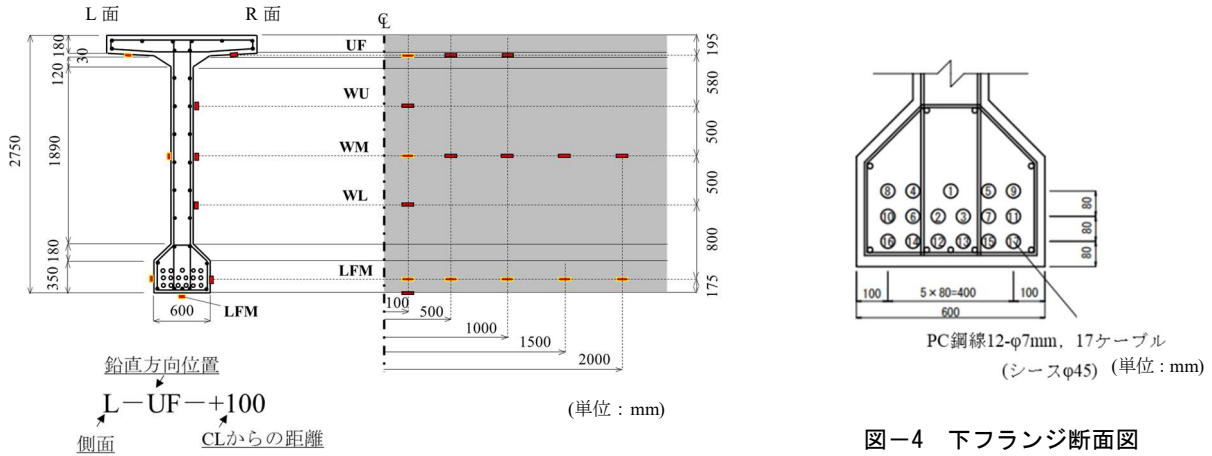


図-3 支間中央断面図

図-4 下フランジ断面図

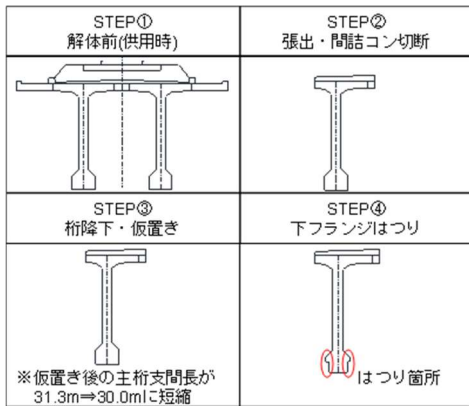


図-5 対象 PC 桁の解体順序

試験を実施した。さらに、G2 桁解体後に採取した PC 鋼材を用いて、PC 鋼材の機械的性能を把握するために、引張試験を行った。試験は、対象桁が橋脚からクレーンにて撤去され、撤去工事用仮設構台上に設けた仮支点上に仮置きし実施した。仮支点上に仮置きされるまでの対象桁の解体順序を図-5 に示す。まず、軌道などの床版上の付帯物を撤去し、橋脚上に架設された状態で張出スラブと間詰コンをワイヤーソーで切断した後、撤去している。なお、G1 桁の PC 鋼材切断は、PC 鋼材を露出させるために、支間中央付近の下フランジを長さ約 350mm、高さ約 250mm はつり、その後実施した。

3. 試験および復元設計概要

3.1 圧縮強度および静弾性係数試験

対象桁から対象桁からφ100mm コアを採取し、長さ200mm への切断および端面処理を行った後、圧縮強度試験および静弾性係数試験を行った。G1 桁からは7箇所、G2 桁からは9箇所の計16個のコアを採取した。コア試験体はウェブ部分における桁中央部や桁端付近など桁全体にわたる部分から採取した。

3.2 PC 鋼材引張試験

解体された G2 桁より採取した PC 鋼材を切断して、約400mm の試験片を7本採取し、引張試験を行った。7本の内3本には、つかみ間隔中央にひずみゲージを貼り付けひずみの計測も行った。

