塩害により損傷したPC桁の耐荷力性能の評価

関西大学大学院理工学研究科　学生員○高橋和也　学生員　木野村宏昭
関西大学環境都市工学部　正会員　鶴田浩章　正会員　堂垣　正博

1. まえがき

高度経済成長期に建設された膨大な土木構造物が，現在，老朽化しつつあり，それらに対して適切な維持管理が求められている．その上，昨今の財政状況などから，合理的な橋梁の維持管理手法の確立が急務である．そのためには，既存の構造物の性能を正確に評価する必要がある．

本研究では，PC桁形式の長ヶ嶽橋を参考に，PC鋼棒の腐食による材料特性の変化と導入プレストレス力の変動に着目し，劣化損傷したPC桁橋の終局状態に至るまでの挙動と強度を解析的に明らかにする．

2. 対象橋梁とPC桁橋の弾塑性曲げ強度解析

2. 1 PC桁の解析モデル

大阪府枚方市を通る長ヶ嶽橋を参考に，汎用有限要素解析プログラム“MARC2010.2”で弾塑性曲げ解析を行う．橋梁の劣化過程をPC鋼棒の腐食に限定し，それを断面積の減少で表現した．

橋長27.5mの長ヶ嶽橋の主桁断面を図-1に示す．コンクリートをソリッド要素，鉄筋とPC鋼棒を棒要素でモデル化した．コンクリートと鉄筋，PC鋼棒は各々の要素の節点を共有し，腐食に伴う付着力の減少は考慮していない．桁断面の要素分割は図-2のとおりで，橋軸方向には30分割した．コンクリートの降伏条件にMohr-Coulombの降伏式を適用した．また，非線形代数方程式の解法にNewton-Raphson法を採用し，荷重は単純桁の支間中央に変位制御で漸増的に載荷した．桁橋の終局状態を支間中央の上縁コンクリートが圧壊したときと定義し，その時点で解析を終えた．

2. 2 材料特性

PC桁を構成するコンクリートと鉄筋の応力-ひずみ関係を図-3に示す．また，表-1に材料特性を示す．PC鋼棒は腐食の進展に伴い引張強度や破断伸びが低下する性質がある．PC鋼棒の断面欠損率ごとの応力ーひずみ関係を図-4[1)]に，材料特性を表-2に示す．

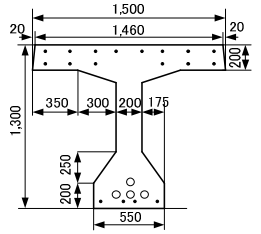


図-1　主桁の断面図

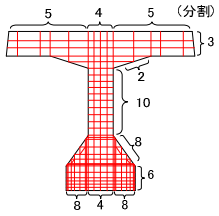
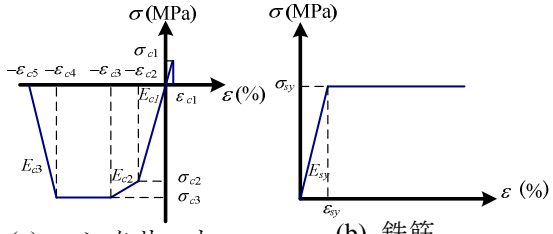


図-2　桁断面の要素分割



(a) コンクリート　(b) 鉄筋

図-3　コンクリートと鉄筋の材料特性

表-1 コンクリートと鉄筋の材料特性

コンクリート				鉄筋（SD30）	
E_{c1} (GPa)	31	ε_{c1} (%)	0.0129	E_{sy} (GPa)	210
E_{c2} (GPa)	9	$-\varepsilon_{c2}$ (%)	0.1	σ_{sy} (MPa)	294
E_{c3} (GPa)	-40	$-\varepsilon_{c3}$ (%)	0.2	ε_{sy} (%)	0.14
σ_{c1} (MPa)	4	$-\varepsilon_{c4}$ (%)	0.35	ν_s	0.3
σ_{c2} (MPa)	-31	$-\varepsilon_{c5}$ (%)	0.36		
σ_{c3} (MPa)	-40	ν_c	0.2		

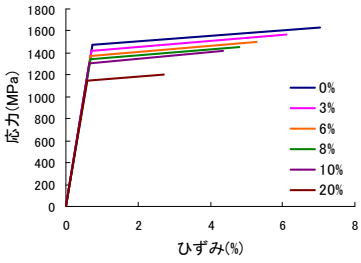


図-4　PC鋼棒の応力ーひずみ関係

表-2 PC鋼棒の材料特性

断面欠損率 (%)	ヤング率 (GPa)	ポアソン比	降伏応力 (MPa)	降伏ひずみ (%)	破断強度 (MPa)	破断ひずみ (%)
0	200	0.3	1,470	0.735	1,628	7.05
3			1,421	0.713	1,564	6.10
6			1,372	0.692	1,501	5.29
8			1,341	0.677	1,458	4.80
10			1,308	0.662	1,416	4.36
20			1,147	0.587	1,204	2.70

