

関西大学大学院理工学研究科 学生員 ○木野村宏昭 関西大学環境都市工学部 森島未来
 関西大学大学院理工学研究科 学生員 篠宮 拓 関西大学環境都市工学部 正会員 鶴田浩章
 関西大学総合情報学部 正会員 古田 均 関西大学環境都市工学部 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、大阪府枚方市を通る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

(1) PC桁橋の解析モデル

長ヶ嶽橋を参考に、汎用有限要素解析プログラム“MARC2010.2”を用いて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、それに対応してプレストレスを段階的に減少させて解析する。ここに、PC鋼棒の腐食は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示すれば、図-1のようである。コンクリートをソリッド要素、鉄筋とPC鋼棒をトラス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化した。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。降伏条件に、コンクリートはMohr-Coulombの降伏条件式を、鉄筋とPC鋼棒はvon Misesの等価応力を適用した。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载荷した。桁橋の終局状態を支間中央における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) 材料特性

PC桁橋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にその材料特性を示す。PC鋼棒は腐食の進展とともに引張強度や破断伸びが低下する性質を有している。PC鋼棒の断面欠損率ごとの応力-ひずみ関係を図-4¹⁾に、材料特性を表-2に示す。

3. 数値解析結果とその考察

PC鋼棒の腐食による断面の欠損と導入プレストレス力がPC桁橋の力学特性に及ぼす影響を明らかにするため、弾塑性曲げ解析を行った。解析ケースを表-3に示す。

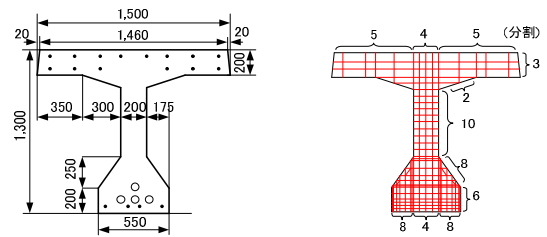


図-1 主桁の断面図

図-2 桁断面の要素分割

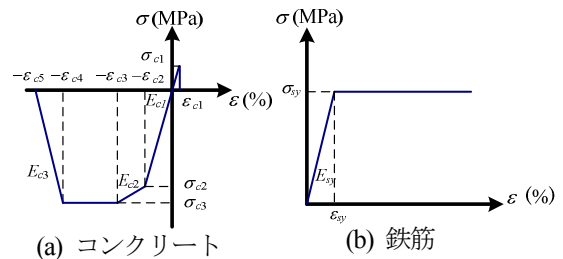


図-3 コンクリートと鉄筋の材料特性

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	$-\epsilon_{c2}$ (%)	0.1	σ_{sy} (MPa)	294
E_{c3} (GPa)	-40	$-\epsilon_{c3}$ (%)	0.2	ϵ_{sy} (%)	0.14
σ_{c1} (MPa)	4	$-\epsilon_{c4}$ (%)	0.35	ν_s	0.3
σ_{c2} (MPa)	-31	$-\epsilon_{c5}$ (%)	0.36		
σ_{c3} (MPa)	-40	ν_c	0.2		

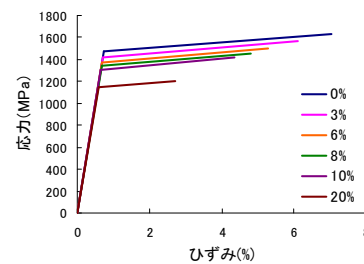


図-4 PC鋼棒の応力-ひずみ関係

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	1470	0.735	1628	7.05
3			1421	0.713	1564	6.10
6			1372	0.692	1501	5.29
8			1341	0.677	1458	4.80
10			1308	0.662	1416	4.36
20			1147	0.587	1204	2.70

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	1115	199	1370	1225
Case 2	3	1082	193		1263
Case 3	6	1048	187		1303
Case 4	8	1026	183		1332
Case 5	0	1115	199	956	858
Case 6	6	1048	187		912
Case 7	8	1026	183		932
Case 8	10	1004	179		953
Case 9	20	892	159		1072

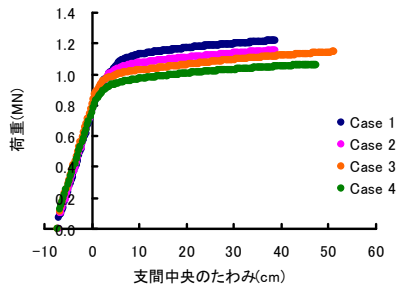


図-6 桁の曲げ強度曲線 (Case 1~Case 4)

表-4 終局時の桁の性能 (Case 1~Case 4)

PC鋼棒断面積欠損率 (%)	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

導入プレストレス力を設計どおりに与え、PC 鋼棒の断面欠損率を0%~8%の範囲 (Case 1~Case 4) で変化させた場合の PC 桁橋の曲げ耐力と支間中央のたわみの関係を描けば、図-6 を、その結果をまとめれば、表-4 を得る。

PC 鋼棒の断面欠損率が 0%の場合、コンクリートが圧壊するときのひずみ-0.0035 に相当する終局曲げ耐力の理論値は、1.22MN である。一方、本解析による終局曲げ耐力は 1.22MN で、両者は完全に一致した。図-6 と表-4 から明らかのように、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。現実のように、初期に導入されるプレストレス力が非常に大きいと、腐食が進展するに従って、断面の欠損が多くなり、初期の段階から 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 鋼棒の腐食とそれに伴う材料強度の低下を想定すれば、プレストレス力を PC 鋼棒が保有する引張強度付近まで導入することは得策でない。

そこで、導入するプレストレス力を Case 1~Case 4 の場合と比べて、80%ほどに減少させた 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 桁橋の曲げ強度と支間中央のたわみの関係を描けば図-7 を、そ

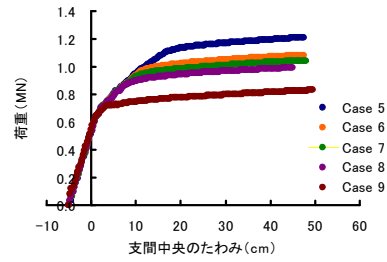


図-7 桁の曲げ強度曲線 (Case 5~Case 9)

表-5 終局時の桁の性能 (Case 5~Case 9)

PC鋼棒断面積欠損率 (%)	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

の結果をまとめれば、表-5 を得る。

鋼棒の断面欠損率 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、PC 鋼棒の断面欠損率が増加すれば、PC 桁の曲げ強度は低下する。

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。導入プレストレス力を変化させた 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がある程度低下させても腐食により劣化損傷した PC 桁橋の終局時の性能に大きな変化はみられないことがわかった。腐食によって材料の性能が低下することを考慮すれば、PC 鋼棒の破断に注意しつつ、バランスよくプレストレス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。PC 鋼棒の劣化損傷に対応する導入プレストレス力の減少を勘案し、PC 桁の耐荷性能を検討した。PC 桁橋の場合、腐食による断面欠損と材料性能の低下から、バランスよくプレストレス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 桁橋の性能が解析上から評価でき、得られた PC 桁橋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.