

補修の有無がプレテンションPC部材の耐荷性能に及ぼす影響

長岡技術科学大学 学生会員 ○番場 俊介
東京大学生産技術研究所 正会員 田中 泰司
長岡技術科学大学 正会員 下村 匠

Abstract : In this study, the load carrying capacity of prestressed concrete (PC) structure and the stress state of prestressing steel bars after the patching repair were investigated by conducting bending tests with corroded and non-corroded PC beams. As a result, the reduction of load carrying capacity is caused by prestress loss due to patching repair, joint between repaired sections, and small strength of repairing materials. In case step-by patching repair is performed, the prestress loss due to patching repair is able to be prevented somewhat, because of re-distribution of prestress in the repaired sections.

Key words : Prestressed Concrete Beams, Corrosion , Patching repair method , Load carrying capacity

1. はじめに

コンクリート構造物に生じる劣化現象は種々あるが、その中でも塩害による鋼材腐食は構造性能に直接影響を及ぼす場合が多いことから、この種の劣化が生じたコンクリート構造物の維持管理は重要視されている。塩害により鉄筋腐食が生じたコンクリート構造物の補修方法はさまざまな工法が提案されており、その中でも断面修復工法は適用事例が多い。プレストレストコンクリート(PC)部材に断面修復を適用した場合、断面はつりに伴いプレストレス力が減少することから、補修直後の構造性能は補修前と比べ低下する。特に、大断面修復となる場合には、プレストレス力の減少量が大きくなるとともに、既設コンクリート部の応力が過大となりクリープ変形が進むことも懸念される。そこで、本研究では、段階的に断面修復を行うことで既設コンクリートへの応力増加負担を低減させる方法を提案するとともに、断面修復に伴う部材の構造性能とPC鋼材の応力状態の変化を明らかにすることを目的として、非腐食状態および、暴露により腐食させたプレテンションPCはり部材に対して、段階的な断面修復を適用し、曲げ載荷試験を実施した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-1に試験体形状を示す。試験体は断面が100×150mmの短形断面で、長さが2200mmのプレテンションPCはりである。鋼材にはφ2.9-3本より線(SWPD3L)を上下対称となるように2本ずつ配筋し、定着部補強のために支点部にせん断補強筋(D6)を配筋した。試験体に導入した初期プレストレス量は、道路橋示方書において供用中の許容限界値として定められている1170N/mm²とした。プレストレス力による初期のコンクリート断面の圧縮応力は6.18N/mm²である。

試験体は暴露試験によって腐食させ、図-1(a)に示す腐食領域に、1年間塩水噴霧を行った。その際、温度40度の環境で1日塩水噴霧-6日乾燥を繰り返す乾湿繰り返し条件とすることで試験体内部に塩分を十分に浸透させた。塩水噴霧試験終了時点では腐食ひび割れ等の変状は確認できなかったため、さらに3年間、屋外暴露させた。なお、PC鋼材に沿った腐食ひび割れは暴露1年後に確認された。コンクリート構造部材の構造性能は定着の劣化状況によって大きく変わり得るが、飛来塩分による塩害劣化の場合、桁端には横桁が配置されているので、かぶりが大きくなり、他の部位に比べて腐食しに

表-1 実験パラメータおよび実験結果

試験体名	断面修復の有無	断面はつりの分割数	最大腐食率 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)		弾性係数 (kN/mm ²)		曲げひび割れ発生荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	破壊モード	
				既設部	補修部	既設部	補修部				
シリーズ1	N	無し	-	55.7	-	40.9	-	8.69	23.6	曲げ引張破壊	
	C-0y	無し	13.6(7.2 [*])	67.5	-	36.5	-	7.34	20.7	鋼材破断	
	P-0y	有り	4	8.9	70.1	50.3	41.4	21.1	4.50	11.9	-
シリーズ2	P_All	有り	1	-	64.1	45.7	38.2	19.4	4.88	23.2	曲げ引張破壊
	P_2		2	-	63.0	43.2	39.7	19.5	6.64	23.4	曲げ引張破壊

