

論文 PC 鋼材の腐食のモデル化が PC 桁の耐荷性状に及ぼす影響

中村 宗一郎*1・斎藤 成彦*2

要旨: 鋼材腐食の生じた PC 構造物を適切に維持管理するためには、構造性能を正確に把握する必要があるが、PC 鋼材の腐食はプレストレスの消失を伴うため、耐荷性状は複雑なものとなる。本研究では、数値解析における鋼材腐食のモデル化の違いが PC 桁の耐荷性状に与える影響について検討を行った。PC 鋼材の腐食は、予め PC 鋼材を切断することや、一定区間の PC 鋼材の断面積を減少させることでモデル化した。その結果、軸方向および断面内での PC 鋼材の切断位置によって耐荷性状が異なることや、PC 鋼材の局所的な腐食が PC 桁の耐荷性能を著しく低下させることを確認した。

キーワード: プレストレストコンクリート桁、鋼材腐食、数値解析、RBSM

1. はじめに

プレストレストコンクリート（以下、PC）構造物は、予め導入されるプレストレスによりひび割れを抑制するため、本来は耐久性に優れた構造物であるが、グラウトの充填不良やアルカリシリカ反応等のコンクリートの劣化を伴う場合には、PC 鋼材の腐食や破断等が生じ、耐荷力の低下が懸念されている。PC 部材は、シースの存在やグラウトの充填状況等から鋼材腐食の過程が複雑であり、またプレストレスの消失や PC 鋼材の早期破断等、耐荷機構も複雑なものとなる。PC 構造物を合理的に維持管理するためには、材料劣化の生じた構造物の構造性能を定量的に把握することが求められ、数値解析はその有用な評価手法として期待されている。これまでも、塩害劣化した実橋梁を対象とした数値解析による耐荷力評価に関する研究が実施されており、鋼材の腐食状況を適切にモデル化することで劣化した PC 部材の耐荷性能を予測できることが示されている¹⁾²⁾。

著者らは、これまでポストテンション方式 PC はりの部材実験を通して、PC 鋼材の腐食性状が部材の耐荷挙動に及ぼす影響について検討を行うとともに、PC 鋼材の腐食性状を詳細にモデル化した数値解析により耐荷性状の評価を行ってきた³⁾⁴⁾。また、実際に供用されていた PC 桁を対象に、PC 鋼材の腐食や切断が耐荷性状に及ぼす影

響を解析的に明らかにした⁵⁾。これまでの解析的研究では、2 次元剛体バネモデル（RBSM）を用いて、矩形断面を有する模型 PC はり試験体や I 形断面を有する実橋梁 PC 桁の耐荷性状の評価を試みてきたが、2 次元解析であるため、PC 鋼材の断面内の腐食分布の影響を詳細に検討するには至っていない。そこで本研究では、実際に供用されていた道路橋 PC 桁を対象に、3 次元剛体バネモデルを用いて PC 鋼材が耐荷性状に及ぼす影響について詳細な検討を行った。

2. 解析概要

2.1 解析対象 PC 桁の概要

解析対象は、首都高横浜環状北線の工事に伴い撤去された首都高横羽線生麦入口の上部工の一部であった PC 桁で、撤去後に耐荷性状を確認するための載荷試験が実施されたものである⁶⁾⁷⁾。44 年間供用された単純 PC 合成桁（ポストテンション方式）で、かぶりコンクリートの剥離による鉄筋露出、ひび割れ等が近接目視によって確認されたが、比較的健全な状態であると判断されている。試験体の諸元を図-1 に示す。12φ5 の PC 鋼材が 8 本曲線的に配置された I 型断面を有する PC 桁である。

