

PC構造物のはつりおよび断面修復に関する実験的研究

㈱千代田コンサルタント 正会員 ○中井 督介
 日本道路公団 試験研究所 正会員 博士(工学) 長田 光司
 日本道路公団 試験研究所 正会員 野島 昭二
 日本道路公団 試験研究所 正会員 横山 和昭

1. はじめに

コンクリート構造物が塩分等により構造物内部の鋼材が腐食した場合、コンクリート部材をはつりとして断面修復をする必要がある。しかしながら、PC 構造物において断面をはつる場合の周辺コンクリートのプレストレスの変化や断面修復後の力学的挙動に関する研究事例は少ない。そこで本研究では、適切なはつり方法や断面修復材に求める性能を明らかにすることを目的として、PC 梁に対するはつりの影響および断面修復後の耐荷挙動について実験結果と解析結果との比較を行ったものである。

2. 実験概要

(1) 供試体

本検討に使用した供試体の形状寸法を図-1 に示す。本研究で使用した供試体は、総プレストレス量 180kN (軸圧縮応力 5.0N/mm²) の PC の梁供試体 (以下、「PC 梁」と呼ぶ) で、PC 梁製作時に図-2 に示すとおり鉄筋にひずみゲージを設置しており、プレストレス導入から 304 日経過したものである。

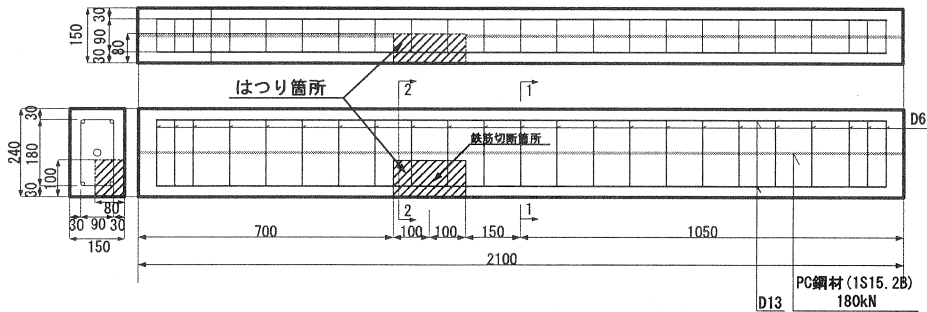


図-1 PC 梁供試体

(2) はつりの影響に関する計測

PC 梁を図-1 に示す範囲で、ハンマードリルを用いてはつり取った。はつりが周辺のプレストレス分布に与える影響は、図-1 の断面 1-1 に示すようにはつり断面近傍と断面 2-2 に示すようにはつり断面内でひずみの計測を行うことで確認するものとした。断面 1-1 お

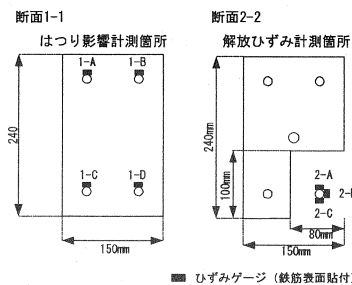


図-2 ひずみ計測箇所

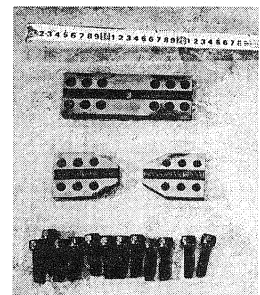


写真-1 鉄筋接続治具

よび断面 2-2 における計測位置を図-2 に示す。また、はつり終了後、はつりにより鉄筋が負担する拘束ひずみを計測する目的で、露出した鉄筋にひずみゲージを設置後、鉄筋を切断して解放ひずみを計測した。なお、解放ひずみを計測後、鉄筋を切断した箇所は、写真-1 に示す機械継手を用いて復旧した。

(3) 断面修復

はつり作業およびはつり作業に伴うプレストレスの変化等に関する計測終了後、はつり箇所をポリマーセメントモルタル系の断面修復材を用いて修復した。断面修復材の仕様を表-1 に示す。