3.3 PC 鋼材切断試験

G1 桁における PC 鋼材の残存引張力を評価するために、G1 桁中央部の下フランジ両側面のコンクリートをはつり、片面3本ずつ計6本の主ケーブルを露出させた後、各主ケーブルに3本、計18本の PC 鋼材を抽出し、図-6 に示すようにひずみゲージを貼り付けた。その後、ディスクグラインダーにて PC 鋼材を切断し、切断時のひずみ変動を計測した。なお、片側の PC 鋼材を全て切断してしまうとプレストレスの作用軸が偏心してしまうため、図-7 に示すように片側ずつ交互に PC 鋼材を切断

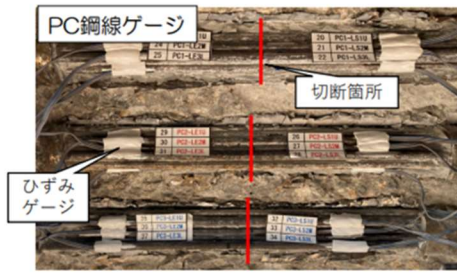


図-6 PC 鋼材ひずみゲージ貼り付け状況

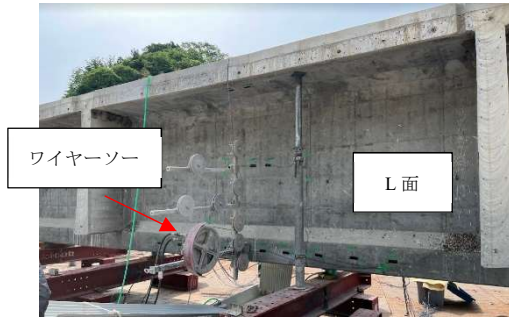


図-8 ワイヤーソー切断状況

した。

3.4 PC 桁切断試験

G2 桁における残存プレストレスを評価するために、図-3 に示したように、G2 桁中央付近にコンクリートひずみゲージを貼り付けた後、図-8 に示すようにワイヤーソーにて G2 桁中央を切断し、切断時のひずみ変動を計測した。そして、ひずみ計測結果にコンクリート材料試験の静弾性係数を乗じ、G2 桁の残存プレストレスを推定した。

3.5 復元設計

PC 鋼材の切断試験および PC 桁切断試験から推定した PC 鋼材の残存引張力と PC 桁の残存プレストレスを検証するために、設計図書を参考に、PC 鋼材の残存引張力と PC 桁の残存プレストレスの復元設計を行った。

PC 鋼材の残存引張力の復元設計条件を表-3 に示す。PC 鋼材の残存引張力は、主に設計図書をもとに復元設計を行ったが、コンクリート弾性係数は材料試験結果を用いた。なお、乾燥収縮ひずみとクリープ係数に関しては、現行の設計基準⁴⁾では、対象桁の設計値⁵⁾から大きく変動していることから、対象桁の設計値に加えて現行の設計基準も考慮した。なお、PC 鋼材切断時の残存引張力は、式 (1) に示すように表-3 に示した条件にて G1 桁解体前の残存引張力を算出した後、解体状況を踏まえて、軌道などの付帯物の撤去および支間長短縮による曲げモーメントの変化や、桁断面形状の変化を考慮した G1 桁支間中央における PC 鋼材圆心位置のコンクリート応力変動量をもとに残存引張力の変動量を算出し、解体前の残存引張力と合算し、算出した。

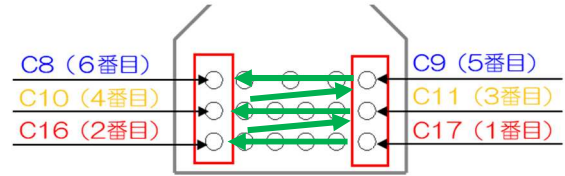


図-7 PC 鋼材切断順序

表-3 PC 鋼材残存引張力復元設計条件

項目	条件
初期導入引張力	0.67 σ_{pu} ~0.79 σ_{pu}
PC 鋼材配置	図-2 参照
緊張装置の内部摩擦	3%
セット量	5mm
シースと PC 鋼材間の摩擦係数	PC 鋼材 1m あたり： $\lambda=0.004$ 角変化 1 ラジアンあたり： $\mu=0.3$
コンクリート弾性係数	27.7kN/mm ²
乾燥収縮ひずみ	15 $\times 10^{-5}$ (設計値 ⁵⁾) 20 $\times 10^{-5}$ (現行基準 ⁴⁾)
クリープ係数	2.0(設計値 ⁵⁾) 2.7(現行基準 ⁴⁾)
PC 鋼材のリラクセーション率	5%