※破断箇所における腐食率

くいことなどを勘案し、本実験では定着が確保された条件で試験を行うこととした。定着部の防錆のため、両端から150mmの領域をタール系塗料にて被覆した。

実験パラメータは表-1に示すように、断面修復の有無と断面はつりの分割数であり、それぞれシリーズ1とシリーズ2に分類される。なお、シリーズ2は非腐食試験体に対して段階的な断面修復を適用したものであり、パラメータは対象断面を一度にはつり出す場合と、2分割で補修する場合の2水準である。

2.2 補修概要

図-2に断面修復の分割図を示す。本研究の試験体は鋼材が上下段に2本ずつ配筋されているため、補修対象となる下段での分割方向は、はり軸方向および奥行方向となる。シリーズ1における断面修復は図-1(a)に示す腐食領域を対象とし、はり軸方向に2分割、奥行方向に2分割の計4分割、シリーズ2では図-1(b)に示すはつり領域を対象とし、P_2試験体では奥行方向に2分割で断面修復を行った。4分割の場合には図-2の①-③-②-④の順番で、2分割の場合は、①②-③④の順で施工を行った。このように奥行方向に一部の硬化コンクリートを残すことで、補修の際の応力解放を抑制することを意図している。図-3に示す位置にひずみゲージを貼付し、プレストレスカの再分配に伴うコンクリートの変形量を計測した。なお、補修断面におけるプレストレスカの再分配を確認する目的で、補修材硬化後に図-3に示す位置にひずみ

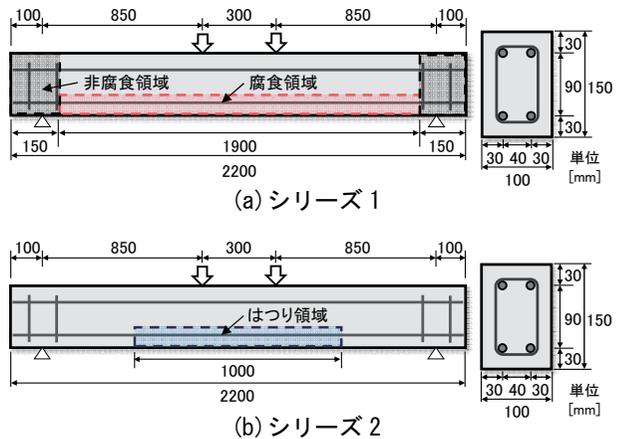


図-1 試験体形状

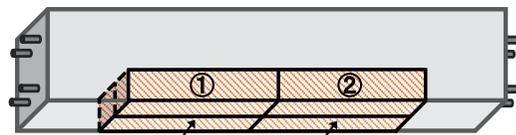
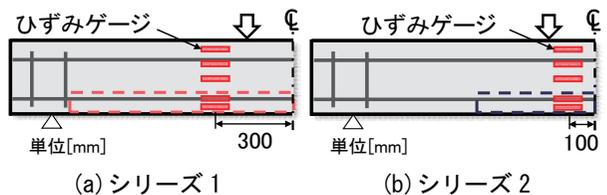
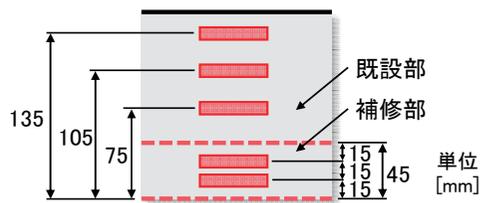


