

数値解析による鋼材腐食の生じたPC桁の耐荷性状評価

山梨大学大学院 正会員 博(工) ○齊藤 成彦
三井住友建設(株) 修(工) 小林 京志郎

Abstract : To achieve an effective maintenance of prestressed concrete structures, there is a strong need to accurately understand the present structural performances of deteriorated structures. A nonlinear analysis is one of the most suitable approaches to quantitatively predict the performances of such structures. This paper presents a numerical study of prestressed concrete bridge girders damaged by steel corrosion. The numerical results are compared with the test result for the post-tensioned prestressed concrete girder extracted from the highway bridge that had been used for 44 years. The parametric study concerning the damage of prestressing tendons indicates the effects of tendon rupture on the load carrying capacity and failure mode of the girder.

Key words : prestressed concrete bridge girder, steel corrosion, numerical analysis

1. はじめに

塩害等により劣化したコンクリート構造物の合理的な維持管理を行うためには、鋼材腐食が構造物の耐荷性状に与える影響を正確に把握する必要がある。鋼材腐食の生じた鉄筋コンクリート部材に関する研究は精力的に行われており、その耐荷性状は明らかになりつつあるが、プレストレストコンクリート（以下、PC）部材で鋼材腐食が生じた場合には、プレストレスの消失や鋼材の早期破断等により、耐荷機構は非常に複雑なものとなる。鋼材腐食の生じたPC部材に関する研究はまだ少ないが、既往の研究¹⁾により、鋼材腐食の生じたPC部材では腐食量のばらつきや局所的な腐食が耐力・剛性に影響を与えることが確認されている。鋼材腐食の生じたPC部材に対する精度の高い構造性能評価法の構築が急務となる中、数値解析は耐荷性能を定量的に評価可能なツールとして極めて有効である。実際に約32年間供用され、鋼材腐食を生じた道路橋PC上部工に対して解析的に検討が行われた例も見られる²⁾。そこで本研究では、既往の研究¹⁾で部材実験との比較検証に基づき提案した数値解析手法を実際に供用されたPC桁に適用し、鋼材腐食や破断が耐荷性状に及ぼす影響について検討を行った。

2. 解析概要

2.1 解析対象試験体の概要

解析対象は、首都高速横浜環状北線の工事に伴い撤去された首都高速横羽線生麦入口の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^{3),4)}。44年供用されたポストテンション方式単純PC桁で、かぶりコンクリートの剥離による鉄筋露出、ひび割れ、豆板等が近接目視により確認されたが、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。PC鋼線の

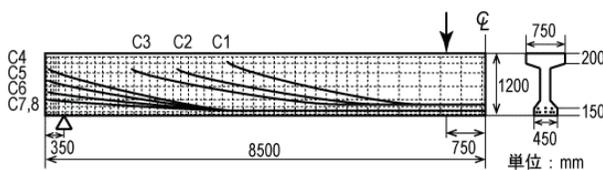


図-1 試験体概要



図-2 解析モデル

表-1 材料諸元

コンクリート 圧縮強度	上フランジ	52.5 N/mm ²
	ウェブ, 下フランジ	69.8 N/mm ²
PC 鋼線 SWPR1A φ 5mm	降伏強度	1511 N/mm ²
	破断ひずみ	6%
鉄筋 φ 13mm	降伏強度	447 N/mm ²
導入プレストレス		815 N/mm ²

切断によりプレストレス消失を模擬した試験³⁾に用いられた試験体で、I形断面内に12φ5のPC鋼線が8本配置されている。

2.2 解析モデル

解析には、離散型の解析手法である2次元剛体バネモデル (RBSM) を用いた。PCはり部材の実験結果との比較検討により、健全な場合および鋼材腐食の生じた場合の耐荷性状を比較的よく再現できることを確認している¹⁾。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、フランジとウェブの奥行き方向の要素幅を変えた2次元解析とした。コンクリートは剛体要素、鉄筋およびPC鋼材ははり要素、はり要素とコンクリート剛体要素間の付着はリンク要素でモデル化し、12φ5のPC鋼線は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には、撤去PC桁の実測値に基づいた表-1の値を用いた。解析では自重を無視し、実験での曲げひび割れ発生荷重を参考に、導入プレストレスを2割減少させた。PC鋼線の応力-ひずみ関係は、実験値に対応するよう定めたバイリニア型とし、表-1に示される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、既往の研究⁵⁾を参考にPC鋼線とグラウト間の付着強度を定めた。

