

# 劣化したPC橋解体時の詳細解析検討

大日本コンサルタント (株) 正会員 ○登石清隆  
 大日本コンサルタント (株) 杉野 亨  
 コムスエンジニアリング (株) 正会員 土屋智史  
 長岡技術科学大学 正会員 丸山久一

## 1. はじめに

今後、劣化したPC長大橋を解体撤去する事例が増えると考えられる。本稿では供用を終えたPC連続箱桁を解体する際にTラーメン状態になった構造系を対象に、PC鋼材が腐食による断面欠損や破断を生じている場合の構造体の耐荷性能について、詳細な3次元非線形FEM解析を行ったので報告する。

## 2. 解析モデルと解析ケース

解析ソフトはコンクリートのひび割れ問題を扱える研究版COM3<sup>※1</sup>を用いた。解析モデルは実構造物の⑨～⑳ブロックを対象に、3次元ソリッド要素で形状やブロック間の境界条件等を忠実に再現した(図-1)。解析ケースは表-1に示す健全時と損傷時の2ケースとし、損傷ケースは上下流側で破断本数が異なっていることや、Tラーメン状態とするための仮固定装置を想定し再現した。

損傷時のPCケーブルの状態は、これまでの詳細調査結果をもとに耐荷力の最小値を評価するよう破断本数を設定し、かつ腐食影響とグラウトの有無を1本ごとに考慮した。また腐食したPC鋼材は、強度など機械的性質が低下するため、上原子らが提案した腐食PC鋼線の試験結果の回帰式を用いて応力ひずみ曲線を設定した<sup>※2</sup>(図-5)。またグラウトが無いケーブルは桁コンクリートとの付着がないケーブルとして扱った。

考慮する荷重は、自重(24.5kN/m<sup>3</sup>)+プレストレス、及び地覆や付帯設備の3.0kN/m<sup>2</sup>の面荷重を初期状態とし、構造体の最大耐荷力を求める目的で自重を1.05倍→1.10倍→1.15倍・・・と漸増させて解析した。

表-2 材料特性

コンクリート	$f'_c=40\text{N/mm}^2$ , $E_c=31.0\text{kN/mm}^2$
PC鋼材	$E_{ps}=200\text{kN/mm}^2$ , $f_{py}=1600\text{N/mm}^2$ , $f_{pu}=1850\text{N/mm}^2$
鉄筋	S D295, $E_{ss}=200\text{kN/mm}^2$ , $f_{sy}=295\text{N/mm}^2$

