

鋼材が破断したPCはりの曲げ補強に関する実験的研究

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

Abstract : The corrosion of tendons will drastically change the mechanical performance of the PC beam and reduce the serviceability and the safety of the structure. If the grout is partially filled inside the sheath, the stress will transmit from tendons to concrete because the bond exists between tendons and grout after cutting the tendons. This means that the bond between the grout and tendons as well as the residual stress of the PC beam will be a key to evaluate the mechanical performance of the PC beam reasonably. The objective of this paper is to evaluate the bond between PC tendon and the grout inside the sheath, and the flexural load capacity of incompletely-grouted PC beam with broken tendons. Finally, the paper proposed the flexural load capacity of incompletely-grouted PC beam with broken tendons with the verification by the experimental results.

Key words : PC beams , Flexural-load capacity , Broken tendons , Bond , Loss of prestress

1. はじめに

我が国初のポストテンション式プレストレストコンクリート(PC)として、1954年に第一大戸川橋梁が建設されて以降、10,000連以上のPC桁が鉄道橋として供用されている。このようなPC桁では、PC鋼材の劣化を防止するためにシーースとPC鋼材の隙間をグラウトで充填することが必須である。しかしながら、様々な理由によりグラウトがシーース内部に充填しておらず、その結果、鋼材が腐食し、破断した事例が報告されている¹⁾。鋼材の劣化は、PC桁の力学性能を大きく変化させ、構造物の使用性や安全性²⁾を脅かすことから、PC鋼材が破断したPC桁の力学性能を評価し、それに応じた補修・補強を実施することが重要である。

ポストテンション式PC桁では、PC鋼材の定着機構の設置により導入プレストレス量が十分確保されている。したがって、PC鋼材の破断は、鋼材の定着機能を消失させるとともに残存プレストレス量を大きく変化させ、構造物の力学性能を大幅に劣化させる可能性がある。しかし一方で、グラウトがシーースに充填されていると、PC鋼材が破断しても鋼材とグラウトの付着力の存在により、鋼材の緊張力がPC桁に伝達するために、プレストレス力がPC桁に部分的に確保される可能性がある。したがって、より合理的にPC桁の力学性能を評価するためには、残存プレストレス量を評価することが必須であるため、グラウトとPC鋼材の付着特性を把握することが重要となる。これまで、筆者らは一軸供試体のPC鋼材破断実験を行い、PC鋼材の種類およびグラウト強度を関数としたPC鋼材とグラウトの付着特性を取得することで、鋼材破断後にPC桁に残存するプレストレス量を把握した。そして、評価された残存プレストレス量を用いることで、鋼材が破断したPC桁の曲げ耐力を概ね算定できることを確認した³⁾。

本研究では、安全性の視点からグラウト充填不良を有するPC桁が、PC鋼材破断後に有する曲げ耐力を、鋼材とグラウトの付着特性に着目することで、適切に残存プレストレス量を評価し、鋼板によ

る補強前後の耐力評価を行うことを目的とした。検討では、残存プレストレス量を用いたグラウト充填不良を有する PC 桁の鋼材破断後の曲げ耐力が、既往の研究で提案した評価法で算定できることを確認し、さらには鋼板による補強効果も含めてその妥当性を検討した。また、鋼材が破断した PC 桁の繰返し載荷実験を行い、付着が劣化すること考慮に入れた検討を行った。

2. 実験概要

2.1. 縮小試験体

PC 鋼材を切断した試験体、底面を鋼板で補強した試験体の静的および疲労載荷試験を行い、残存プレストレス力と曲げ耐力の関係の検討を行った。表-1 に試験体製作に使用したコンクリートの示方配合を、表-2 に本研究で用意した供試体および使用した材料の諸元を、図-1 に縮小試験体の概要

表-1 示方配合

	水セメント比 %	セメント kg/m ³	水 kg/m ³	細骨材 kg/m ³	粗骨材 kg/m ³	混和剤 kg/m ³	空気量 %
実大試験体	42.9	340	146	787	1055	2.81	4.5
縮小試験体	40.3	382	154	844	950	3.17	4.5