図-2 断面修復の分割図



(a) シリーズ1 (b) シリーズ2



(c) 拡大図

図-3 ひずみゲージ貼付け位置

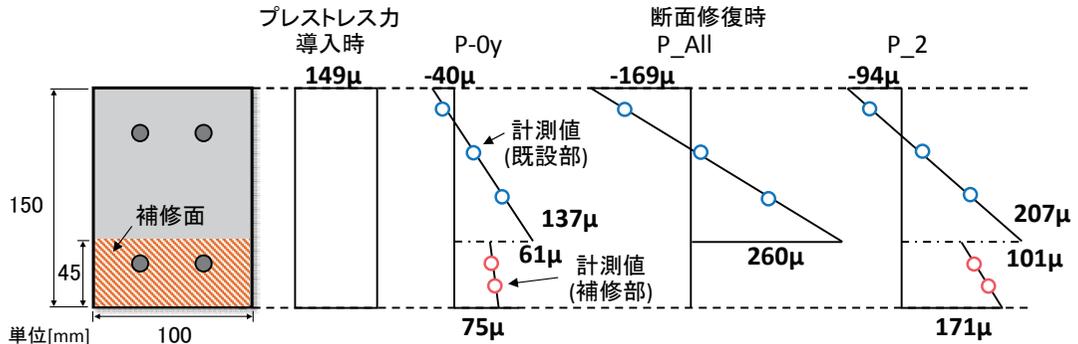


図-4 コンクリート断面のひずみ分布 (圧縮正)

ゲージを貼付した。また、断面修復材にはポリアクリル酸エステル(PAE)系ポリマーセメントモルタルを用いた。

2.3 載荷方法

載荷は、等曲げ区間長300mm、支点間長2000mmの単純支持・2点集中載荷の荷重制御による曲げ載荷とした。計測項目は、載荷荷重、中央・支点変位、コンクリートのひずみである。コンクリートのひずみは、上面は梁中央に1か所、下面は等曲げ区間内に6か所ひずみゲージを貼付して計測した。

載荷試験終了後、試験体からは取り出した鋼材は、10%濃度のクエン酸水素二アンモニウム水溶液に常温(約10℃)で24時間浸漬させ、腐食生成物を除去した後に質量を計測した。質量減少率の測定は、腐食区間(1900mm)を6等分(両端部のみ350mm)に切断して実施した。

3. 実験結果

3.1 断面修復結果

図-4にシリーズ1およびシリーズ2のコンクリート断面におけるプレストレス力導入時と断面修復時に生じたひずみ増分分布をそれぞれ示す。図-4により、プレストレス力導入時では断面内の圧縮ひずみは149μと一様に作用していたが、P-0y試験体の断面修復時には、断面はつりに伴うプレストレス力の再分配により、既設部の上縁で-40μ、下縁で137μの圧縮ひずみが生じた。また、最初に補修した部分の上縁で圧縮ひずみは61μ、下縁で75μとなり、分割補修をすることで、補修部においてもプレストレス力の再分配が生じた。一度に補修を行うP_All試験体では、補修によって既設部の上縁で-169μ、下縁で260μの圧縮ひずみが発生したのに対し、奥行き方向に2分割して断面修復を行ったP_2試験体では、既設部の上縁で圧縮ひずみが-94μ、下縁で207μとなり、断面修復を2分割することで既設コンクリートの変形が抑制された。このことから、断面はつりの分割数を増やすことでプレストレス力の再分配に伴う既設コンクリートの変形を更に抑制できるものと考えられる。

以上のことから、断面修復の際に、一度には取り出す場合では補修部のプレストレス力は解放され無応力状態となるが、段階的な断面修復を行うことによって、補修部の断面はつりに伴うプレストレス力減少の抑制ならびに、既設コンクリートへの応力増加負担を低減できることが示された。

3.2 曲げ載荷結果(シリーズ1)

(1) 腐食性状

図-5に各試験体の暴露後の腐食性状、図-6に各試験体の腐食区間における腐食率分布を示す。図-5より、両試験体とも鋼材軸に沿った腐食ひび割れが発生した。また、図-6より、鋼材位置によって腐食率が異なり、特に試験体端部において腐食が卓越した。これは、定着部防錆のために被覆した非腐食領域と、腐食領域との界面におけるマクロセル腐食に起因するものと考えられる。

