

外ケーブルにより補強する PC 合成桁橋の補強効果の検証

日本道路公団九州支社構造技術課 正会員 ○西川孝一
 日本道路公団九州支社久留米管理事務所 石村勝則
 日本道路公団試験研究所 正会員 野島昭二
 (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会 正会員 江良和徳

1. はじめに

PC 橋は PC 鋼材が健全であれば耐久性の高い構造形式といえるが、塩害等により PC 鋼材が腐食し断面欠損が生じた場合、プレストレスの損失により耐荷力が低下するとともに、ひび割れ発生等により耐久性も急激に低下する。PC 鋼材の腐食等によりプレストレスの低下が懸念される場合、外ケーブルにより補強する方法が最も有力な補強工法として挙げられるが、外ケーブルによる補強効果を実橋で計測した事例は少なく¹⁾、また桁橋において外ケーブルによるプレストレスの横方向の分配を検討した事例はほとんどない。

本研究は、プレストレスが低下したと判断されるポストテンション PC 合成桁橋を対象に、損失したプレストレスに対し外ケーブル補強の設計を行い、外ケーブル補強の効果について実橋計測によって検証するものである。補強設計は格子モデルによる解析とし、補強時に導入する外ケーブルの張力に対するコンクリートの応力度の変化について計測を行い、外ケーブルによる補強効果および外ケーブルにより導入されたプレストレスの横方向の分配に関する検討を行ったものである。

2. 補強対象橋梁の概要

外ケーブル補強工事の対象となった橋梁の諸元は以下のとおりである。

構造形式 ポストテンション PC 単純合成桁橋
 橋 長 33.20m
 支 間 32.34m
 有効幅員 11.00m
 荷 重 TL-20
 建 設 年 1973 年

対象橋梁の全景を写真-1に、主桁形状の概要を図-1、図-2に示す。

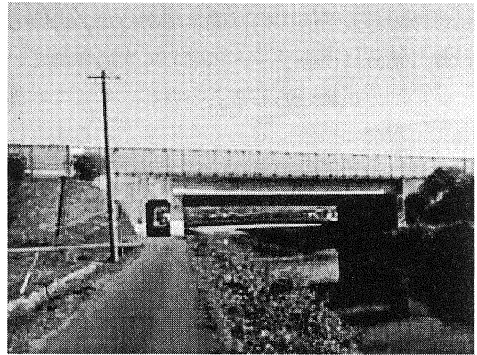


写真-1 対象橋梁全景

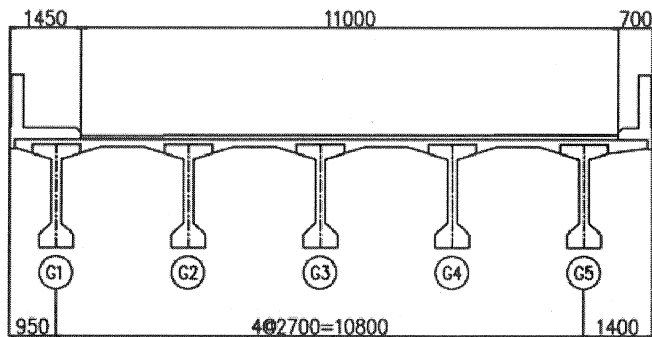


図-1 主桁形状概要

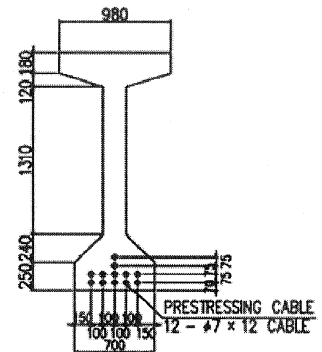


図-2 主桁断面図

本橋では凍結防止剤の散布の影響により部分的に耳桁(G1桁)支間中央付近の主桁下フランジ下面において、コンクリートの浮き・剥離が確認された(写真-2)。コンクリート剥離箇所をはつり取ってみると、鉄筋およびPC鋼材が著しく腐食しており、最下段5本の主ケーブル(12-φ7)のうちの4本に、一部の素線の破断が確認された(写真-3)。