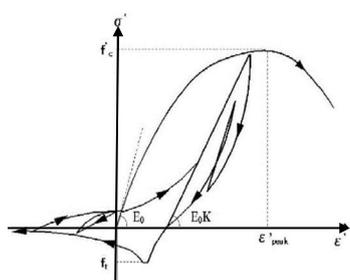


図-3 コンクリートの応力-ひずみ関係

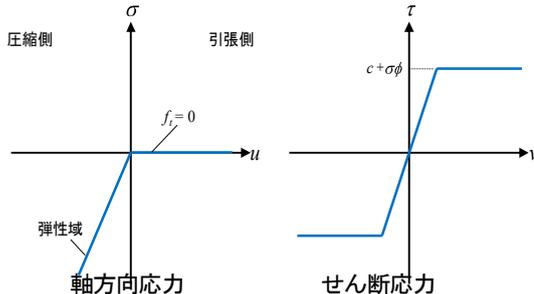


図-4 ブロック境界部における応力-変位関係

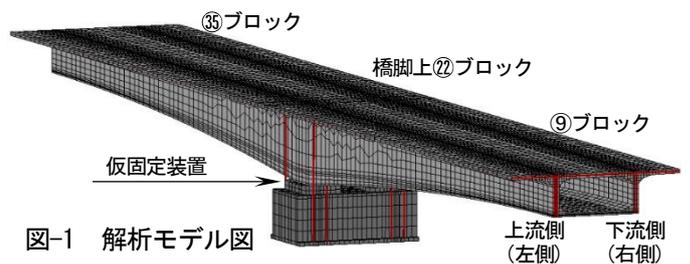


図-1 解析モデル図

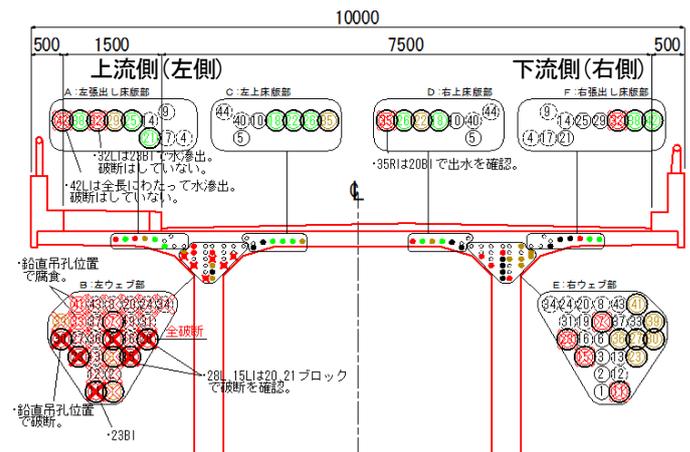


図-2 張出しPC鋼材配置

表-1 検討ケース

	張出しPC鋼材 (本)			グラウト
	上流側	下流側	計	
ケース1 健全時	44	44	88	有
ケース2 損傷時	有効 16 腐食無 15 腐食小 1 腐食大 0 破断 28	有効 38 腐食無 16 腐食小 22 腐食大 0 破断 6	有効 54 (61%) 破断 34	調査結果考慮

注) 腐食大は破断に線上げている。

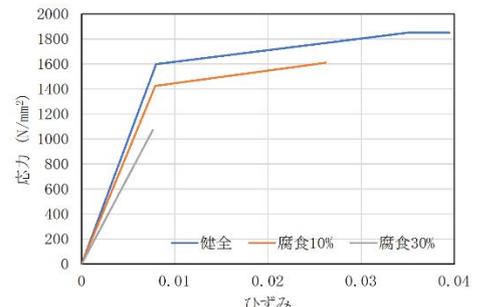


図-5 腐食PC鋼材の応力-ひずみ関係

### 3. 解析結果

#### 3.1 たわみ

構造体の荷重とたわみの関係を図-6に示す。ここでのたわみ着目位置は、Tラーメン張出し端部の⑨ブロックと⑳ブロックの先端である。健全時のケースでは、自重を1.7倍程度に増やすと非線形性が現れ、3倍程度からたわみが1mを超えて急増する傾向を示した。1.7倍程度で各断面にひび割れが発生して断面剛性が低下し、3倍を超えるとPC鋼材が降伏し始めるためと考えられる。図中に各段階の剛性値を示す。

損傷時のケースは、破断によりプレストレスによる反り上り減少や剛性低下により、先端たわみは健全時よりすでに約12cm大きくなっており、約1.6倍でたわみが1mを超え、1.9倍で終了した。剛性はPC鋼材断面面積が減少しているなどのため健全時の約6割に低下(0.9/1.4=0.64)しているが、自重の1.5倍程度までは線形性を保持している結果が得られた。

また損傷時の先端たわみは、破断想定本数が多い上流側の方が下流側より数%大きいのが、進展傾向は上下流でほぼ同様となっている(表-2)。⑳ブロック先端のたわみが⑨ブロック先端より大きいのは、⑳ブロック側径間(第2径間)の正曲げ用ケーブルの有効本数が第1径間より多いことによるものと考えられる。