解析では、PC鋼線の損傷がPC桁の耐荷性状に及ぼす影響について検討を行う。PC鋼線の切断は、その位置のはり要素を取り除くことによって模擬した。PC鋼線の腐食は、はり要素の断面積を腐食量に応じて減少させ、腐食区間の付着は腐食ひび割れの影響等を考慮して健全の1割に低減¹⁾するとともに、断面減少量に応じてプレストレスを減少させた。

3. 解析結果

3.1 解析モデルの検証

撤去されたPC桁に対して静的載荷試験、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鋼線やコンクリートは健全な状態に保たれていたことが確認されている³⁾。そこで、この撤去PC桁試験体を健全試験体とし、文献⁴⁾に報告されている実験結果 (480kNまで載荷)、および上縁コンクリートの圧壊までのFEM解析値と比較することで、本論の解析モデルの検証を行った。なお、FEM解析は、ほぼ同様の諸元の実験結果との比較により、その精度が検証されている。図-3に、荷重- (スパン中央) 変位関係を示す。RBSMによる解析結果は、実験およびFEM解析より得られた曲げひび割れ発生荷重をやや過大評価している。また、RBSM解析の最大荷重はFEM解析とほぼ対応したものの、最大荷重時の変位は、かなり過大評価する結果となった。これは、実験では桁上面に設計基準強度30N/mm²の床版が合成された状態で載荷されていることから、比較的早期に圧壊することが想定され、FEM解析はこの床版の影響を考慮しているものと推察される。RBSM解析の結果は、曲げひび割れの

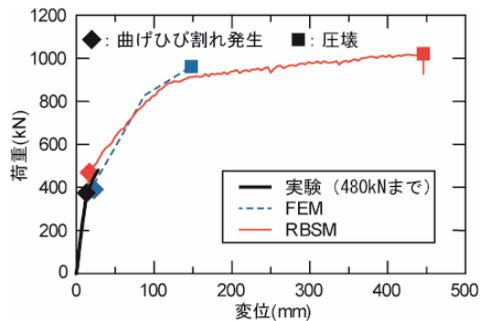


図-3 荷重-変位関係 (健全)

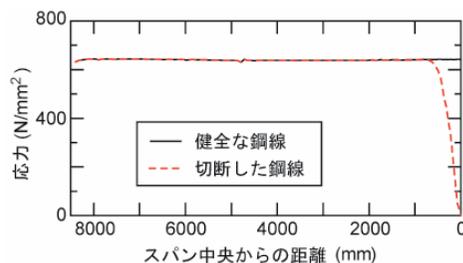


図-4 プレストレス分布

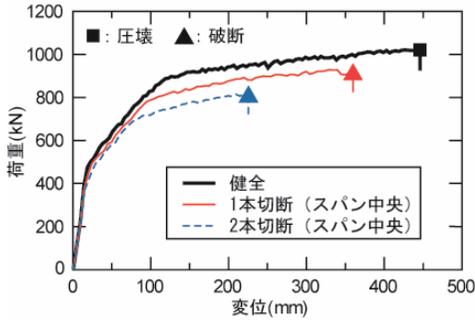


図-5 荷重－変位関係 (切断)

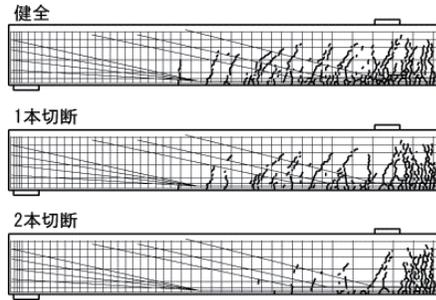


図-7 ひび割れ性状 (スパン中央切断)