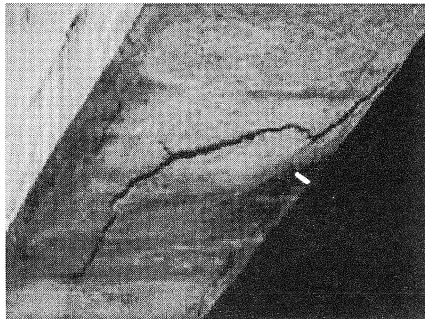


写真-2 G1桁下面の変状

素線が破断している箇所に着目すると、破断面の間隔が目開きしていないことが分かる。このことから、主ケーブル健全部のグラウトにより付着が保たれており、プレストレスの損失範囲は鋼材の破断箇所周辺に限定されていたと考えられる。素線破断箇所の近傍で鋼製シーすをはつり出し、内部の状況を確認したところ、グラウトは確実に充填されていた。

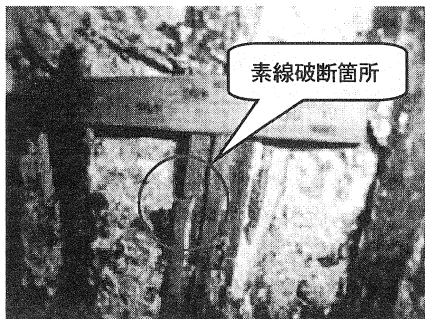


写真-3 G1桁PC鋼材破断状況

なお、残りのG2~G5桁には何ら変状は見られず、健全な状態であった。

3. 補強設計

3.1 補強計画

本橋は、図-1に示すとおり5主桁により構成されているが、PC鋼材の腐食によりプレストレスの損失が懸念されるのはG1桁のみであり、他の桁は健全であった。車両の大型化に伴う既設橋の補強は損傷ランクに応じて実施されているが、本橋ではG1桁の補強を行えば橋全体の損傷ランクは一定の回復が見込めることとなる。そこで本橋では、将来行われる車両の大型化に対する補強を見越したうえで、現在の損傷に対しても安全となるように、表-1に示すように段階的な補強計画を立案した。

本橋は建設段階ではTL-20に対して照査され断面が決定されていた。補強前のG1桁ではPC鋼材の損傷を考慮した照査が必要となった。補強対象をG1桁のみとした場合、プレストレスの横方向の分配の影響により、他の桁で引張応力が発生する懸念があった。そこで他の桁においてはG1桁の分配の影響を受けてもTL-20に対して安全であるかどうかの照査が必要となった。照査の結果、G5桁でG1桁のプレストレス導入によりTL-20に対しての安全性が満足できない結果となったため、本橋では少なくともG1桁だけではなくG5桁も補強を行うこととした。なお、G1、G5桁における導入プレストレスは、最終的なB活荷重に対する照査に対しても、残りのG2桁からG4桁の補強を行えば追加の補強が必要ないよう決定した。

表-1 補強計画概要

検討段階	対象とする主桁	活荷重	照査結果	備考
1 建設時	全主桁	TL-20	OK	当初設計
		B活荷重	OUT	
2 G1桁損傷状態	全主桁	TL-20	G1桁でOUT	補強設計の実施
		B活荷重	OUT	
3 G1,G5桁補強	G2, G3, G4桁	TL-20	OK	今回の補強工事の範囲として、G1桁とG5桁に外ケーブル補強を実施
	G1, G5桁	B活荷重	OK	
4 B活荷重対応	全主桁	B活荷重	OK	さらにG2~G4桁に外ケーブルを追加して、B活荷重対応完了