表-1 断面修復材の仕様

圧縮強度 (28日)	55.0(N/mm ²)
付着強度 (14日)	2.0(N/mm ²)

(4) 曲げ載荷試験

載荷の状況を図-3 に示す。曲げ載荷試験は、載荷位置を断面修復部が中央となるように支持し、剛材等を介し PC 梁に対して 2 点載荷となるように作用させた。載荷荷重は、鉄筋降伏までは 2.0kN ずつ荷重を増加させながら載荷を行った。鉄筋降伏後は、PC 梁が圧縮破壊を起こすまで変位制御により載荷を行った。なお、載荷中はコンクリートと断面修復材との一体化性状を確認する目的で、図-3 に示す位置にπ型ゲージを設置するものとした。

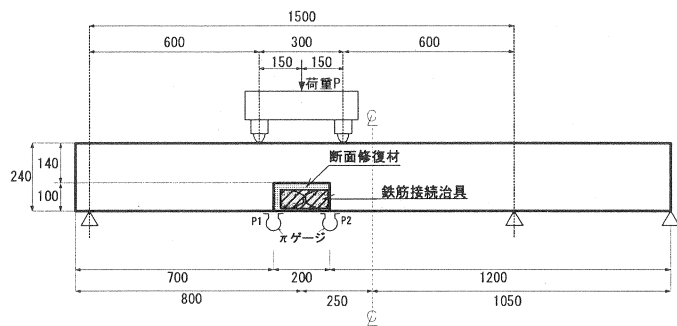


図-3 耐荷試験概要

(5) 実験状況

本実験のはつり、鉄筋切断、鉄筋接続および断面修復の状況写真を表-2 に示す。

表-2 実験状況

ハンマードリルによる はつり作業	鉄筋切断による 解放ひずみの計測	鉄筋接続治具設置	断面修復

3. FEM 解析概要

本検討に使用した解析モデル概要を図-4 に示す。本解析では、はつりによるプレストレスの変化、ならびに耐久性を考える上で重要である断面修復後のひび割れ発生等の検討を主目的としているため、材料線形 FEM ソフト NASTRAN を用いた。各要素は 8 節点ソリッド要素 (積分点 8 点) により構成され、全要素数は 25200 要素であった。解析モデルは、3 次元の梁モデルを要素分割し、鉄筋の配筋箇所位置する要素に鉄筋の材料特性を導入し、それ以外の箇所に位置する要素にコンクリートの材料特性を導入し、コンクリートと鉄筋との付着問題は考慮しないものとした。また、コンクリートの材料特性として、弾性係数：

30000N/mm², ポアソン比: 0.2, 鉄筋の材料特性として, 弾性係数 210000N/mm², ポアソン比: 0.3 とした. プレストレスの再現には, プレストレスが作用した要素面に静的に分布させた荷重を用いることとし, クリーブによるプレストレス力の低下を 15%の見込みで考慮に入れ 150kN の荷重を作用させることとした.

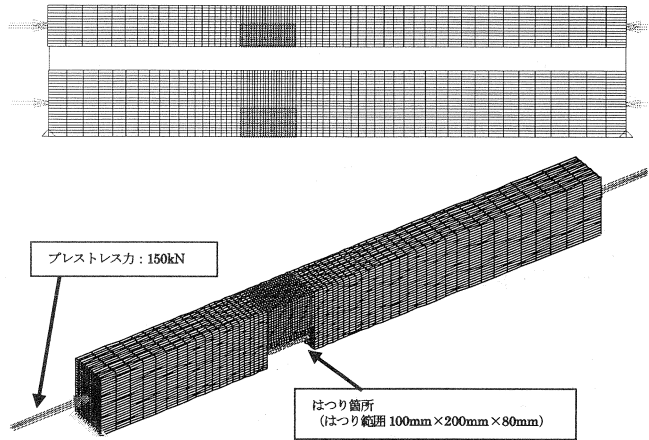


図-4 FEM 解析モデル概要

4. 実験結果および考察

(1) はつりの影響の確認

はつり前の各鉄筋ひずみをゼロとした場合はつり後および鉄筋切断後のひずみの変化量を図-5 に示す. また, FEM 解析の結果得られたはつり前からの同計測位置のひずみ変化量を図-5 中に示し, 表-3 にはつり前後における周辺ひずみ変化の計測値と FEM 解析値との比較を示す.