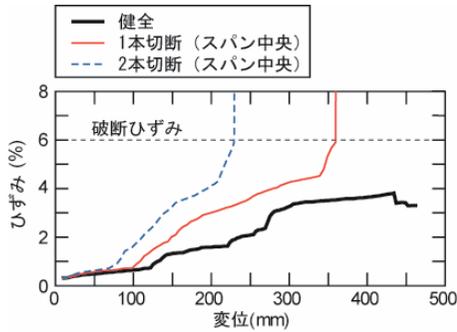


図-6 PC 鋼線ひずみ－変位関係

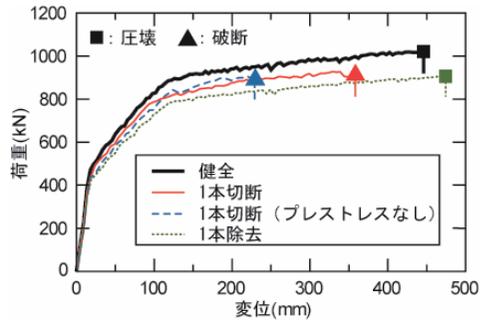


図-8 PC 鋼線のモデル化の影響

発生、PC鋼線の降伏、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おり、PC桁の挙動を概ね評価できていると判断できる。試験体の床版の状態が不明であることから、本論では上フランジの強度を用いた図-3に示す解析結果を健全な場合の結果として、以降の検討を行った。

3.2 PC鋼線の破断の影響

既往の研究⁴⁾では、撤去PC桁のスパン中央でコア削孔によりPC鋼線を切断し、PC鋼線の破断とそれに伴うプレストレスの消失による耐荷性状の違いについて検討が行われている。本解析では、スパン中央ではり要素を取り除くことにより、PC鋼線の切断を模擬して実験結果との比較を行うとともに、せん断スパン中央で切断した解析を追加し、切断位置が耐荷性状に及ぼす影響についても検討を行った。なお、解析では図-4に示す通り、PC鋼線の切断に伴い、切断位置から約500mmほどの区間でプレストレスの消失を考慮することになるが、これは既往の研究⁵⁾で報告されている実験の状況をよく再現している。

図-5に、スパン中央においてPC鋼線C4を1本切断した場合、およびPC鋼線C4とC1の2本を切断した場合の解析より得られた荷重－変位関係を示す。PC鋼線を切断することにより、曲げひび割れ発生荷重および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鋼線の破断により破壊に至っていることが確認できる。図-6に、切断されていないPC鋼線 (C5) のスパン中央におけるひずみ－変位関係を示す。PC鋼線を切断することにより、鋼材量の少ない断面に応力が集中し、PC鋼線のひずみ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200mm時点におけるひび割れ性状を図-7に示す。PC鋼線の切断本数が増えるにつれ、スパン中央の断面に損傷が集中するため、ひび割れの分散性が低下していることが確認できる。

図-8に、切断したPC鋼線のモデル化の違いが耐荷性状に及ぼす影響について検討した結果を示す。前述の解析結果である「1本切断」は、スパン中央でPC鋼線を1本切断したもので、切断した断面の近

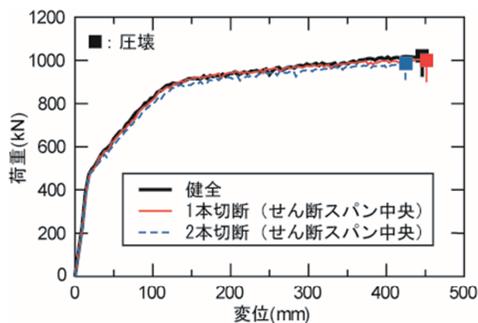


図-9 荷重－変位関係 (切断)