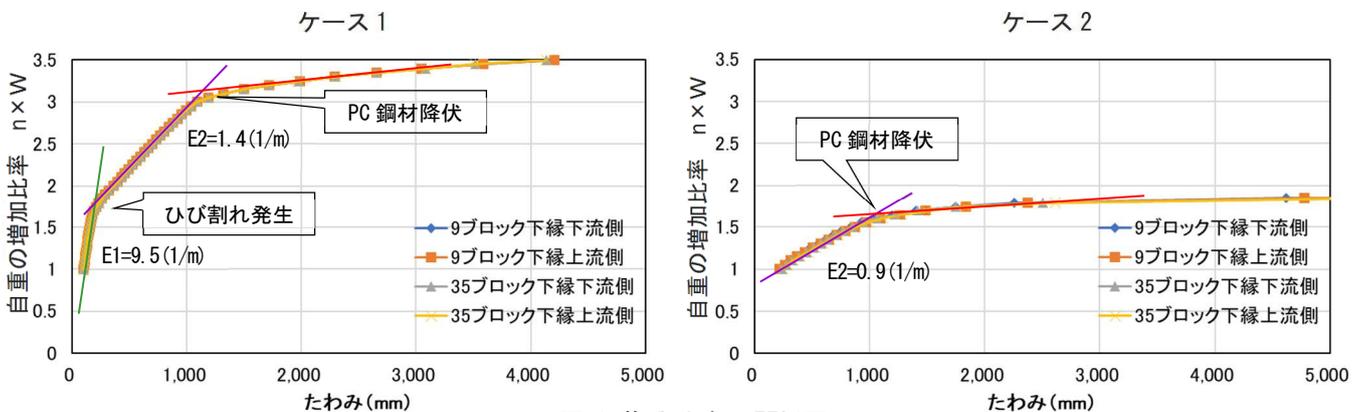


図-6 荷重-たわみ関係図

表-2 先端たわみ計算結果 (主要漸増倍数を抜き出して示す) 単位: mm

自重漸増倍数	ケース1 健全時						ケース2 損傷時							
	⑨ブロック			⑳ブロック			⑨ブロック				⑳ブロック			
	下流側	上流側	上下流たわみ差	下流側	上流側	上下流たわみ差	下流側	上流側	上下流たわみ差	たわみ差の傾向	下流側	上流側	上下流たわみ差	たわみ差の傾向
1.00	100.3	100.3	0.0	100.0	100.0	0.0	215.6	218.0	2.4	1.1%	238.0	241.6	3.6	1.5%
1.10	110.4	110.4	0.0	110.1	110.1	0.0	307.2	312.6	5.4	1.7%	329.9	336.1	6.2	1.9%
1.20	120.7	120.7	0.0	120.3	120.3	0.0	422.5	433.5	11.0	2.6%	451.7	463.7	12.0	2.6%
1.50	154.4	154.4	0.0	153.5	153.5	0.0	833.8	872.3	38.4	4.5%	846.8	880.5	33.7	3.9%
1.70	189.1	189.1	0.0	188.9	188.9	0.0	1,403.9	1,482.4	78.5	5.4%	1,418.6	1,492.3	73.7	5.1%
3.00	1,093.5	1,093.6	-0.1	1,093.4	1,093.4	0.0								

図-7にTラーメン状態で自重を漸増した場合のたわみ推移図を示す。

健全時は1.7倍程度まではたわみ増加は小さく、これを超えると急激に増加するが、不連続性は見られない。

損傷時はたわみの増加傾向が大きく、1.5倍程度までは不連続性は見られないが、1.7倍程度になると橋脚位置から18.5mの位置(⑮⑯ブロック間)で不連続性が現れる。

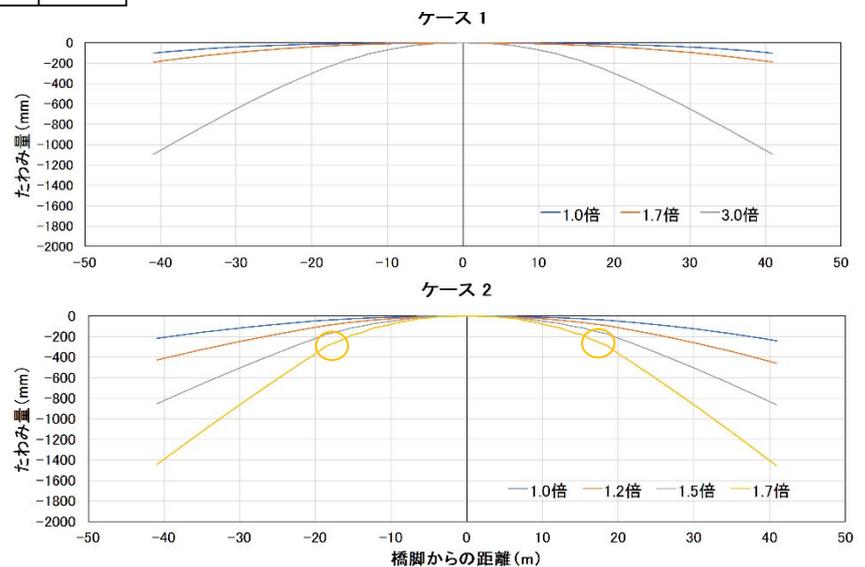


図-7 たわみ推移図

### 3.2 支点付近の応力度とひずみ分布

上下流側でP C鋼材の破断本数が異なっているため、面外曲げが作用しており、面内曲げと面外曲げを合成した通常的设计計算レベルでは、上流側に引張応力が生じる（図-8）。