表-3 はつり前後による周辺のひずみ変化 (=はつり終了後の値-初期値 図-5 中)

	実験値[μ]	FEM 解析値[μ]
1-A	5.0	11.4
1-B	-10.0	-10.5
1-C	-7.0	-8.1

①1-B, 1-C (図 2 中の断面 1-1) の計測結果

実験の結果, 断面 1-1 における 1-B および 1-C では, はつり終了後, 表-3 に示すように各々 10.0 μ および 7.0 μ 圧縮ひずみが増加している. また, はつりによる拘束の影響により, 残された鉄筋には圧縮応力が発生しており, 鉄筋切断してこの圧縮応力を解放することにより, 図-5 に示すとおり 1-B では 22.0 μ, 1-C では 13.0 μ 各々圧縮応力のひずみが増加した. 以上の計測値に対して, はつりを断面欠損と考え, はつりの有無による FEM 解析結果の差から得られた各計測地点におけるひずみの変化は, 1-B では 15.7 μ, 1-C では 11.4 μ であり, 実験結果と良く一致している.

②1-A (図 2 中の断面 1-1) の計測結果

断面 1-A では, はつりの影響による面外変形により, はつり後引張応力が発生している. はつりの前後において, 実験では 5.0 μ であったが解析では 11.4 μ であり, 実験値と解析値に差が認められた. はつり後の鉄筋の拘束を, 鉄筋を切断し解放した結果, 鉄筋切断後の引張ひずみは実験値が 15.0 μ および解析値が 17.6 μ となり良く一致した.

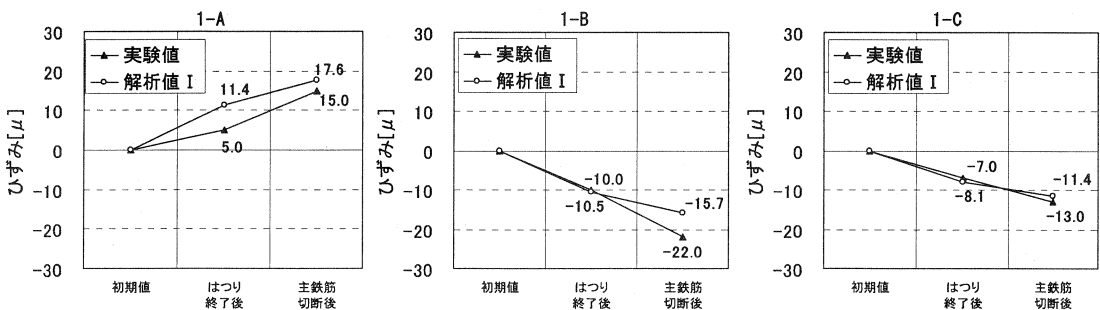


図-5 はつり後及び鉄筋切断後のひずみ変化量

③はつりの影響に関する考察

図-5に示されたとおり、はつりによりプレストレスが増加する箇所でも面外変形により引張応力が発生する箇所でも、実験値と解析値とは比較的良く一致した。この結果から、本供試体のような単純な形状のPC梁では、はつり部分を断面欠損として考え、はつりにより残された鉄筋の拘束を考慮することにより、はつりによるプレストレスの変化を推定することが可能と思われる。