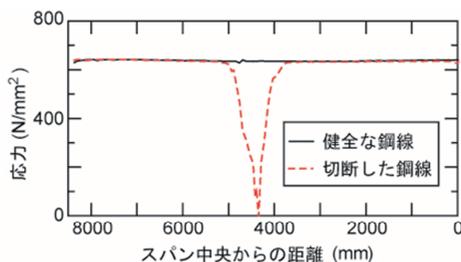


図-10 プレストレス分布

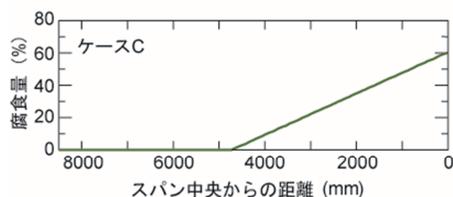
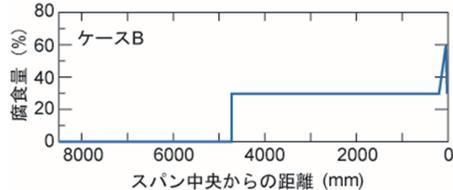
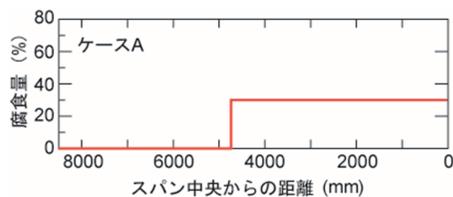


図-11 仮定した腐食分布

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。それに対し、「1本切断 (プレストレスなし)」は、スパン中央でPC鋼線を1本切断するとともに、切断したPC鋼線のプレストレスを部材全域にわたって消去したものであり、プレストレス量の減少によって部材の引張抵抗性が低下したため、より早期に破断が生じて破壊に至ることが分かる。一方、「1本除去」は、切断するPC鋼線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、スパン中央で1本切断した場合に比べて剛性は小さいものの、コンクリートの圧壊によって破壊に至っている。これより、PC鋼材の切断によって鋼材量の少ない断面が生じた場合には、応力が集中するため早期の破断による破壊が生じやすくなることが確認できる。したがって、PC鋼線が破断している場合に、破断したPC鋼線を完全に消去 (無いもの) 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。

次に、せん断スパン中央付近におけるPC鋼線の破断が耐荷性状に及ぼす影響について検討を行った。桁端部から4000mmの位置で、PC鋼線C8を1本切断した場合、およびPC鋼線C8とC7の2本を切断した場合について解析を行った。解析より得られた荷重－変位関係を図-9に、PC鋼線切断直後のプレストレス分布を図-10に示す。せん断スパン中央でPC鋼線を切断した場合は、いずれも健全とほぼ同様の傾向を示し、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-10から確認できるように、PC鋼線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) 離れば、PC鋼線の破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鋼線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、オーバープレストレスとならないように、残存するプレストレスの状態を適切に把握しておくことが必要である。

3.3 PC鋼線の腐食の影響

前節ではPC鋼線を局部的に破断させた場合について検討を行ったが、本節ではPC鋼線の腐食を想定し、一定区間のPC鋼線に断面減少が生じた場合の耐荷挙動について検討した。仮定したPC鋼線の腐食