(2)破壊性状

図-5に各試験体の破壊ひび割れ性状を示す。N試験体では、はり下縁に概ね等間隔で曲げひび割れが発生、進展し、荷重点付近のはり上縁の圧壊による曲げ引張破壊に至った。一方、C-0y試験体ではN試験体同様、概ね等間隔で曲げひび割れが発生したが、曲げひび割れがはり上縁まで達せずにPC鋼材の破断により破壊に至った。また、P-0y試験体に関しては、荷重の際に破裂音とともに荷重が低下する現象が数回観察されたのちに荷重を終了した。試験終了後に鋼材をはつり出したところ、鋼材破断が確認できなかったため、補修材と鋼材のすべりが生じたものと推察される。終局に至る前に荷重を終了したため、P-0y試験体については破壊モードおよび最大耐力の特定には至らなかった。さらに、P-0y試験体の荷重ひび割れは、補修部での鋼材軸直交方向の継ぎ目で発生し、ひび割れの分散は見られなかった。

(3)荷重変位関係

表-1にシリーズ1の曲げ荷重結果の一覧、図-7に荷重と中央変位の関係を示す。なお、図中に示す破線は曲げ耐力の計算値であり、C-0y試験体では鋼材破断箇所における腐食率、P-0y試験体では最大腐食率を用いて算出している。図-7より、全ての試験体において初期剛性が概ね同程度の結果となった。これは曲げひび割れ発生前は、腐食の有無にかかわらず、PC部材が弾性体として振る舞うためである。曲げひび割れ発生後の部材剛性は、曲げひび割れ発生荷重が低下するほど小さくなる結果となった。この原因としては、腐食による鋼材比の減少のほか、腐食ひび割れの発生による付着の低下の影響が考えられる²⁾。

図-8にシリーズ1における曲げひび割れ発生荷重および最大荷重を示す。曲げひび割れ発生荷重の計算値は以下の式により求めた。

$$M_{cr} = \frac{I}{h/2} (f_b + \sigma'_{pu} + \sigma'_{pd}) \quad (1)$$

ここで、 M_{cr} : 曲げひび割れ発生モーメント、 σ'_0 : はり部材下縁における応力、 I : 矩形断面の断面二次モーメント、 h : 梁高さ、 f_b : 曲げひび割れ強度であり、 f_b はコンクリート標準示方書「設計編」³⁾より求めた。 σ'_{pu} は上側のPC鋼材のプレストレス力による引張縁の圧縮応力であり、クリープ等の

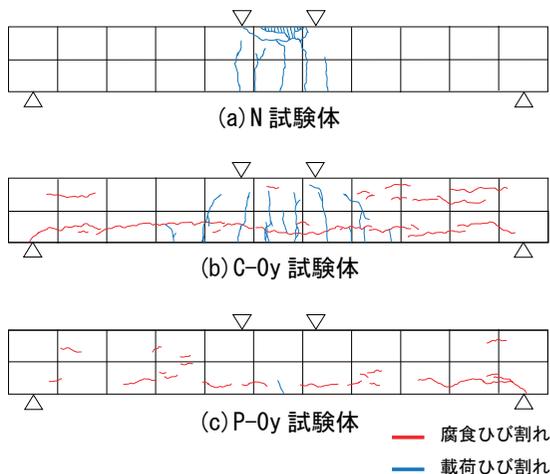


図-5 ひび割れ状況(シリーズ1)

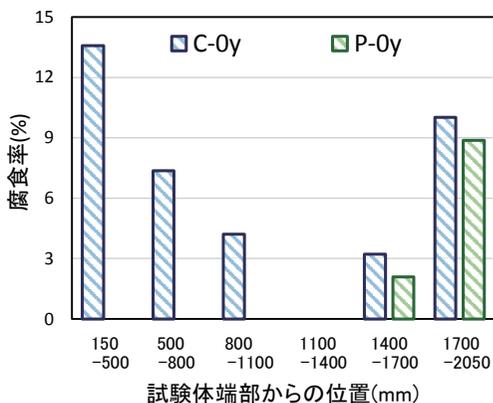


図-6 鋼材の腐食率分布

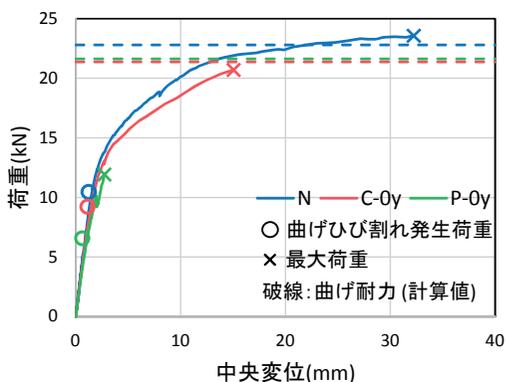


図-7 荷重中央変位(シリーズ1)