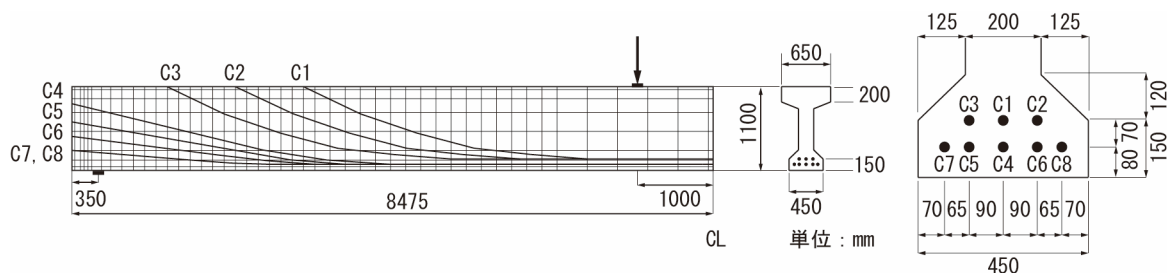


図-1 PC 桁試験体概要

*1 山梨大学 工学部土木環境工学科 (学生会員)

*2 山梨大学大学院 総合研究部教授 博(工) (正会員)

表-1 材料諸元

コンクリート	圧縮強度	52.5 N/mm ²
	弾性係数	3.1×10 ⁴ N/mm ²
PC 鋼材 SWPR1A φ 5mm	降伏強度	1421 N/mm ²
	破断ひずみ	4.5%
	弾性係数	2.0×10 ⁵ N/mm ²
鉄筋 φ 13mm	降伏強度	295 N/mm ²
	弾性係数	2.0×10 ⁵ N/mm ²
導入プレストレス		800 N/mm ²

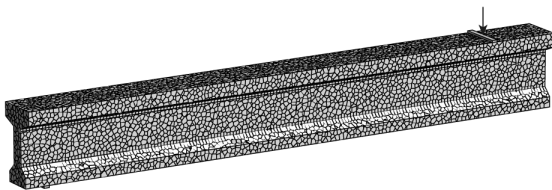


図-2 解析モデル

2.2 解析モデル

解析には、離散型の解析手法である3次元剛体パネモデル(RBSM)を用いた。鋼材腐食の生じたRCおよびPC部材の耐荷性状を比較よく再現できることを確認している^{3),8)}。解析に用いたコンクリートおよび鉄筋の応力-ひずみ関係は文献⁹⁾を参照されたい。解析モデルを図-2に示す。計算労力を低減するため、片側半スパンのみをモデル化した。コンクリートは剛体要素、鉄筋およびPC鋼材ははり要素、コンクリート剛体要素とはり要素の付着はリンク要素でモデル化し、12φ5のPC鋼材は1本のはり要素として扱った。コンクリートおよび鋼材の材料特性は、撤去PC桁の実験値に基づいた表-1の値を用いた。また、PC鋼材の応力-ひずみ関係は、実験値に対応するように定めたバイリニア型とし、破断ひずみに達すると応力を0とした。付着リンク要素には、鋼材軸方向のパネに対して付着応力-すべり関係⁹⁾を適用し、既往の研究⁹⁾を参考にPC鋼材とグラウト間の付着強度を定めた。

3. 解析結果

3.1 解析モデルの検証

本研究で対象とした、PC桁に対して疲労試験、および解体調査を実施した結果、44年供用後もPC鋼材やコンクリートは健全な状態に保たれていることが確認されている⁹⁾。実験では、同様の試験体を用いてPC鋼材を意図的に切断させた上で外ケーブル補強を実施し、その効果が確認されている⁷⁾。ここでは、補強前400kNまでの処女荷重の実験結果と実験実施者によるFEM解析結果と比較することで本解析モデルの妥当

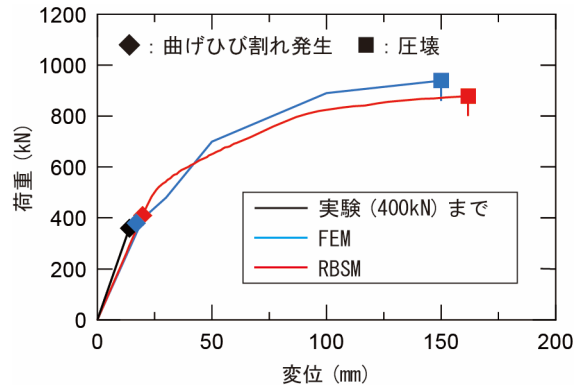


図-3 荷重-変位関係 (健全)