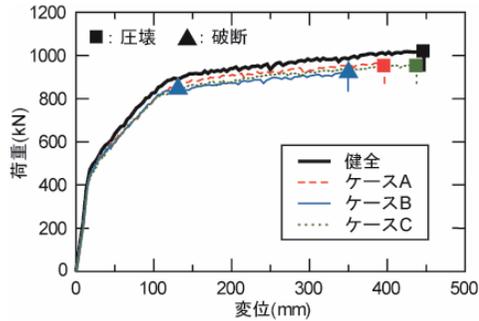


図-12 荷重－変位関係（腐食分布）

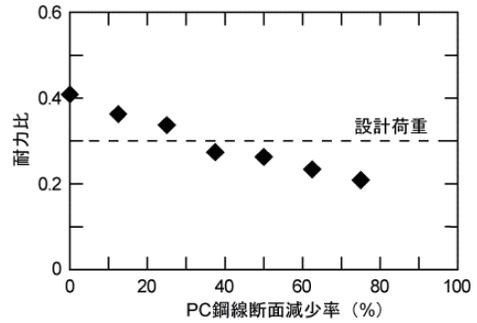


図-13 耐力比（曲げひび割れ発生荷重）

分布を図-11に示す。PC鋼線C4の1本に対し、曲げ上げ部からスパン中央までの区間について、平均腐食量が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は一樣に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は曲げ上げ部の0%からスパン中央の60%まで腐食量が線形に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-12に示す。腐食分布を導入した解析結果は、いずれも耐力および剛性の低下がみられたが、平均腐食量が30%（断面のPC鋼線全体の断面減少率としては4%弱）程度であるため、スパン中央でPC鋼線を切断した場合（図-5）よりも低下度合は小さかった。一樣な腐食分布を与えたケースAは、若干の耐荷力低下を生じたが、上縁コンクリートの圧壊によって破壊に至った。同様に、線形的に腐食量を変化させたケースCでも、スパン中央で腐食量が60%としたにもかかわらず、PC鋼線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、平均腐食量はほぼ30%であるにもかかわらず、変位120mm付近で腐食を与えたPC鋼線（C4）がスパン中央で破断し、さらにもう1本のPC鋼線の破断によって破壊に至った。このことから、既往の研究⁶⁾でも見られるように、孔食のような局所的な腐食が生じるとそこに応力が集中するため、プレストレスが導入されているPC鋼線では特に破断が生じやすくなることを確認した。

3.4 PC鋼線の断面減少量と耐荷性状の関係

破断や腐食によりPC鋼線の断面減少が進行すれば、設計荷重作用時にPC桁に曲げひび割れが発生することが想定され、維持管理における一つの指標として考えることができる。そこで、スパン中央においてPC鋼線の切断本数を増加させることにより、PC鋼線の局所的な断面減少率と耐力の低下について検討を行った結果を図-13および図-14に示す。図の縦軸は、健全な場合の最大荷重を1.0として正規化した耐力比である。図-13は曲げひび割れ発生時の耐力比の低下傾向を、図-14は最大荷重の低下傾向を示している。図-13より、スパン中央におけるPC鋼線の断面減少率が30%以上になると、設計荷重作用時に曲げひび割れが発生することが確認できる。本解析対象に対しては、8本のPC鋼線中3本以上破断することに相当する。一方、図-14より、PC鋼線の断面減少率の増加に伴う最大荷重の低下傾向を見ると、断面減少率が75%を上回る場合に設計荷重作用時に破壊することが確認できる。これは、8本のPC鋼線中6本以上の破断に相当する。スパン中央におけるPC鋼線の局所的な断面減少を考えた場

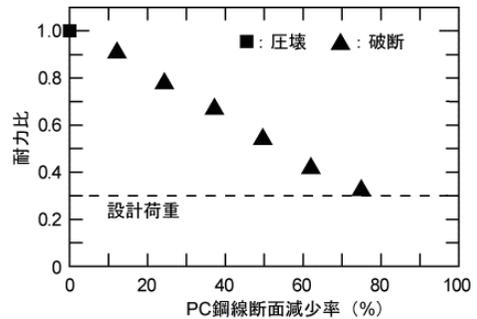


図-14 耐力比（最大荷重）

合、PC鋼線の断面減少率がほぼ耐荷力の低下率に相当することになる。しかしながら、PC鋼線の部材中の破断位置、断面減少量の分布性状等によって、PC鋼線の断面減少率と耐力比の関係は変化するものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、離散型の解析手法である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、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、最大荷重時の変位を過大評価したもののPC桁の耐荷性状を概ね評価できていることが確認できた。
- (2) PC鋼線の破断を模擬した解析では、スパン中央で破断が生じる場合に耐荷力の低下が顕著であり、破壊形態も上縁コンクリートの圧壊からPC鋼線の破断を伴う破壊に変化した。また、本検討の条件下では、スパン中央から十分離れた位置でPC鋼線が破断している場合には、耐荷性状への影響が小さいことが確認できた。
- (3) PC鋼線の腐食を模擬した解析では、腐食が一樣な場合や腐食量が緩やかに変化する場合には耐荷性状への影響は小さかったが、局所的な腐食を設定した場合にはPC鋼線の破断が生じやすい結果となった。
- (4) スパン中央におけるPC鋼線の局所的な断面減少量と耐力比の関係を解析的に算出することにより、本検討における条件下で、設計荷重時にPC桁に曲げひび割れや破壊が生じるような断面減少率を明らかにすることができた。

謝辞

本研究を実施するにあたり、首都高速道路(株)・増井隆氏および蒲和也氏にPC桁の載荷実験に関する情報をご提供頂いた。ここに記して、謝意を表します。

参考文献

- 1) 神津和大, 斉藤成彦, 衣笠泰広: 鋼材腐食の生じたPCはりの曲げ耐荷性状に関する研究, 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
- 2) 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, No.3, pp.333-350, 2011
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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