表-4 コンクリート合成応力度復元設計条件

項目	条件
荷重による曲げモーメント	試験時の仮支点間距離および桁断面形状より設定
断面定数	試験時の桁断面形状より設定
PC 鋼材の引張力	PC 鋼材切断試験結果の平均値より 復元設計結果より
PC 鋼材の偏心量	設計図書より設定

$$P_e = P_i + \Sigma \Delta P_i \quad (1)$$

ここで、 P_e ：切断時の PC 鋼材残存引張力、 P_i ：解体前の PC 鋼材残存引張力、 ΔP_i ：解体状況による PC 鋼材引張力の変化量とする。

PC 桁の残存プレストレスの復元設計条件を表-4 に示す。表-4 に示した各項目の値を式 (2) に代入し、G2 桁支間中央部の桁上縁・下縁の残存プレストレスを算出した。解体状況によって残存プレストレスが変化するので、表-4 に示す復元設計条件に対して、図-5 に示す STEP ③仮置きによる支間長の短縮、STEP ④下フランジのコンクリートのはつり作業における断面積減少を考慮し、算出した。

$$\sigma = \frac{M}{Z} + P \left(\frac{1}{A} + \frac{e}{Z} \right) \quad (2)$$

ここで、 σ ：コンクリート合成応力度(N/mm²)、 M ：自重による桁支間中央曲げモーメント(N・mm)、 Z ：主桁の断面係数(mm³)、 P ：PC 鋼材引張力の総和(N)、 A ：主桁の断面積(mm²)、 e ：PC 鋼材偏心量(mm)とする。また、PC 桁切断試験後に断面を観察したところ、設計通り PC 鋼材が配置されていることが確認できたため、PC 鋼材の偏心量は設計値を用いた。

4. 試験結果

4.1 圧縮強度と静弾性係数

圧縮強度、静弾性係数の試験結果を表-5に示す。圧縮強度は、弾性係数と比較するとばらつきは大きいものの、表-1に示す設計値を上回っていることが確認できた。一方、弾性係数は、すべての供試体でコンクリート標準示方書⁶⁾に示される表-1のコンクリート設計基準強度に対する弾性係数の設計値(31kN/mm²)を下回った。

圧縮強度のばらつきの原因として、圧縮強度が最も低かったコアの表面を観察すると、コアのセメントペースト部にて空隙が確認され、これらの空隙により圧縮強度が低下したと考えられる。弾性係数が圧縮強度に対する設計値に対して低かった原因は、セメントペースト部の空隙に加えて、粗骨材にも空隙が確認され、粗骨材の弾性係数が低かった可能性が推測される。さらに、コア試験体はウェブ上部、下部、支間中央、桁端など、様々な場所から採取したが、場所による偏りは確認できなかった。また、変動係数に関しても5.7%と低いことから、試験結果の妥当性は高いと推測される。G1桁から採取したコアの平均値は27.7kN/mm²であり、G2桁の平均値は27.6kN/mm²であることから、桁全体に使用されていたコンクリートが低弾性であったと考えられる。

4.2 PC鋼材引張試験

PC鋼材引張試験結果を表-6示す。引張強度は、すべての試験片で設計値(1550N/mm²)を上回る結果が得られ、

表-5 コンクリート圧縮試験結果

結果	平均値	変動係数
弾性係数(N/mm ²)	27.70×10 ³	0.057
圧縮強度(N/mm ²)	60.54	0.135

表-6 PC鋼材引張試験結果

結果	平均値	変動係数
弾性係数(N/mm ²)	1.992×10 ⁵	0.004
引張強度(N/mm ²)	1683	0.033

弾性係数においても設計値(2.0×10⁵N/mm²)と同じ結果が得られた。

4.3 PC鋼材切断試験

切断時のPC鋼材のひずみ変動量に弾性係数を乗じて算出したPC鋼材の残存引張力と復元設計値を図-10に示す。PC鋼材の残存引張力は、引張強度設計値(1550N/mm²)に対して約40~50%の範囲にあり、下段のPC鋼材(C16・C17)の残存引張力が、上段と中段のPC鋼材(C8・C9・C10・C11)に比べて、大きい傾向にある。また、復元設計値と比較して、上段と中段のPC鋼材の残存引張力は小さく、一方で下段に配置されているPC鋼材の残存引張力は大きい傾向にある。これは、PC鋼材の緊張順序が影響していると推測される。本試験で切断したPC鋼材の緊張順序は、図-2に示したように上段、中段、下段の順となっている。また、コンクリート弾性係数が