性を検証した。なお、FEM解析は、別の諸元を有する撤去桁の実験結果に対して妥当性が確認されている。図-3に、健全時の荷重-変位関係を示す。RBSM解析による結果は、実験およびFEM解析より得られた曲げひび割れ発生荷重と概ね一致している。また、RBSM解析の最大荷重および最大荷重時の変位はFEM解析とほぼ対応する結果となった。RBSM解析の結果は、曲げひび割れの発生、PC鋼材の降伏、上縁コンクリートの圧壊といった破壊過程を適切に再現できている。なお、本研究では、「切断」とは予め意図的にPC鋼材を切断すること、「破断」とは載荷によりPC鋼材が破断ひずみに達したことを定義する。

3.2 PC鋼材のモデル化の影響

既往の研究⁷⁾では、撤去PC桁のスパン中央でコア削孔によりPC鋼材を切断し、それに伴うプレストレスの消失の影響について検討されているが、外ケーブル補強の検討を目的としているため、PC鋼材の切断が最大荷重や変形性能等の耐荷性状に及ぼす影響については検討されていない。

そこで本節では、PC鋼材切断のモデル化(切断、除去)の違いが耐荷性状に及ぼす影響について検討した。「切断」は、切断位置ではり要素を取り除くことでPC鋼材の切断を模擬し、切断した断面の近辺でプレストレスが消失した状態をモデル化したものである。なお、解析から得られたプレストレス分布(図-4)に示すように、健全なPC鋼材と比較して、切断したPC鋼材(C4)は切断位置であるスパン中央から500mmほどの区間でプレストレスが消失していることが確認できるが、これは既往の研究⁹⁾で報告されている実験の状況をよく再現している。それに対し「除去」は、切断するPC鋼材(C4)そのものを部材全域にわたって除去してしまったものである。図-5に、PC鋼材(C4)1本のみをスパン中央で切断した場合の荷重-変位関係を示す。C4を切断した場合は、C4以外のPC鋼材の破断が生

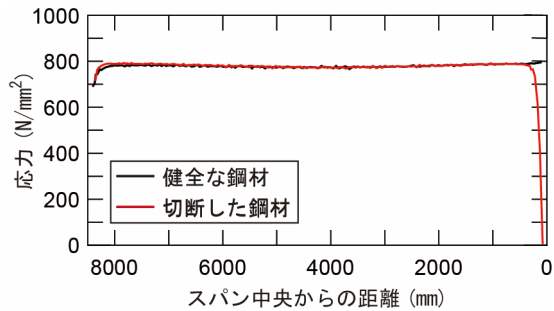


図-4 プレストレス分布 (C4)

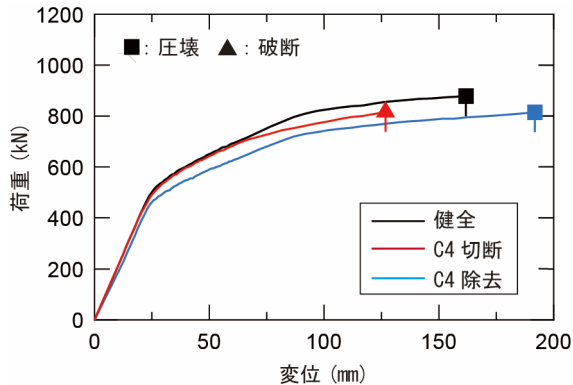


図-5 荷重－変位関係（モデル化の影響）

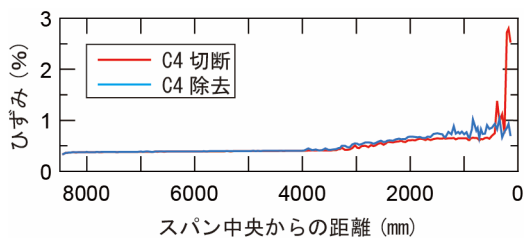


図-6 ひずみ分布 (C5)

じて破壊に至っているが、C4 を除去した解析では切断した場合とは異なり、上縁コンクリートの圧壊によって破壊に至っていることが確認できる。図-6 に変位 100mm での切断していない PC 鋼材 (C5) のひずみ分布を示す。PC 鋼材を切断した場合は、除去した場合と比較してひずみが局所的に大きいことが確認できる。これより、PC 鋼材を切断してもグラウトが十分に充填され付着が期待できる場合には、切断位置から一定区間離れるとプレストレスが回復するため、切断位置付近では局所的にプレストレスの少ない断面が生じ、この断面で破断を伴う局所的な破壊を生じやすくなることが確認された。したがって、PC 鋼材が腐食等で破断している場合に、破断した PC 鋼材を完全に除去（無いものと）して解析を行うことは、必ずしも安全側の評価にならない場合があることに注意する必要がある。