表-2 供試体諸元の一覧

名称	コンクリート			有効プレストレス力 (kN)	PC 鋼材		切断割合	鋼板補強		載荷種別	
	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)		種類	f _{py} (N/mm ²)		厚さ (mm)	降伏強度 (N/mm ²)		
実大	53.1	31.9	3.6	4555	9-5S12.7B	1803	0.0	9	339	静的	
縮小	U0	58.1	39.5	—	1213	1-12S12.7B	1849	0.0	—	—	静的
	U75	57.0	40.1	—	1174	1-12S12.7B	1849	0.75	—	—	静的
	U0-R8	53.5	38.3	3.2	1241	1-12S12.7B	1842	0.0	3.3	303	静的
	U0-R2	53.5	38.3	3.2	1241	1-12S12.7B	1842	0.0	3.3	303	静的
	F75	57.8	39.6	3.4	1241	1-12S12.7B	1842	0.75	—	—	疲労
	F0-R2	60.2	38.1	5.3	1241	1-12S12.7B	1842	0.0	3.3	303	疲労

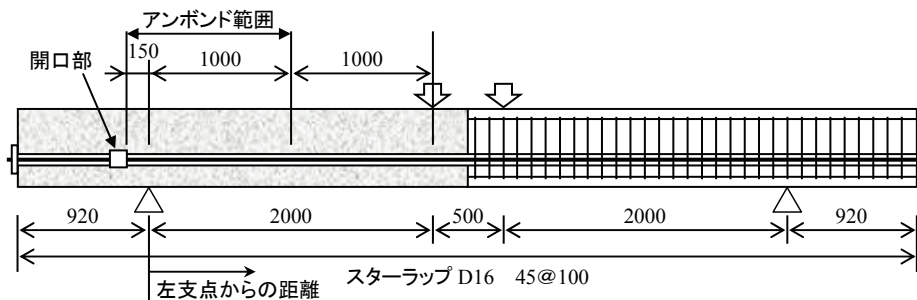


図-1 試験体形状 (mm)

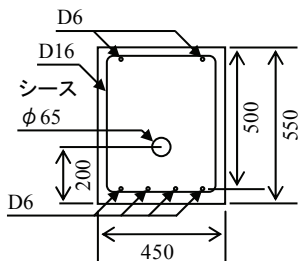
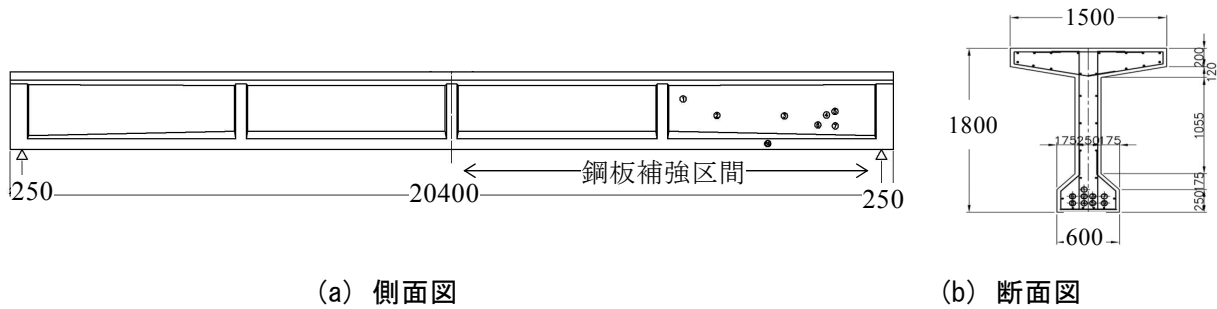


図-2 鋼板寸法 (mm)



図-3 アンカー取付状況



(a) 側面図

(b) 断面図

図-4 実物大試験体概要(mm)