(2)鉄筋の応力状態の確認

①鉄筋切断時の解放ひずみの計測値

はつり後に残された鉄筋の応力状態を確認する目的で、鉄筋の解放ひずみの計測を行った結果を表-4に示す。3方向に設置されたひずみ計のうち、図-2に示すとおり上下方向に180度の位置関係にある2-Aと2-Cのひずみ差は25μであった。一方、梁に対して水平方向の位置関係にある2-Bと2-Aまたは2-Cとの差は概ね100μであった。この結果から、はつりによる拘束の影響により残された鉄筋には、水平方向の曲げが発生していたと推定される。鉄筋の切断による解放ひずみ値は、鉄筋の曲げの影響を補正するために180度の位置関係にある2-Aと2-Cの平均値を用いることとし、表-4に示すとおり鉄筋切断時のひずみは703μを得た。鉄筋切断時の解放ひずみにはプレストレスによるひずみ、クリープによるひずみ、乾燥収縮によるひずみ、はつりにより鉄筋が負担する拘束ひずみが加算されており、今回のゲージははつり後に貼り付けたものであるため、これらの合計が計測されたこととなる。

②プレストレス導入から73日後の鉄筋の圧縮ひずみ値

計測の都合上、304日後のひずみ計測の結果はないが、プレストレス導入から73日目までのひずみ計測を行っているため、この値を参考にすることとした。鉄筋切断時の解放ひずみ計測位置とは異なる位置で、プレストレス導入前を0とした場合のプレストレス、クリープ、乾燥収縮の合計の圧縮ひずみは、360μ～544μで、平均値は456μであった。

③道路橋示方書によるひずみ量

これらの値が、道路橋示方書に示すひずみ量で発生しているとし、プレストレス導入までの養生期間を28日、プレストレス導入から鉄筋切断までの日数を304日とするとその値は以下の通りとなる。

なお、梁供試体の弾性係数は、28日の材料試験結果から $E_c=34400[N/mm^2]$ とした。

・プレストレスによるひずみ

$$\sigma_c = P/A = -180000 / (150 \times 240) = -5 [N/mm^2]$$

$$\epsilon_c = \sigma_c / E_c = -5 / 34400 \times 10^6 = -145 \mu$$

・クリープによるひずみ

$$h_{c1} = \lambda \cdot A_c / u = 3 \times 36000 / 780 = 138.5$$

$$\therefore \beta_s(304) = 1.3, \beta_s(28) = 0.5$$

$$\phi(t, t_0) = \phi_{d0} \cdot \beta_s(t-t_0) + \phi_{R0} \{ \beta_s(t) - \beta_s(t_0) \}$$

$$\phi(304, 28) = 0.4 \times 1 + 2 \{ 1.2 - 0.5 \} = 1.6$$

$$\epsilon_c = -145 \times 1.6 = -232 \mu$$

・収縮によるひずみ

$$h_{d1} = \lambda \cdot A_c / u = 3 \times 36000 / 780 = 138.5$$

$$\therefore \beta_s(304) = 1.1, \beta_s(28) = 0.5$$

$$\epsilon_{CS(t, t_0)} = \epsilon_{S0} \cdot \beta_s(t-t_0)$$

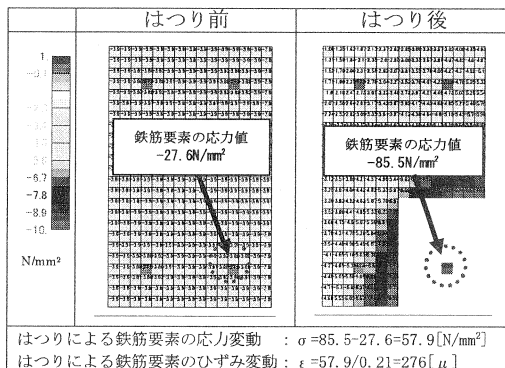
$$\epsilon_{CS(304, 28)} = -25 \times 10^{-5} \cdot (1.0 - 0.6) = 1.5 \times 10^{-4} = -100 \mu$$