3.3 PC 鋼材の軸方向での切断位置の影響

次に、PC 鋼材の軸方向での切断位置が耐荷性状に及ぼす影響について検討を行った。スパン中央で PC 鋼

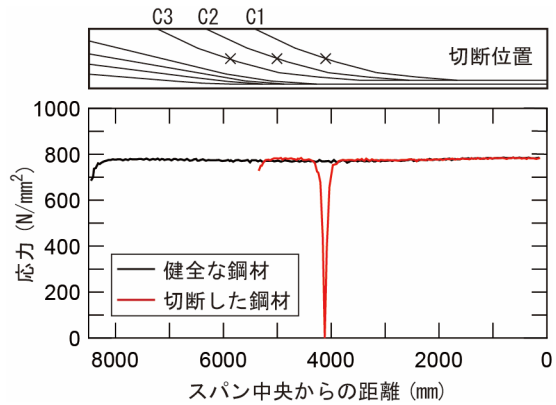


図-7 プレストレス分布 (C1)

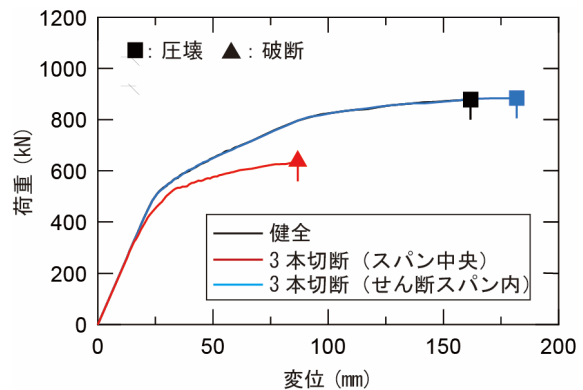


図-8 荷重－変位関係（軸方向での切断位置の違い）

材 C1, C2, C3 の 3 本を切断した場合、およびせん断スパン内の桁高中央 (550mm) の位置で PC 鋼材 C1, C2, C3 の 3 本を切断した場合について解析を行った (図-7)。後者の PC 鋼材 (C1) の切断直後のプレストレス分布を図-7 に、解析より得られた荷重－変位関係を図-8 に示す。スパン中央で PC 鋼材を 3 本切断した場合には、耐荷力および最大荷重時の変位が大きく減少し、切断していない PC 鋼材の破断により破壊に至った。それに対し、せん断スパン内で PC 鋼材を切断した場合は、健全とほぼ同等の挙動を示し、スパン中央の上縁コンクリートの圧壊によって破壊に至った。これは、図-7 から確認できるように、PC 鋼材の切断位置付近ではプレストレスが消失するが、スパン中央ではプレストレスの消失はなく、スパン中央で破壊する場合には健全と同条件となるためである。つまり、グラウトが充填され付着が期待できる場合には、切断位置から一定距離（本検討では 500mm 程度）離れれば、PC 鋼材の切断に伴うプレストレス消失の影響がなくなるものと考えられる。PC 鋼材が破断した桁に対して外ケーブル補強等を施す場合には、残存するプレストレスの状態を適切に把握し、オーバープレストレスとならないように注意する必要がある。