図-5 アンカー施工状況

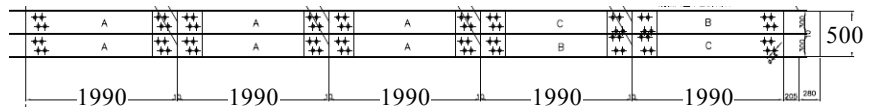


図-6 鋼板およびアンカー配置(mm)

表-3 実験結果

名称	降伏荷重			曲げ耐力		
	P_y (kN)	$P_{y/l}$ (kN)	$P_y/P_{y/l}$	P_{max} (kN)	P_{mu} (kN)	P_{max}/P_{mu}
実大	975	1296	0.75	1244	1309	0.95
U0	448	439	1.02	714	675	1.06
U75	355	276	1.28	600	430	1.40
U0-R8	801	569	1.41	843	815	1.03
U0-R2	-	569	-	750	815	0.92
F75	-	276	-	300	430	0.70
F0-R2	-	576	-	500	830	0.60

P_y : 軸方向鉄筋降伏時の荷重, $P_{y/l}$: 破壊断面に曲げ降伏耐力 ($M_{y/l}$)相当の曲げモーメントを作用させるための荷重の計算値, P_{max} : 曲げ耐力の実験値, P_{mu} : 破壊断面に曲げ耐力 (M_u)相当の曲げモーメントを作用させるための荷重の計算値

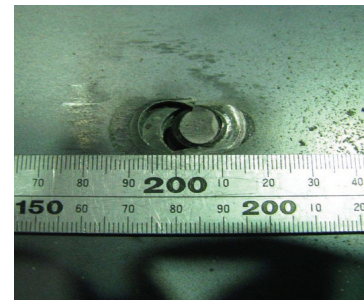


図-7 ボルトおよび鋼板損傷状況 (U0-R8)

を示す。PC 鋼材は、鋼より線 SWPR7BL (12T12.7) であり、PC 鋼材の引張降伏強度 (f_{py}) は 1842 ~ 1849 N/mm², PC 鋼材の引張強度 (f_{pu}) は 2020 N/mm², PC 鋼材のヤング係数 (E_p) は 194 N/mm² である。また軸方向鉄筋には公称直径が 6.35 mm である異形鉄筋 (引張降伏強度 (f_{sy}) : 370 N/mm², ヤング係数 (E_s) : 194 kN/mm²), せん断補強鉄筋には公称直径が 15.9 mm である異形鉄筋 (引張降伏強度 (f_{wy}) : 345 N/mm², ヤング係数 (E_w) : 194 kN/mm²) を使用した。また、シースは鋼製であり直径は 65mm である。シース内部は圧縮強度 34.1 N/mm² であるグラウトを充填した。

一部の試験体には、厚さ 3.3 mm である鋼板をアンカーおよびボルトを使用して貼付した。図-2 に使用した鋼板の寸法を、図-3 に鋼板の取付状況を示す。鋼板による補強範囲は支点間の全域を対象としており、使用したボルトは、直径が 13mm である。U0-R8 ではボルトのせん断強度が鋼板の降伏強度を上回るように一枚の鋼板の片側に 8 本と決定したが、U0-R2 ではボルトによる定着性能の限界を確認するために、本数を片側 2 本にしたものである。

試験体名称には、荷重方法：一方向静的 4 点曲げ荷重 (U) および一方向繰返し 4 点曲げ荷重疲労試験 (F, 50kN ~ 300kN, 1.2Hz), PC 鋼材の切断割合, 鋼板補強の有無 (R), および鋼板を固定したボルト数を反映させている。また、鋼材を開口部で 75% 破断させた U75 および F75 では、片側支点より 1000 mm 区間にはテープを PC 鋼材に巻きつけることで、PC 鋼材とグラウトの付着を完全に除去し