引張応力の分布に着目した解析結果を図-9 に示す。

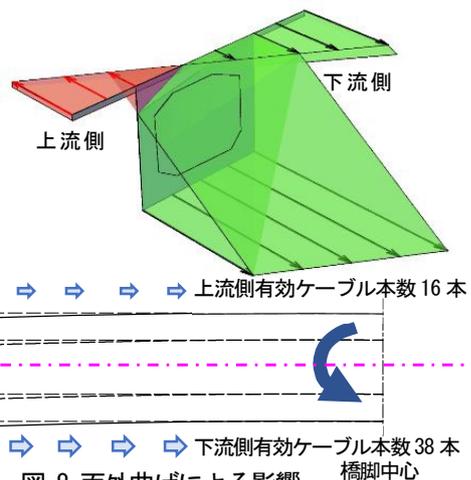


図-8 面外曲げによる影響

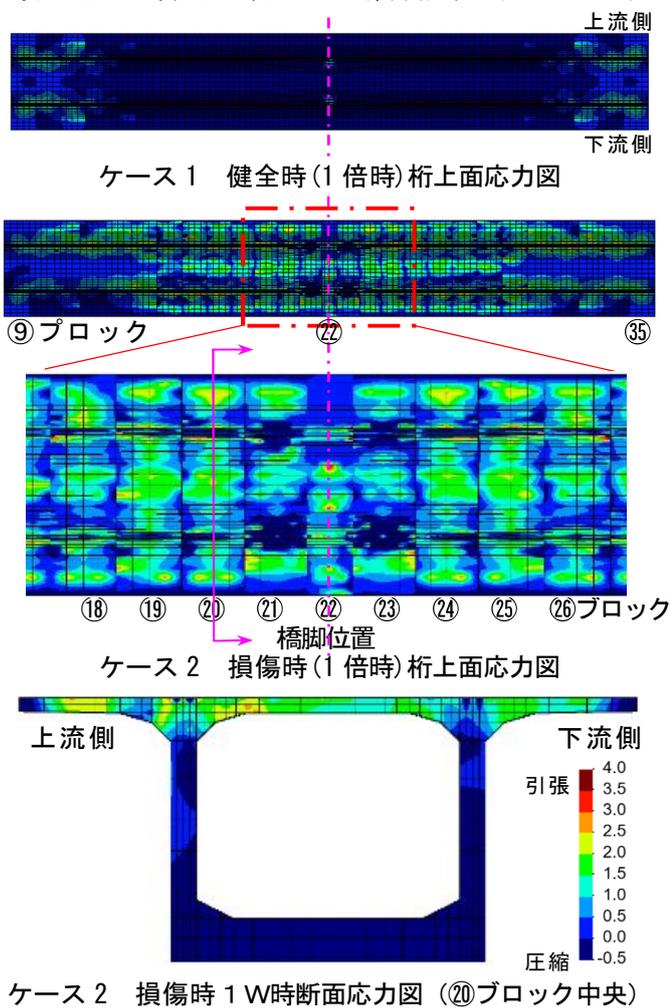


図-9 支点付近応力図

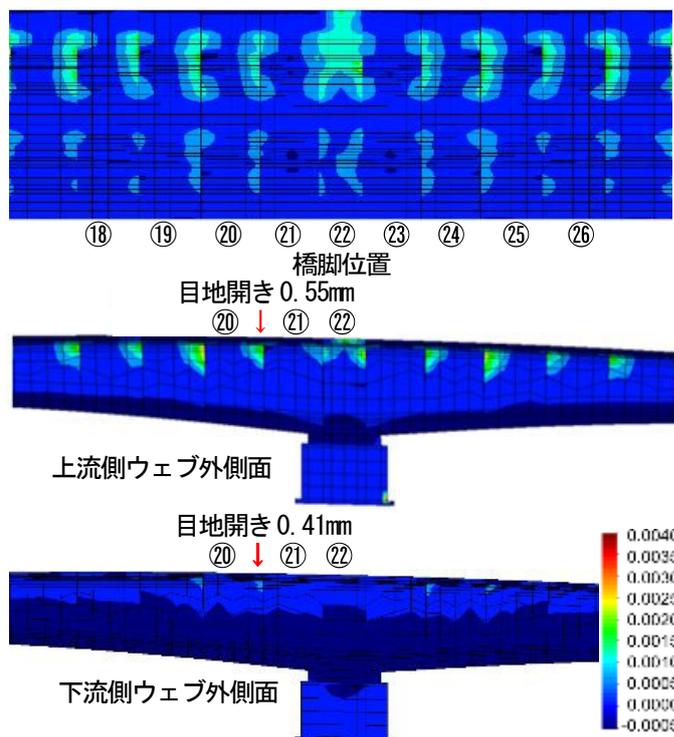


図-10 ケース2 ひずみ分布図

断面図は、橋脚支点上では横桁や仮固定部材の影響があるため、影響を受けない⑳ブロック中央断面にて示している。図-9 によれば、健全時の桁上面は圧縮応力状態であるが、損傷時は上流側ウェブの近傍で  $2.5\text{N/mm}^2$  程度の引張応力が生じており、上下流方向の応力分布は設計レベルの分布とは異なっている。またブロック継目付近ではブロック内の応力と比較し小さい。ブロック間はP C鋼材だけで繋がれ鉄筋が連続していないため、引張ひずみが継目付近で目地開きとなって解放されているためと考えられる。

桁側面のひずみ分布を図-10 に示す。ブロック継目付近のひずみは不連続で、ブロック間の目地開き量の最大値を抽出すると⑳㉑ブロック上流側の間で  $0.55\text{mm}$  生じている結果となった。

### 3.3 P C鋼材応力度

橋脚支点上の張出しP Cケーブルに着目して、自重漸増载荷時のP C鋼材の応力最大値と、それに対応するひずみの変化を図-11 に示す。ここでP C鋼材応力は各漸増段階での最大値を抽出して整理しており、1本のケーブルに着目したものではない。

自重の増加に従い応力とひずみは大きくなり、健全時は初期張力の  $900\text{N/mm}^2$  からひび割れ、あるいはブロック間の目地開きにより自重の1.6倍以降にP C鋼材の応力が急増し、約3倍以降でP C鋼材が降伏に至

っている。

損傷時は、最初の自重段階ですでにひび割れ、あるいはブロック間の目地開きが生じており、この時の腐食なしのPC鋼材応力は1190 N/mm<sup>2</sup>程度で、初期緊張力から増加していることが確認できる。1.5倍以降でPC鋼材が降伏に至っているが、腐食し強度低下した鋼材においても破断には至っていない。