3. 2 PC 鋼材損傷の設計上の取り扱い

PC 鋼材の損傷によりプレストレスの低下が懸念される合成桁橋の補強設計では、PC 鋼材の腐食によりプレストレスが損失している断面と、グラウトによりプレストレスが損失していない断面の両方に着目して補強設計を行うことが重要である。グラウトによりプレストレスが損失していない断面に対し、外ケーブルにより過度のプレストレスを導入すると圧縮側で許容範囲を超えるような問題が生じうる。

そこで本橋の補強設計では、G1 における PC 鋼材の腐食に対して局部断面的にプレストレスが損失し、他の断面ではグラウトによりプレストレスの損失がなかった場合に対しても、所定の安全性が確保されていることを確認した。

G1 桁内の PC 鋼材の配置は図-2 に示すとおりである。補強前の状況では最下段に配置された PC 鋼材に腐食がみられ、一部の鋼材で破断が確認されたが、補強設計においては鋼材の腐食の進行を考慮して、再下段に配置された 4 本の PC 鋼材が完全に破断していると仮定して損傷時のプレストレスの算出を行った。

3. 3 格子解析

本橋の解析は図-3 に示すように床版に相当する部材を横桁間に配置することにより、床版剛性を考慮した平面格子解析とした。

一部の桁のみに外ケーブルの緊張力を導入すると、その変形は外ケーブルが配置されていない桁の拘束を受け 2 次応力

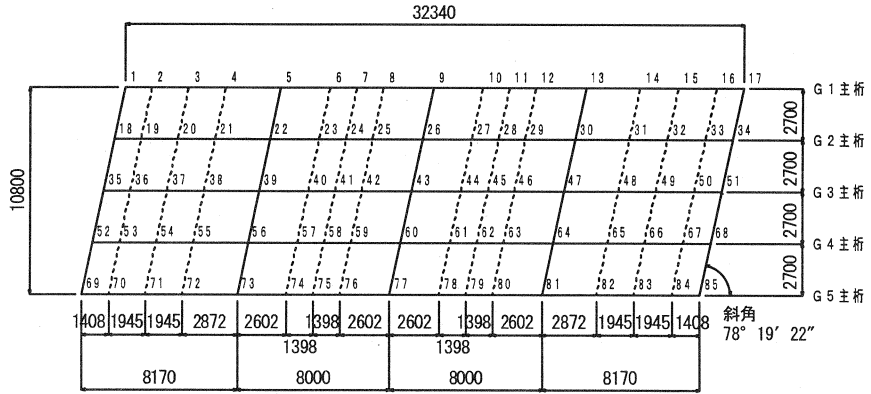


図-3 格子解析モデル

が作用し、他の主桁の応力状態が変化する。そのため、全主桁の応力状態について検討を行った。

各検討段階における検討結果を表-2 に示す。

表-2 検討結果一覧

[グラウトによりG1桁のプレストレスの損失がない場合の照査結果]

主桁	補強前での照査(TL-20)					G1, G5桁補強状態での照査(TL-20)					B活荷重に対する照査(B活荷重)				
	外ケーブル種類	外ケーブル緊張力 (kN/本)	主桁下縁応力度 (N/mm ²)	曲げ破壊安全度	判定	外ケーブル種類	外ケーブル緊張力 (kN/本)	主桁下縁応力度 (N/mm ²)	曲げ破壊安全度	判定	外ケーブル種類	外ケーブル緊張力 (kN/本)	主桁下縁応力度 (N/mm ²)	曲げ破壊安全度	判定
G1	—	—	0.122	1.224	○	F170TS	888.0	3.257	1.369	○	F170TS	888.0	2.937	1.308	○
G2	—	—	—	—	○	—	—	1.267	1.254	○	F50TS	297.0	1.511	1.232	○
G3	—	—	—	—	○	—	—	1.090	1.251	○	F50TS	297.0	1.296	1.228	○
G4	—	—	—	—	○	—	—	-0.092	1.165	○	F50TS	297.0	-0.071	1.137	○
G5	—	—	—	—	○	F70TS	428.4	-0.734	1.129	○	F70TS	428.4	-1.391	1.034	○
許容値	—	—	>-1.5	>1.00	—	—	—	>-1.5	>1.00	—	—	—	>-1.5	>1.00	—