たアンボンド区間を設定した。

2.2. 実大試験体

実大載荷試験を実施するにあたり、既設の鉄道橋におけるPC桁の構造形式について調査を行い、比較的連数の多いスパン20.4mのI形桁の主桁（以下、実大試験体と称す）を1体製作した。図-4に、実大試験体の寸法形状を示す。試験体は、右端部からL/4点までをグラウト未充填区間とした。表-1にコンクリートの示方配合を、表-2に供試体諸元を示す。試験は、死荷重と列車荷重等を考慮した1200kNをジャッキ荷重として載荷および除荷を実施し、PC鋼材を開口部で順次切断した。また、実大試験体の底面は、1990×250×9mmである鋼板で右側せん断スパンを補強した。図-5にアンカーの施工状況を、図-6にアンカーの配置位置を示す。

3. 実験結果

3.1. 縮小実験結果

表-3に実験結果および計算値を、図-7に U0-R8 試験体の実験後のボルトおよび鋼板の損傷状況を、図-8および図-9に静的載荷実験による試験体の荷重-変位関係および破壊状況を示す。全ての供試体の破壊形態は、試験体の圧縮縁のコンクリートがはく離することで荷重の最大値に至る、曲げ破壊型であった。片側8本のボルトにより鋼板を試験体底面に貼付したU0-R8では、鋼板が降伏することで終局に至った。一方、鋼板固定に対して片側2本のボルトを使用したU0-R2では、ボルトの破断により終局に至った。いずれの試験体も、無補強試験体(U0)に対して、PCはりに対する鋼板

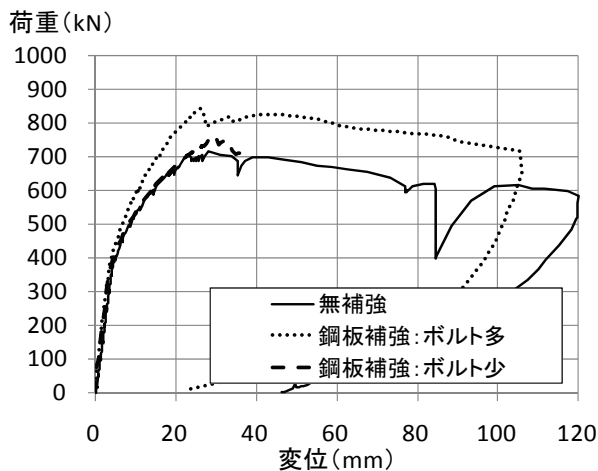


図-8 荷重—変位関係 (アンカーの有無)

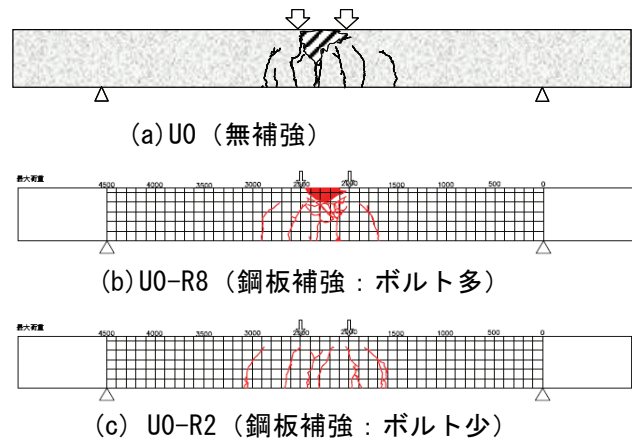


図-9 ひび割れ状況 (荷重=最大値)

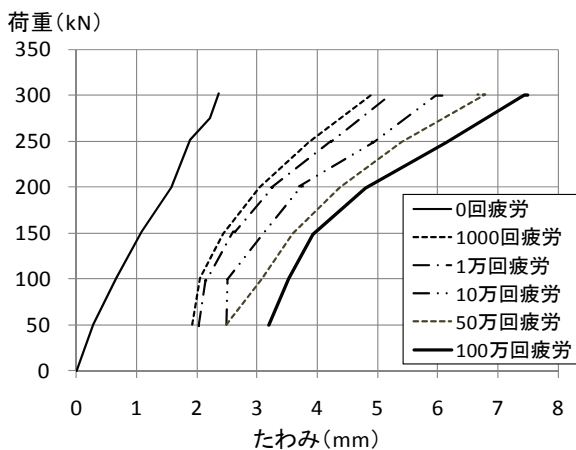


図-10 荷重—たわみ関係 (F75)