3.4 PC 鋼材の断面内での切断位置と切断本数の影響

PC 鋼材の断面内での切断位置と切断本数が破壊性状

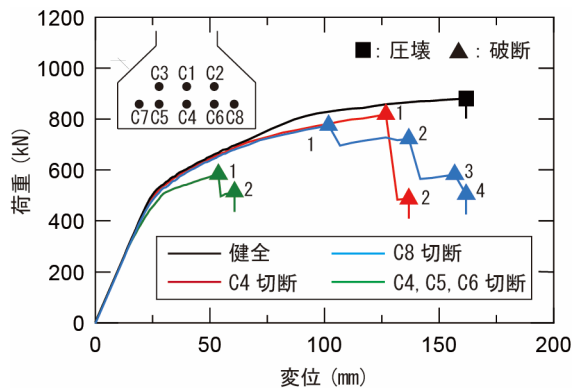


図-9 荷重－変位関係（断面内での切断位置の違い）

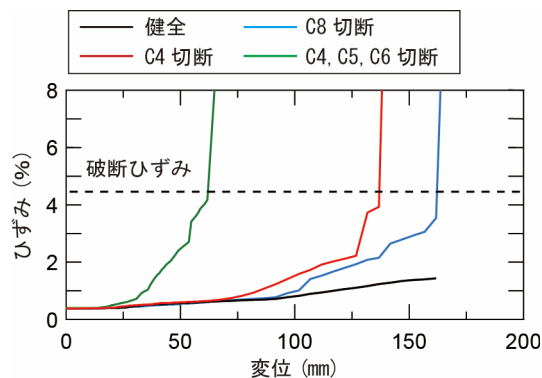


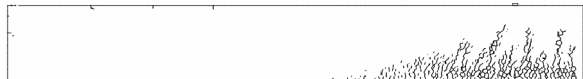
図-10 PC 鋼材のひずみ－変位関係（C3）

に与える影響について検討を行った。解析は、スパン中央において PC 鋼材 C4（断面中央）を 1 本切断した場合、PC 鋼材 C8（断面端部）を 1 本切断した場合、および PC 鋼材 C4、C5、C6（断面中央付近）の 3 本を切断した場合の 3 ケースについて行った。荷重－変位関係を図-9 に示す。表-2 は、図-9 中の各段階における PC 鋼材の破断の推移について示したものである。図-9 より、3 ケースとも PC 鋼材を切断することにより、最大荷重が低下するとともに、上縁コンクリートの圧壊ではなく PC 鋼材の破断により破壊に至ることが確認できる。断面中央の PC 鋼材（C4）を切断した場合は、応力が再配分される周辺の PC 鋼材の数が多いため、端部の PC 鋼材（C8）を切断した場合に比べて荷重低下が若干遅れていることが分かる。しかしながら、破断が生じて荷重低下が始まると周辺の PC 鋼材が一気に破断し、急激な荷重低下を生じている。一方、端部の PC 鋼材（C8）を切断した場合には、切断した PC 鋼材に近い鋼材から順に応力が再配分されるため、荷重低下の開始は断面中央の PC 鋼材（C4）を切断した場合よりも早いものの、端部の PC 鋼材の破断により荷重低下が徐々に生じていることが確認できる。図-10 に、切断していない PC 鋼材（C3）のスパン中央におけるひずみ－変位関係を示す。PC 鋼材を

表-2 破断の推移

	C4 切断	C8 切断	C4, C5, C6 切断
段階 1			
段階 2			
段階 3			
段階 4			

健全



C4切断



C8切断



C4, C5, C6切断

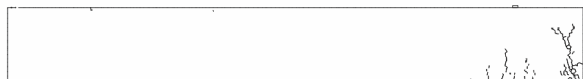


図-11 ひび割れ図（変位 50mm 時点）

切断することにより、鋼材量の少ない断面にひずみが集中し、PC 鋼材が早期に破断ひずみに達していることが確認できる。

解析より得た変位 50mm 時点におけるひび割れ性状を図-11 に示す。PC 鋼材の切断本数が増えるにつれ、ひび割れがスパン中央付近に集中していることが分かる。以上のことから、断面内の PC 鋼材の切断位置の違いにより、最大荷重および最大荷重後の耐荷性状が大きく異なることが分かった。

3.5 PC 鋼材の腐食の影響

前節では PC 鋼材を局部的に切断させた場合について検討を行ったが、本節では PC 鋼材の腐食を想定し、一定区間の PC 鋼材に断面減少が生じた場合の耐荷挙動について検討を行った。仮定した PC 鋼材の腐食分布を図-12 に示す。PC 鋼材 C4、C5、C6 の 3 本に対し、スパン中央から 2000mm までの区間について、平