[PC鋼材腐食によりG1桁のプレストレスの損失がある場合の照査結果]

主桁	補強前での照査(TL-20)					G1, G5桁補強状態での照査(TL-20)					B活荷重に対する照査(B活荷重)				
	外ケーブル種類	外ケーブル緊張力 (kN/本)	主桁下縁応力度 (N/mm ²)	曲げ破壊安全度	判定	外ケーブル種類	外ケーブル緊張力 (kN/本)	主桁下縁応力度 (N/mm ²)	曲げ破壊安全度	判定	外ケーブル種類	外ケーブル緊張力 (kN/本)	主桁下縁応力度 (N/mm ²)	曲げ破壊安全度	判定
G1	—	—	-4.553	0.815	×	F170TS	888.0	0.238	1.063	○	F170TS	888.0	-0.082	1.013	○
G2	—	—	—	—	○	—	—	-0.264	1.173	○	F50TS	297.0	-0.019	1.159	○
G3	—	—	—	—	○	—	—	0.267	1.206	○	F50TS	297.0	0.473	1.188	○
G4	—	—	—	—	○	—	—	-0.105	1.165	○	F50TS	297.0	-0.083	1.136	○
G5	—	—	—	—	○	F70TS	428.4	0.073	1.163	○	F70TS	428.4	-0.584	1.063	○
許容値	—	—	>-1.5	>1.00	—	—	—	>-1.5	>1.00	—	—	—	>-1.5	>1.00	—

3. 4 設計導入プレストレスの決定

検討の結果、PC ケーブル損傷によるプレストレスの低下に対し、G1 桁ではB 活荷重に対しての照査をも満足できるようにF170TS を左右1本ずつ配置した。損傷したG1 桁のみに緊張力を与えると、中桁の拘束による天秤状態となりG5 桁の応力状態が現状より悪化するため、G5 桁にも外ケーブルを配置することとし、導入プレストレスはG1 同様に将来のB 活荷重対策に対しても追加の補強が不要となるようにF70TS を配置した。決定した外ケーブル補強概要を表-3に、補強概要図を図-4に示す。