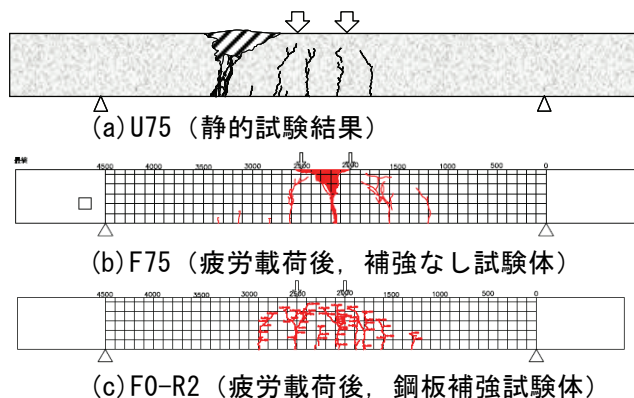


図-11 終局時のひび割れ発生状況

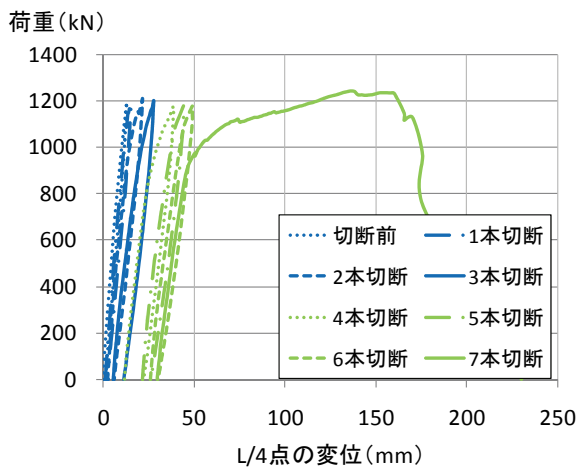


図-12 荷重—変位関係 (実大試験体)



図-13 最終サイクル載荷時 (実大試験体)



図-14 鋼板破断状況



図-15 アンカー埋込み状況



図-16 破断した鋼板

接着による曲げ破壊に対する補強効果を確認した。

図-10に、繰返し載荷実験を行った F75 の荷重—変位関係を示す。また、図-11に U75, F75, F0-R2 の破壊状況を比較して示す。75%の PC 鋼材を破断した F75 の疲労試験を実施した結果、荷重の繰返し回数の増加とともに PC はりの剛性が低下することを確認した。終局断面をみると、U75は、曲げひび割れ発生後、支間中央より左側のせん断スパンに曲げひび割れが発生および進展し、左支点から 1300mm 付近において圧壊した。すなわち、破壊断面位置の点で、U0 試験体と大きく異なった。また、破断による面外方向の変位は観察されなかった。

一方、F75 は、約 151 万回の載荷で終局に至った。なお破壊断面は、図-11 (b) に示すとおり、支間中央の圧縮縁コンクリートが破壊しており、静的載荷実験で観察された破壊位置と異なった。これは、繰返し載荷による残存プレストレス量の変化を示すものであり、疲労により鋼材とグラウトの付着特性が変化する可能性が示唆された。また、F0-R2 では、35.4 万回の載荷で、鋼板取付ボルトが破断し落下したのちに、曲げ破壊に至った。