影響を考慮した有効プレストレスではなく、導入したプレストレスより算出した。 σ'_{pd} は下側の PC 鋼材のプレストレス力による引張縁の応力であり、鋼材の質量減少率(断面積減少率) x より以下の式により求めた。

$$\sigma'_{pd} = x \cdot \sigma'_{pd0} \quad (2)$$

ここで、 σ'_{pd0} ：腐食がない場合の下側の PC 鋼材のプレストレス力による引張縁の応力である。

また、曲げひび割れ発生荷重の計算値では、比較のために本研究の試験体を RC 断面とした場合における計算値も算出した。最大荷重の計算値は、腐食による断面減少量が質量減少率と一致すると仮定し、一般の PC 断面の計算法を用いて算出した。

図-8より、鋼材腐食に伴い、曲げひび割れ発生荷重および曲げ耐力がともに低下していることがわかる。また、その低下量は腐食量を考慮することでおおむね計算可能であるといえる。一方、断面修復を適用すると断面修復材に導入されるプレストレス力は分割法を用いても比較的小さいことに加え、補修部での継ぎ目で曲げひび割れが発生したことから、曲げひび割れ発生荷重は顕著に低下した。しかしながら、RC 断面とした場合の計算値よりは僅かに上回っており、このことから、分割法を用いることで、一度にはつり出す場合と比べ、ある程度プレストレス力の減少を抑制できるものと考えられる。断面修復による曲げひび割れ発生荷重の低下量をより正確に評価する場合には、断面修復の断面はつりに伴う残存プレストレス力の減少、段階的な断面修復による補修部での継ぎ目の影響、補修材の材料強度を詳細に考慮する必要がある。

3.3 曲げ載荷結果(シリーズ2)

(1)破壊性状

図-9に各試験体の破壊ひび割れ性状を示す。断面修復の有無によらず、等曲げ区間を中心に曲げひび割れが分散して発生した。いずれの試験体においても、載荷点付近のはり上縁の圧壊による曲げ引張破壊に至り、断面修復によって破壊モードが移行することは無かった。このことから、シリーズ1のP-0y試験体でほとんどひび割れが発生しなかったことは、腐食と断面修復の複合的な機構に基づくものと考えられる。

(2)荷重変位関係

表-1にシリーズ2の曲げ載荷結果の一覧、図-10に荷重と中央変位の関係を示す。図-10より、曲げひび割れが発生するまでの初期剛性は概ね同程度となったが、曲げひび割れ発生以降の剛性は断面修復した試験体で低下した。曲げひび割れ発生後の剛性に関しては、ひび割れ断面修復の分割数の影響は小さかった。

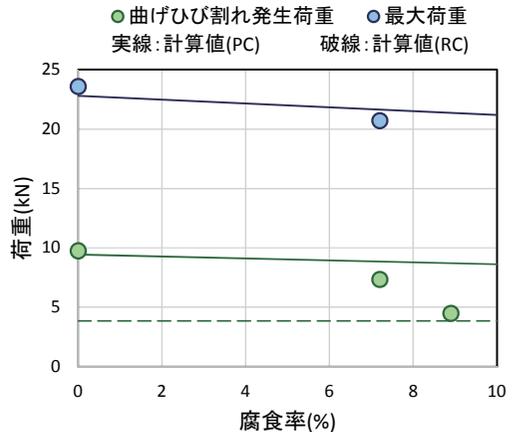


図-8 曲げひび割れ発生荷重・最大荷重と質量減少率の関係(シリーズ1)

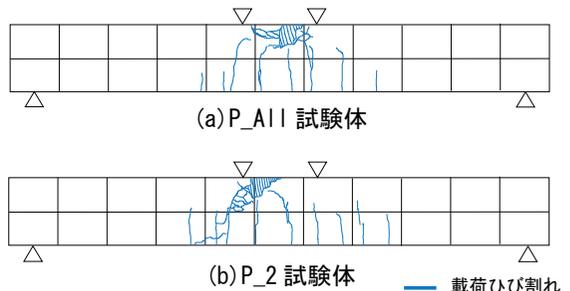


図-9 ひび割れ状況(シリーズ2)