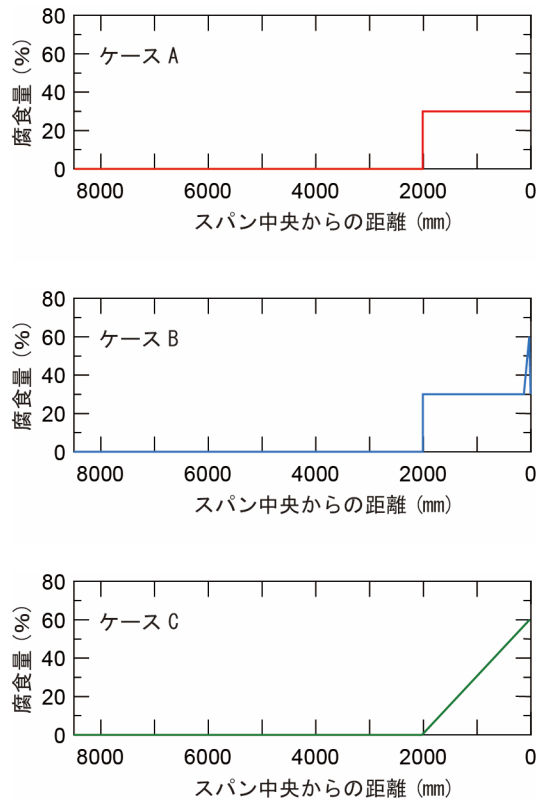


図-12 仮定した腐食の分布

均腐食量（平均断面減少率）が30%程度となるような3ケースの腐食状況を設定した。ケースAは一様に30%の腐食量を与えた分布、ケースBはケースAとほぼ同様であるが、スパン中央において局所的に60%の腐食量を与えた分布、ケースCは腐食量が線形で変化する分布とした。解析より得られた荷重－変位関係を図-13に示す。腐食分布を導入した解析結果は、いずれも耐力の低下がみられたが、平均腐食量が30%（断面のPC鋼材8本全体の断面減少率としては11%程度）であるため、スパン中央で3本を切断した場合（図-9）よりも低下度合いは小さかった。また、ケースAおよびケースCで健全な場合と比較して変位が若干大きくなったのは、断面内での鋼材比が小さくなったためだと考えられる。一様な腐食分布を与えたケースAは、若干の耐力低下が確認できるが、上縁コンクリートの圧壊によって破壊に至った。同様に、線形的に腐食を与えたケースCでも、スパン中央で腐食量を60%としたにもかかわらず、PC鋼材は破断することなく上縁コンクリートの圧壊によって破壊に至った。一方、ケースBでは、平均腐食量は30%であるにもかかわらず、変位90mm付近で腐食を与えたPC鋼材（C4、C6）がスパン中央で破断し、さらにもう1本（C5）の破断により破壊に至った。図-14に解析より得られた変位