図-9 コンクリートコア表面

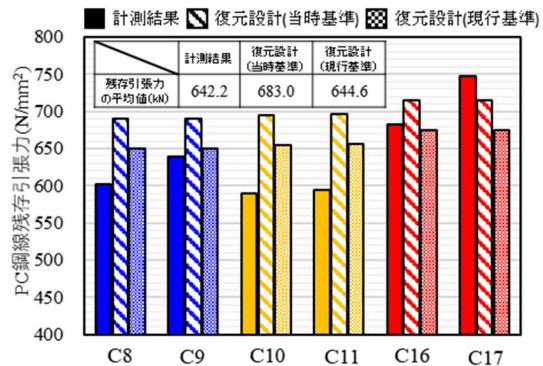
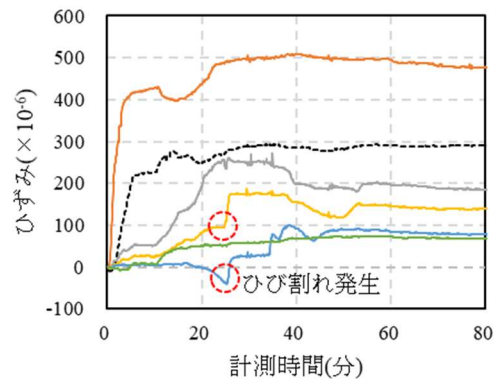
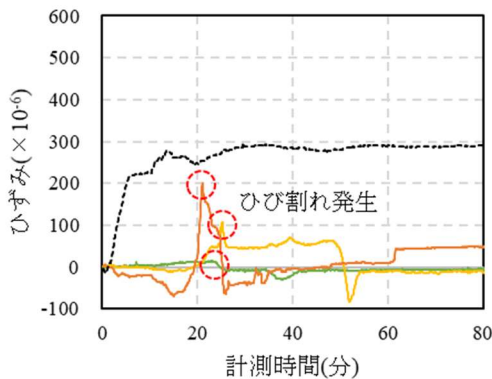
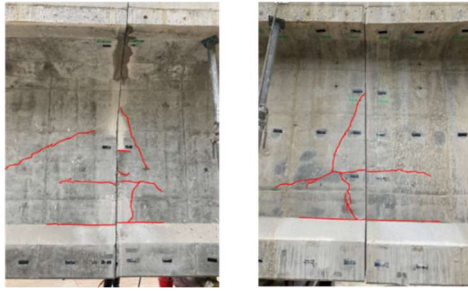


図-10 PC鋼材残存引張力



--- LFL — LFM — WL — WM — WU — UF



(a) L面 (b) R面
図-12 切断後 ひび割れ発生状況

設計値に対して低かったことから、先行して緊張された上段と中段の PC 鋼材において、弾性変形による引張力の減少量が設計値より大きくなり、上段と中段の PC 鋼材の残存引張力が復元設計値に対して、低い傾向にあったと推測される。

各 PC 鋼材の残存引張力と復元設計値の差は最大±10%程度であり、各 PC 鋼材の残存引張力と復元設計値の平均値を比較すると、現行設計基準の乾燥収縮ひずみとクリープ係数を用いた復元設計値と PC 鋼材残存引張力の平均値が一致している。そのため、各 PC 鋼材では設計値と誤差が生じているものの、断面全体で考えると設計値どおりの PC 鋼材引張力が残存していたと考えられる。

また、PC 鋼材切断試験の終了後には、支間中央で 1.3mm のたわみが確認された。

4.4 PC 桁切断試験

PC 桁切断試験中のひずみ経時変化を図-11 に示す。ここで、L 面+100mm と R 面+100mm 位置のひずみデータを代表した。切断開始から 20 分程度で、ひずみの急激な変化が生じた。これは、切断中に図-12 に示すようなひび割れが発生した影響と考えられる。ひび割れ発生によって周辺のコンクリートの応力が緩和しひずみが変動するので、プレストレスが解放されて生じたひずみはひび割れ発生以前のひずみであると考えられる。