図-11にシリーズ2における曲げひび割れ発生荷重および最大荷重を示す。シリーズ1と同様、断面修復の適用により、曲げひび割れ発生荷重が低下した。その低下割合はP_All試験体が最も大きく、2分割で断面修復を適用したP_2試験体では、P_All試験体と比べ、曲げひび割れ発生荷重の低下を抑制できた。このことから、断面はつりの分割数を増やすことでひび割れ発生荷重の低下を抑制できるものと考えられるが、分割数を増やすことで補修部での継ぎ目が増加し、また、その箇所が曲げひび割れ発生位置となり得る。分割施工する際の最適な分割数や施工方法については、今後の課題である。一方、最大荷重は断面修復の有無によらず概ね同程度となったことから、鋼材が非腐食で健全な状態であれば、断面修復が曲げ耐力に及ぼす影響は小さいといえる。

以上のことから、鋼材腐食が生じたPC部材において断面修復を適用した場合の耐荷性能は、健全な鋼材に対して断面修復を施した場合と比べ、鋼材とコンクリートとの付着や鋼材腐食に伴う断面減少による耐荷力低下が生じる点で異なるため、これらも考慮した補修設計を行う必要があるといえる。

4. まとめ

- (1) PC 部材において、段階的な断面修復を適用することで、補修部においてもプレストレス力の再分配が生じ、断面はつりに伴うプレストレス力の減少を抑制できることが示された。これにより既設コンクリートの応力増加負担を低減し、補修部のひび割れ発生荷重を増加させることができる。
- (2) 腐食した PC 部材の断面修復の影響は、健全な鋼材を断面修復した場合とは異なる。特に補修材との付着特性の影響について検討を進める必要がある。
- (3) PC 部材において断面修復を適用する際は、補修直後における耐荷性能の低下を考慮する必要がある。なお、時間経過に伴う補修部のクリープ・収縮の影響も考慮する必要がある。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 26289137 (研究代表者：宮里心一) の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説 III, 日本道路協会, 2012
- 2) 加藤絵万ら：局所的に生じた鉄筋腐食が RC 梁の構造性能に及ぼす影響, 港湾空港技術研究所報告, 第47巻, 第1号, pp.57-82, 2008
- 3) 2012年制定コンクリート標準示方書[設計編], 土木学会

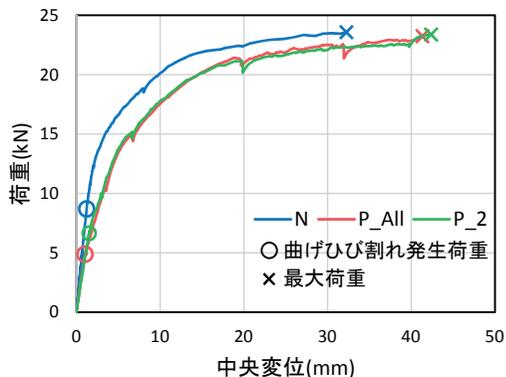


図-10 荷重中央変位(シリーズ 2)

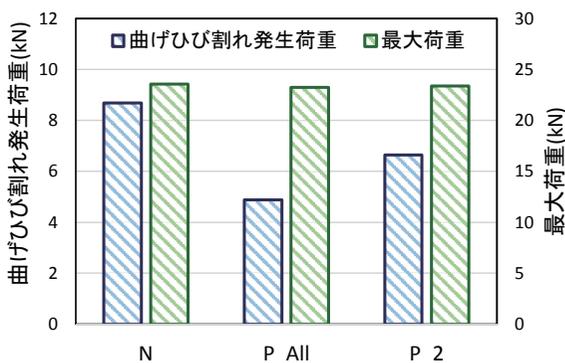


図-11 曲げひび割れ発生荷重と最大荷重(シリーズ 2)