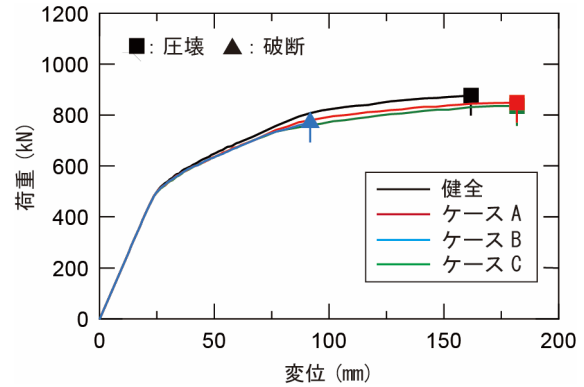


図-13 荷重－変位関係（腐食分布の影響）

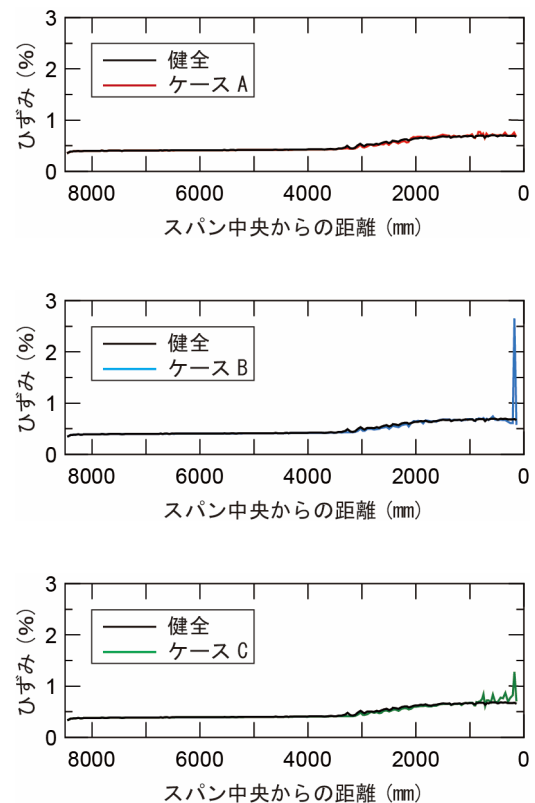


図-14 ひずみ分布（C6）

80mmにおけるPC鋼材（C6）のひずみ分布を示す。ケースA、ケースCでは健全なものと比較して、ひずみに大きな差異はみられないが、ケースBで局所的にひずみが増大していることが確認できる。このことから、鋼材腐食の生じたRC部材に関する既往の研究⁸⁾でもみられるように、孔食のような局所的な腐食が生じるとそこにひずみが集中するため、プレストレスが導入されているPC鋼材では特に破断が生じやすくなることを確認した。

4. まとめ

本研究では、3次元RBSMを用いた数値解析により、鋼材腐食の生じたPC桁の耐荷性状について検討を行っ

た結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 比較的健全な状態にあった 44 年供用された PC 桁を対象に、3 次元 RBSM による解析結果と既往の文献で報告されている載荷実験結果および FEM 解析結果を比較したところ、PC 桁の耐荷性状を概ね評価できていることが確認された。
- (2) PC 鋼材をスパン中央で切断した場合には、局所的にプレストレスが減少する断面が生じるため、切断していない PC 鋼材の破断を伴う局所的な破壊が生じることが確認された。また、切断した PC 鋼材を予め除去（無いもの）として解析を行った場合には、変形性能を過大評価する可能性が確認された。
- (3) 断面内の PC 鋼材の切断位置を変化させた解析により、切断した PC 鋼材および載荷途中に破断した PC 鋼材が負担していた応力の再配分の仕方が変わり、最大荷重および最大荷重後の耐荷性状に違いが生じることが確認された。
- (4) PC 鋼材の腐食をモデル化した解析により、腐食分布が耐荷性状に及ぼす影響について確認された。特に、局所的に腐食量が大きい断面を有する場合には、PC 鋼材の破断を伴う局所的な破壊が生じやすいことが確認された。

参考文献

- (1) 上原子晶久, 岩城一郎, 鈴木基行: 著しい塩害を受けて劣化した道路橋 PC 上部工の鋼材腐食を考慮した構造解析, 土木学会論文集 E2, Vol.67, No3, pp.333-350, 2011
- (2) 武田健太ほか: 塩害劣化したプレテンション式 PC 桁の載荷実験と解析による耐力評価手法の検討, 土木学会論文集 E2, Vol.71, No4, pp.303-322, 2015
- (3) 神津和大, 斉藤成彦, 衣笠泰広: 鋼材腐食の生じた PC はりの曲げ性状に関する研究, 第 20 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論文集, pp.271-276, 2011
- (4) 神津和大, 斉藤成彦, 衣笠泰広: PC 鋼より線の局所的な破壊が PC はりの耐荷性状に及ぼす影響, 第 21 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論文集, pp.297-302, 2012
- (5) 斉藤成彦, 小林京志郎: 数値解析による鋼材腐食の生じた PC 桁の耐荷性状評価, 第 24 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論文集, pp.469-474, 2015
- (6) 増井隆, 秋元泰輔, 蒲和也: 44 年供用した PC 桁の載荷実験報告 (その 1), 第 23 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論文集, 2014
- (7) 蒲和也, 増井隆, 秋元泰輔: 44 年供用した PC 桁の載荷実験報告 (その 2), 第 23 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論文集, 2014
- (8) 斉藤成彦, 高橋良輔, 檜貝勇: 鉄筋の腐食分布が RC はり部材の曲げ耐荷性状に及ぼす影響, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.4, pp.601-611, 2008
- (9) 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論文集, pp.209-212, 2010