キーワード：劣化損傷，PC鋼棒，導入プレストレス力，弾塑性曲げ解析，性能評価
連絡先：〒564-8680　大阪府吹田市山手町3-3-35　TEL.06-6368-0882　FAX.06-6368-0882

3. 数値解析結果とその考察

PC 鋼棒の腐食による断面欠損と導入プレストレス力量が PC 桁の力学特性に及ぼす影響を検討するため，弾塑性曲げ解析を行った．解析ケースを表-3 に示す．

断面欠損率を 0%～8%の範囲（Case 1～Case 4）で変化させた場合の桁の曲げ強度曲線を図-5 に示し，その結果を表-4 にまとめる．これらの図表から明らかなように，PC 鋼棒の断面欠損率の増加とともに PC 桁の曲げ強度は低下する．腐食による鋼棒の断面欠損が進展するに伴い，PC 鋼棒に作用する引張応力のレベルが高くなる．それゆえ，PC 鋼棒の腐食に伴う材料強度の低下を想定すれば，プレストレス力に対する PC 鋼棒の応力レベルを材料の持つ降伏応力付近まで導入することは得策でない．

そこで，導入プレストレス力に対応する PC 鋼棒の作用応力を 70%程度に減少させた Case 5～Case 9 のモデルに対して弾塑性曲げ解析を行った．得られた PC 桁の曲げ強度曲線を描けば図-6 を，その結果をまとめれば表-5 を得る．鋼棒の断面欠損率が 10%から 20%の間で PC 桁の破壊モードがコンクリートの圧壊から PC 鋼棒の破断に転移した．桁の耐力に着目すると，Case 1～Case 4 と同様の結果が得られた．

つぎに，表-4 と表-5 に対し，鋼棒の断面欠損率 8%の結果を比較する．PC 鋼棒に導入する応力を変化させた 2 パターンの終局時の性能にほとんど差異は見られない．すなわち，導入プレストレス力に対応する PC 鋼棒の応力をある程度低下させても PC 桁橋の終局時の性能に大きな変化はみられない．腐食による強度低下が鋼棒に作用する応力に影響されないことを考慮すれば，PC 鋼棒の破断に注意しつつ，鋼棒に適切なレベルの応力を導入することが肝要である．

4. あとがき

劣化損傷下にある PC 桁を対象に，その弾塑性曲げ解析を実施した．劣化に伴い，導入プレストレス力に対応する PC 鋼棒の応力減少を勘案し，耐荷性能を検討した．腐食による材料性能の低下から，鋼棒に適切なレベルの応力を導入する必要があることがわかった．

本研究で示した手法に基づけば，腐食損傷下にある PC 桁の性能が解析上から評価でき，得られた PC 桁の力学特性を維持管理用の指標に活用できる．

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(材料・コンクリート構造)，Vol.67，No.3，pp.333-350，2011.

表-3 解析ケース

解析ケース	PC鋼棒欠損率(%)	PC鋼棒断面積(mm^2)	鉄筋断面積(mm^2)	導入プレストレス力(kN)	PC鋼棒に作用する引張応力(MPa)
Case 1	0	1,115	199	1,370	1,225
Case 2	3	1,082	193		1,263
Case 3	6	1,048	187		1,303
Case 4	8	1,026	183		1,332
Case 5	0	1,115	199	956	858
Case 6	6	1,048	187		912
Case 7	8	1,026	183		932
Case 8	10	1,004	179		953
Case 9	20	892	159		1,072

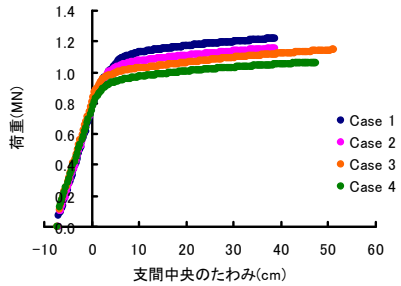


図-5 桁の曲げ強度曲線（Case 1～Case 4）

表-4 終局時の桁の性能(Case 1～Case 4)

PC鋼棒断面欠損率 (%)	0	3	6	8
破壊モード	上縁コンクリートの圧壊			
終局曲げ強度 (MN)	1.22	1.16	1.14	1.06
終局時の支間中央のたわみ (cm)	38.7	38.8	51.1	47.5

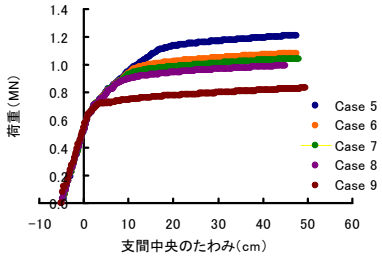


図-6 桁の曲げ強度曲線(Case 5～Case 9)

表-5 終局時の桁の性能(Case 5～Case 9)

PC鋼棒断面欠損率(%)	0	6	8	10	20
破壊モード	上縁コンクリートの圧壊				鋼棒破断
終局(PC鋼棒破断)時の曲げ強度(MN)	1.21	1.08	1.04	0.992	0.854
終局(PC鋼棒破断)時の支間中央のたわみ(cm)	47.6	47.5	48.1	45.1	49.5