また、R 面の方が解放されたひずみが大きい傾向が得られた。この原因として、切断方法による影響が大きいと考えている。ワイヤーソーで R 面から切断を始めたことにより先に応力が解放されてしまったため、切断面に面外方向の偏心モーメントが作用し、側面ごとによるひずみ差が発生したと考えられる。L 面における LFM, WM 位置では切断初期で、圧縮ひずみが生じていることからこの考察を裏付ける結果となっている。

次に、PC 鋼材の再定着挙動を観察するために、下フランジに貼り付けたひずみゲージで得られた結果を図-13 に示す。なお、図-13 に示す値は切断終了後のひずみが定常状態になってからの値である。

L, R 面の切断部近傍で解放されたひずみに差はみら

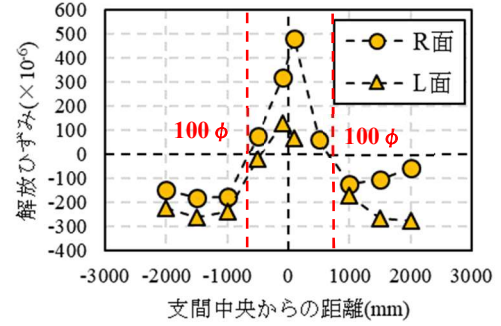


図-13 下フランジの解放ひずみ分布

れるものの、同じ傾向が得られた。両者とも支間中央か

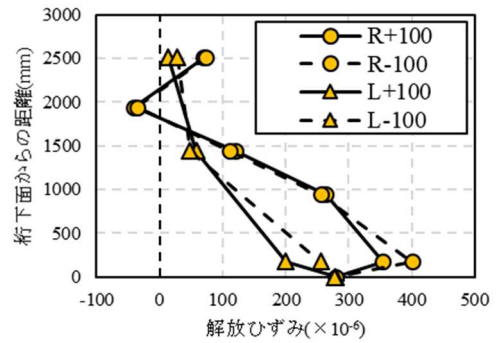


図-14 桁高さ方向の解放ひずみ分布

ら約 1000mm の位置から圧縮ひずみが横ばいになっている。PC 鋼材が切断された部分の近傍ではプレストレスが解放され引張りひずみが生じている。一方で、切断された部分から離れると、PC 鋼材とグラウトの付着によって徐々に圧縮応力が伝達されるため、圧縮ひずみが生じている。そのため、圧縮ひずみが横ばいになっている部分では十分に圧縮応力が伝達されて緊張力の減少は生じていないと考えられ、この現象は PC 鋼材の再定着挙動によるものと考えられる。コンクリート標準示方書⁶⁾では、プレテンション方式の場合において、表面が平滑な PC 鋼材の 定着長は 100φ と定められている。この値をポストテンション方式の対象桁へ適用した場合に想定されるプレストレス定着長は 700mm(100×7mm)である。図-13 の結果からも、支間中央から 700mm 以内の部分では圧縮ひずみが定常状態にはなっていないが、支間中央より 1000mm 以上離れた部分の計測点では圧縮ひずみが定常状態になっていた。

また、図-12 に示す切断後のひび割れ発生状況において、下フランジに沿って生じているひび割れは PC 鋼材の再定着挙動によって橋軸方向に局部的に圧縮応力が発生し、PC 鋼材が配置されている桁下縁付近のみ影響を強く受けたため、桁高さ方向に引張応力が発生したことが原因であると推測される。

次に、切断試験で得られた桁高さ方向のひずみ分布を

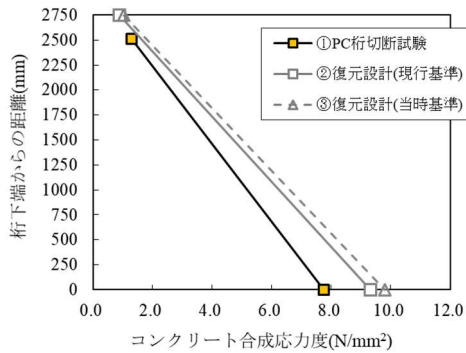


図-15 桁高さ方向のコンクリート応力分布

図-14に示す。ここで生じている解放ひずみ絶対値の差は、前述した切断方法による影響と考えられる。桁切断時には、桁の自重のみ作用している状態であるため、プレストレスが卓越する状態となっており、下縁での解放ひずみが大きくなっている。