・(プレストレスによるひずみ) + (クリープによるひずみ) + (収縮によるひずみ) = 477 μ

表-4 梁供試体の計測結果

計測位置	鉄筋切断時の解放ひずみ[μ]	
	計測値	平均値
2-A	715	703
2-B	802	
2-C	690	

表-5 はつり前後の鉄筋の軸方向応力状態



④はつりにより鉄筋が負担する拘束ひずみ

鉄筋切断による解放ひずみの計測は、②および③よりプレストレス導入から 304 日後に行ったが、73 日後の計測結果でも道路橋に基づく推定値に漸近する傾向を示した。このため、解放ひずみ計測時の鉄筋に導入されていたプレストレス、クリープ、乾燥収縮によるひずみの合計値は 477 μ 程度と考えてよいと判断された。はつりにより鉄筋が負担する拘束ひずみを鉄筋切断時の解放ひずみとはつり前に鉄筋に導入されていたひずみとの差とし、この値を道路橋示方書に基づく計算を用いれば、はつりにより鉄筋が負担する拘束ひずみは 226 μ (=703-477) となる。

⑤FEM 解析値との比較および考察

はつり前後の鉄筋の軸方向応力度を表-5 に示す。この解析では、クリープおよび収縮により鉄筋に発生する応力度は加算されていないが、はつりにより鉄筋が負担する拘束応力は、はつり前後の応力の差として算出できる。FEM 解析の結果得られたはつりによる拘束応力度は 57.9 N/mm²、ひずみとしては 276 μ であり計測値とほぼ一致しているといえる。

以上の結果から、はつり範囲によっては、残された鉄筋に大きな拘束ひずみが発生するが、その値は FEM 解析により予測可能と判断された。

(3) 断面修復後の補修された PC 部材の耐荷挙動

①荷重変位関係

断面修復後の補修された断面における荷重と載荷点変位の関係を図-7 に示す。各載荷ステップにおける目視観察によれば、50kN で断面修復材と修復対象コンクリート (以下、「母材コンクリート」と呼ぶ) との界面付近でひび割れ発生が確認された。ひび割れ発生直後の供試体側面から見たひびわれ進展状況の模式図を図-8 に示す。

荷重を徐々に増加した結果、断面修復材部も含めひび割れが発生し 120.8kN で鉄筋が降伏した。載荷は 124.2kN まで継続され、同荷重において圧縮破壊により終局状態となったため載荷を中止した。

② π 型ゲージによる計測値

荷重と π 型ゲージによる相対変位の計測値を図-9 に示す。2本の線は断面修復材の両端に設置した π 型ゲージの計測値を示している。両ゲージの相対変位は 14kN まではほぼゼロであったが、14kN を越えた時点で両ゲージの計測値の急激な増加を検出している。以上の結果から、目視では確認できなかったが、14kN 付近で図-8 に示すようなひび割れが発生したと推定される。

③断面耐力の計算結果

市販の RC 断面計算プログラムを用いて、母材コンクリートの材料諸元をもちいて RC 断面およびプレストレス導入断面におけるひびわれ発生荷重と鉄筋降伏荷重を算出した結果を表-6 に示す。表-6 に示されたとおり、供試体に導入されているプレストレスをひび割れ発生ひずみに考慮した場合にひび割れ発生荷重は 39.8kN、RC 断面として算出した場合 15.5kN となった。

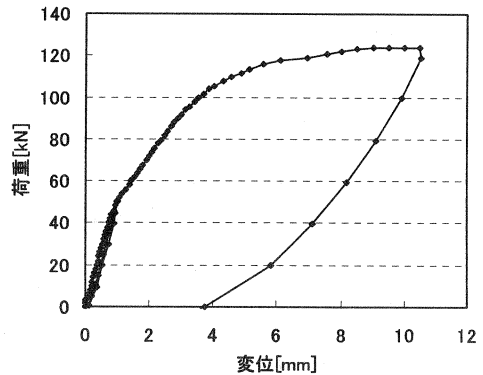


図-7 荷重-変位曲線

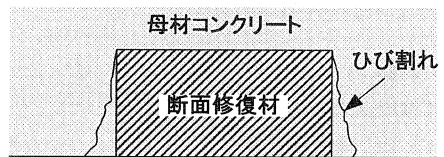


図-8 母材コンクリートと断面修復材界面付近のひび割れ

④母材コンクリートと断面修復材界面のひび割れ発生挙動

平面保持が成立している場合、プレストレス導入の有無に関わらず供試体下縁に発生する引張ひずみがひび割れ発生ひずみを上回ったときにひびわれは発生する。しかしながら、プレストレスが導入されている場合、ひずみの重ね合わせによりひび割れ発生ひずみは、導入された圧縮ひずみ分大きくなる。