3.2. 実大実験結果

図-12に、実物大試験体より得られた荷重と1/4点における変位関係を示す。また、図-13に、最終サイクル時の試験体の破壊状況を示す。試験体は、9本配置したPC鋼材のうち7本を切断した際に、非線形性を示し、鋼板が破断した後に終局に至った。図-14~16に、鋼板およびアンカーの状況を示すが、鋼板の定着に使用したアンカーおよび定着部のコンクリートに損傷は見られず、鋼板を定着する点で十分な性能を有していたことが確認できた。

3.3. 実験結果との比較による算定値の検証

PC 鋼材が破断した PC 部材の曲げ耐力は、平面保持の仮定および断面の力の釣り合い条件から算定した⁴⁾。断面内の釣り合い条件を考慮して、圧縮縁から部材断面の中立軸位置までの距離 x を算出し、曲げ耐力 M_u を算定することとした。ただし、破断した PC 鋼材の有効プレストレスによる PC 鋼材ひずみ ε_{pn} は、既往の研究³⁾に示すとおり、PC 鋼材とグラウトの付着力を考慮することで、すべりが発生した際の鋼材に作用する応力を用いることとした。

プレストレス力が部分的に開放された PC 桁の曲げ耐力の算定は、試験体全長において載荷による作用曲げモーメントが曲げ耐力を上回る位置を破壊断面とし、その際の曲げ耐力として算出した。なお、破壊断面位置は、試験結果におけるコンクリートが圧縮破壊した断面位置とほぼ一致している。

表-3 に、算出した曲げ耐力の算定値と、載荷実験で得られた載荷荷重の最大値を比較して示す。算定値と実験値を比較した結果、おおむね曲げ耐力の計算値は試験値に近い値を示した。また、鋼板を貼付した試験体の算出値 P_{mu} に対して、実験値 P_{max} はほぼ一致しており従来の算定法による評価の妥当性を確認している。内部に配置したひずみゲージにより、試験体におけるひずみ分布の計測を試みたが、載荷中のひび割れ発生により正確な追跡ができなかった。U75 の P_{max}/P_{mu} がやや過大に安全側を示す結果となった要因として、PC 桁では曲げが作用したことで、既往の一軸条件下の付着試験³⁾に基づく予測結果と比較して、鋼材とグラウトとの付着性能が向上した可能性があげられる。また、疲労載荷を行った試験体では、破断 PC 鋼材が定着されていないことで載荷に伴う鋼材応力の増加によるすべりの発生や、鋼板取付ボルトの破断により、 P_{max} が算定値(P_{mu})に対して下回ることを確認した。疲労載荷による影響はさらに検討を重ねる必要があるものの、既往の研究で提案した評価法³⁾を用いることで、PC 鋼材が破断した PC 桁の力学性能を概ね評価することができたことから、本手法は鋼材が破断した PC 桁に対して、より合理的な補修・補強を可能とするものであると考える。

4. まとめ

本研究は、安全性の視点からグラウト充填不良を有する PC 桁が、PC 鋼材破断後に有する曲げ耐力を、補強効果および載荷方法に着目して実験的に研究を行った。その結果、疲労など繰返し荷重の作用により、鋼材とグラウトの付着状況が変化することで、残存プレストレス量が変化する可能性が示唆された。また、残存プレストレス量を用いたグラウト充填不良を有する PC 桁の鋼材破断後の曲げ耐力が概ね適切に評価できることを確認した。そして、鋼板により底面を補強することで、曲げ耐力が増加することを確認し鋼板による補強効果について、従来の計算法による評価の妥当性について明らかにした。

なお、本研究は、国土交通省の補助金により実施した。

参考文献

- 1) 石橋忠良：PC鉄道構造物の劣化事例と対策，プレストレストコンクリート，Vol.45，No.1，pp.72-75，2003.1
- 2) 睦好宏史：PCグラウトの現状と問題点，プレストレストコンクリート，Vol.48，No.2，pp.22-25，2006.3
- 3) 田所敏弥，谷村幸裕，渡辺 健，徳永光宏：グラウトとPC鋼材の付着特性に着目した鋼材破断後のプレストレスの評価，第19回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム，pp.209-212，2010.10.
- 4) 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