PC切断試験で解放されたひずみに、表-5に示したコンクリート弾性係数を乗じて得た応力分布と、復元設計によって求められた桁上縁と下縁の応力を図-15に示す。ここで、PC桁切断試験では、側面によるひずみ差やひび割れ発生による影響が考えられるため、図-14に示す結果の上端と下端のそれぞれの平均値を使用した。下縁における復元設計(現行)と計測値を比較すると約16%の差が確認された。

以上から、PC鋼材切断試験と復元設計では整合性のある結果が得られたが、PC桁切断試験の結果のみ乖離した。この原因として、1つ目は季節変動による温湿度の変化、2つ目はコンクリート内部に存在するPC鋼材での値と、コンクリート表面で計測を行った値ということである。

二井谷ら²⁾の研究では、コンクリート表面のひずみから残存プレストレスを推定するときの誤差要因として、乾燥収縮に着目し、乾燥収縮による影響を除去する推定式を提案している。コンクリート内部と表面では乾燥収縮の進行度が異なるため、内部拘束応力が発生する。しかし、本論文における対象PC桁は、供用から50年経過しているため、乾燥収縮が断面内で一様に生じ、乾燥収縮による内部拘束応力は無視できると考えられるが、PC鋼材切断試験と、PC桁切断試験での差異が生じている。

また、早坂ら⁷⁾の研究では、実環境下における気象作用の影響評価を行っており、試験体スケールは本論文とは異なっているものの、実構造物においても応力状態を変えうるほどのひずみ変動が生じていることが確認されている。

以上より、コンクリート表面からの計測で残存プレストレスを評価する場合は、乾燥収縮による内部拘束応力だけではなく、気温や湿度の季節によってコンクリート

表面のひずみ変動する要因の影響であると考えられ、コンクリート表面から残存プレストレスを推定する場合には、乾燥収縮以外の外的要因が及ぼす影響を定量的に評価することが今後の研究課題となると考えられる。

5. 結論

50年以上長期供用された撤去PC桁に対して、PC鋼材切断およびPC桁切断を行うことでPC鋼材残存引張力および残存プレストレスを計測するとともに、設計図書をもとに復元設計を行うことで、計測値を検証した。本検討より得られた知見を以下に示す。

- (1) PC鋼材の残存引張力は、引張強度設計値に対して約40~50%程度であった。また、各PC鋼材の残存引張力と復元設計値の平均値は、現行設計基準の乾燥収縮ひずみとクリープ係数を用いた復元設計値と一致しており、全体的に設計値どおりの引張力がPC鋼材には残存していた。
- (2) PC桁切断試験によって得られた桁下縁のコンクリート応力度は、復元設計(現行基準)の値より約16%小さかった。この原因として、コンクリート表面に変形駆動力を与える気温や湿度の影響が考えられる。

謝辞：本実験を実施するにあたって、西日本旅客鉄道株式会社と広成建設株式会社の関係各位に多大なるご協力を賜りました。末筆ながら深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Botte, W. et al. : Assessment of posttensioned concrete beams from the 1940s: Large-scale load testing, numerical analysis and Bayesian assessment of prestressing losses, *Structural Concrete*, pp.1500-1522, 2021
- 2) 二井谷ら：コンクリート部材の有効応力の推定手法に関する研究，*コンクリート工学論文集*，Vol.20，No.2，pp.27-37，2009
- 3) 田村浩一：国鉄における土木構造物標準設計の概況，*コンクリート・ジャーナル*，Vol.6，No.1，1969
- 4) (財)鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計基準・同解説(コンクリート構造物)，丸善出版，2004
- 5) 日本国有鉄道：建造物設計標準 鉄筋コンクリート構造物および無筋コンクリート構造物，*プレストレスコンクリート鉄道橋*，1970
- 6) 公益社団法人 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書 設計編，丸善出版，2018
- 7) 早坂ら：セメント硬化体の時間依存変形に及ぼす気象作用の影響評価，*コンクリート工学年次論文集*，Vol.36，No.1，2014