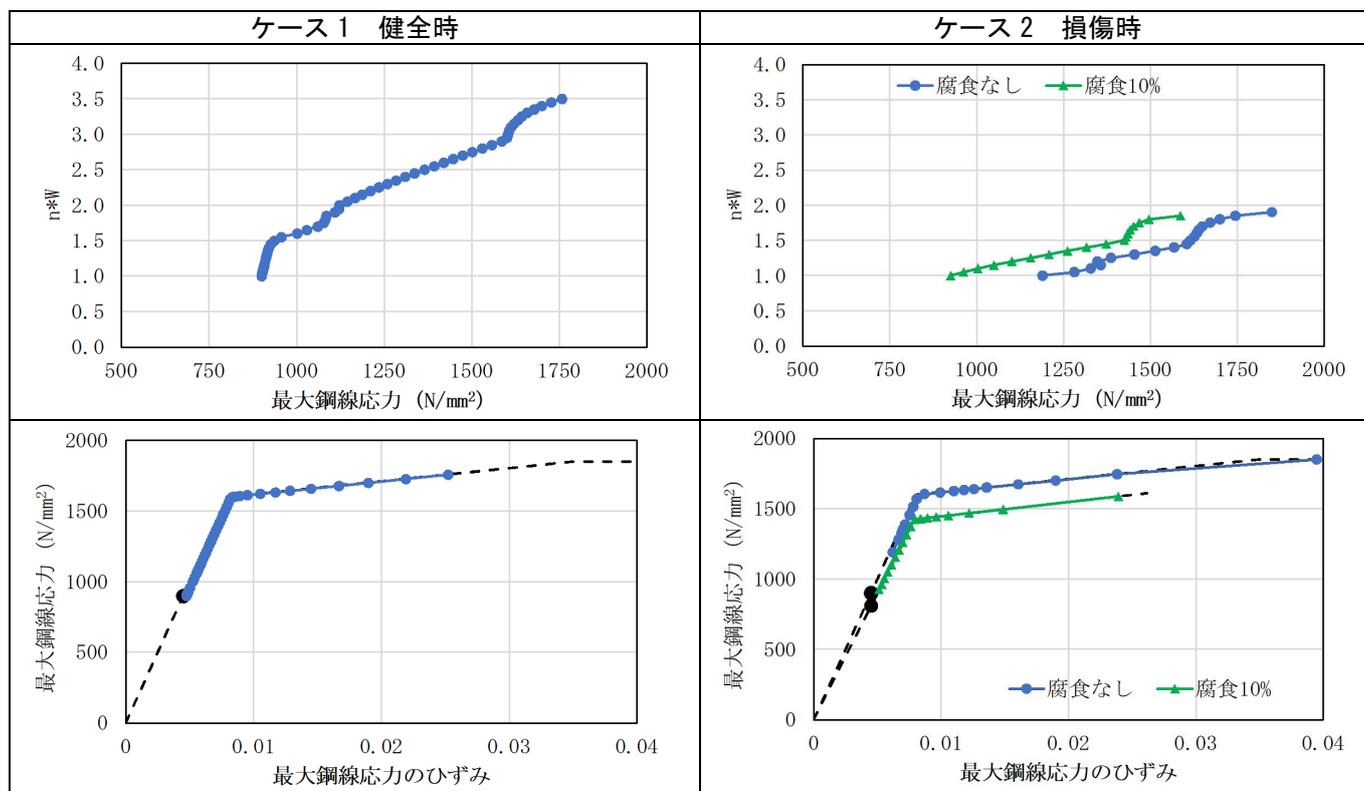


図-11 PC鋼材応力推移図

#### 4. まとめ

検討の結果、以下のことがわかった。

- ・PC鋼材の損傷を最大に考慮した場合の最大耐荷力は、健全時の自重の約3倍に対し、損傷時は約1.7倍程度まで低下するが、荷重-たわみ関係は自重の1.5倍程度までは線形挙動を示し、1.5倍まではPC鋼材は降伏しないことが確認できた。
- ・損傷時の剛性は健全時と比較し小さい。これはPC鋼材断面積が減少しプレストレス量が失われ荷重増加に対して引張領域が拡大するため、ひび割れ時の剛性は約6割程度低下することが分かった。またこの影響により連続桁からTラーメン構造へ移行時、健全時と比較し約12cm張出しブロック先端が下がることが想定される。
- ・実橋の損傷を再現した本解析では、PC鋼材の破断が上流側に多く非対称性があるため、Tラーメン状態での張出し先端のたわみ差は3mm程度生ずることが想定され、自重を漸増させるとたわみ差は増える傾向となった。
- ・引張応力の分布は設計計算レベルと異なっており、詳細解析でブロック間の目地開き量と合せて精度良く推定できる可能性があることが確認できた。

以上のことから、連続桁状態から橋脚上を仮固定しTラーメン構造に変化しても自立しており、かつ自重の1.5程度まで荷重たわみの関係は線形性を保持していること、解体時は作業荷重だけで大きな載荷重は作用しないことなどから、解体時の安全性は維持できるものと考えられる。

本報告が、今後のPC橋の撤去計画時の参考になれば幸いである。

【参考文献】 ※1 : Maekawa, K. et al: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, SPON PRESS, 2003.

※2 : 武田,田中ほか: 鋼材の腐食劣化が進行したPC連続箱桁橋の構造性能評価,構造工学論文集,Vol.66A,pp.712-724,2020.3