表-6 の計算結果 15.5kN と π 型ゲージの計測結果 14kN とを比較すると計測結果の値が多少低いが、本供試体では、母材コンクリートと断面修復コンクリートの界面付近では RC 断面として挙動しているといえる。

本検討では断面修復材に表-1 に示す仕様のものを使用した。本供試体における断面修復材の弾性係数の計測値は無いが、一般にポリマーセメントモルタル系の断面修復材の弾性係数はコンクリートに比べ小さい傾向にあるため、本実験に使用した断面修復材の引張ひずみは母材コンクリートの引張ひずみより大きいと予想される。実際、供試体においては、ひび割れ発生時においては図-8 に示すとおりひび割れは母材コンクリート内で発生し、断面修復コンクリート内ではひび割れは認められなかった。

⑤ひび割れ発生挙動の結果から断面修復材に求められる性能

本実験結果から、はつりが行われた母材コンクリートでははつり面周辺で導入プレストレスの一部が損失し、断面修復後も RC 断面として挙動していると推定され、断面修復材のひび割れ発生ひずみが母材コンクリートよりも大きい場合、ひび割れは母材コンクリート側で発生すると思われる。したがって、修復後の部材の耐久性を考慮して、ひび割れ発生荷重を最大限にするためには、母材のひび割れ発生ひずみよりも大きなひび割れ発生ひずみの大きな断面修復材を用いる必要があると思われる。今後、弾性係数の異なる断面修復材やはつり範囲の異なる供試体を用いて同様の検証を行う必要があると考えられる。

6. 結論

本検討結果のまとめを以下に示す。

- (1) PC 構造物をはつると、周辺のコンクリートのプレストレスは、断面欠損の影響により増加するが、その量は FEM 解析により十分な精度で把握できることが明らかとなった。
- (2) はつり範囲によっては、残された鉄筋に大きな拘束ひずみが発生するが、その値は FEM 解析により推定可能と判断された。
- (3) 本研究で検討したような比較的大きな断面を修復し、補修された PC 梁は、母材コンクリートより大きなひび割れ発生ひずみの断面修復材を用いた場合、断面修復材界面の母材コンクリートがひび割れ発生ひずみに達したとき、ひび割れが発生すると考えられる。これらの挙動は、断面修復範囲や、断面修復材の物性により異なる可能性もある。今後、弾性係数の異なる断面修復材やはつり範囲の異なる供試体を用いて同様の検証を行い、断面修復材に求められる性能についての検討を行う必要がある。

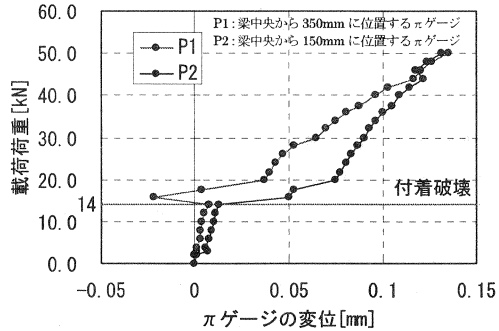


図-9 πゲージによる計測値

表-6 設計計算モデルの概要

	TYPE1	TYPE2
材料諸元		
鉄筋：SD295		
PC 鋼材：SWPR7		
コンクリートの引張強度	2.87 N/mm ²	2.87 N/mm ²
PC 鋼材の軸力	180kN	0
ひび割れ発生荷重	39.8 kN	15.5 kN
鉄筋降伏荷重	103.3kN	53.3kN