表-3 外ケーブル補強概要

外ケーブル			
補強桁	ケーブル種別	本数	導入緊張力
G1	F170TS	2本/桁	888kN/本
G5	F70TS	2本/桁	428kN/本

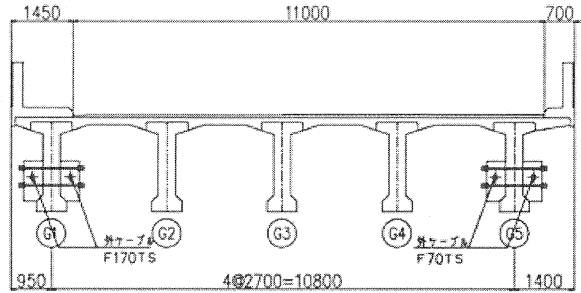


図-4 補強概要図

4. 計測

4. 1 計測概要

本橋の外ケーブル補強施工時に実施した計測項目の概要を図-5、表-4に示す。

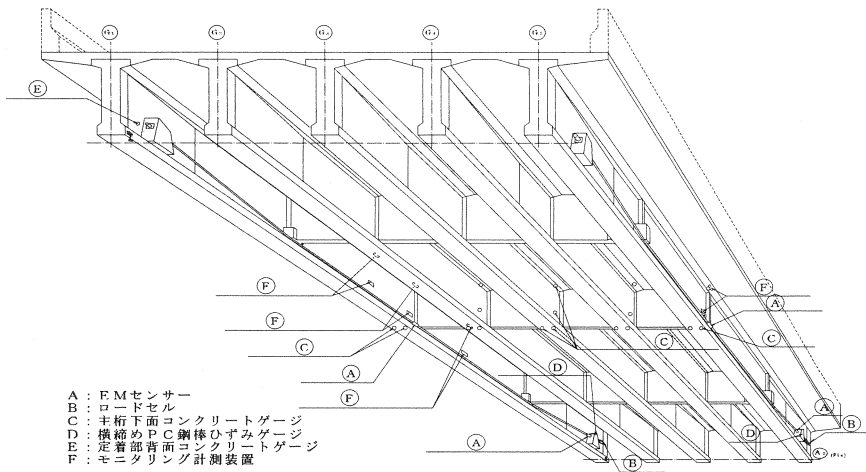


図-5 計測工概要図

表-4 計測項目一覧表

番号	計測目的	計測方法
A, B	・外ケーブルの導入緊張力の測定 ・導入緊張力の経時変化	G1, G5 桁の外ケーブル定着部にロードセル G1, G5 桁の外ケーブル中央部に EM センサ
C	・外ケーブル緊張による導入応力度の測定 ・外桁緊張力の中桁への分配状況	G1~G5 の各桁支間中央部にコンクリートゲージ
D	・定着ブロック横締め PC 鋼棒の導入緊張力の測定 ・緊張作業時の緊張力モニタリング	G5 桁定着ブロックの横締め PC 鋼棒にひずみゲージ (外ケーブル補強工事の施工管理に利用可能)
E	・定着ブロック後方付近の局部応力の測定	G1, G5 桁の定着ブロック後方にコンクリートゲージ
F	・既設橋の鉄筋既存応力度の測定 ・外ケーブル緊張による既存応力度の変化	モニタリング計測装置 (鉄筋切断法) を G1 桁に 3×2 箇所, G5 桁に 1×2 箇所

4. 2 補強前のプレストレス計測

本橋では、外ケーブル補強前に損傷断面近傍におけるプレストレスを鉄筋切断法により計測している。計測の結果、損傷箇所から約 500mm は離れた箇所では建設時に導入されたプレストレスがほぼ残存していることが確認された。この結果より、本橋では PC 鋼材の腐食によるプレストレスの低下は損傷箇所近傍のごく限られた範囲に限定されており、グラウトにより損傷箇所から 500mm 程度以上離れた範囲ではプレストレスの低下はないと推定された。

4. 3 外ケーブル緊張ステップ

本橋ではG5桁よりG1桁のほうが大きなプレストレスを導入する計画となっており、緊張導入の各ステップにおける計算結果に基づき、G5桁、G1桁の順で緊張することとした。各桁では左右に配置された外ケーブルに対し、157kN ずつ、G5桁では4ステップ、G1桁では7ステップの段階で緊張した。写真-4に緊張中の状況を示す。

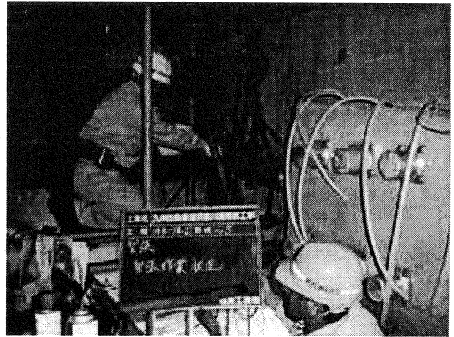


写真-4 外ケーブル緊張状況

4. 4 外ケーブルの導入による補強効果

G1桁における緊張ステップ毎の中央部下縁ひずみを図-6に示す。G5桁を先に緊張した関係で、分配の影響により最大約 5 μ の引張ひずみが発生していたが、G1桁緊張後には設計値の約 80%に相当する約 80 μ の圧縮ひずみが導入されていた。設計値に対して実測値が小さくなったのは、設計で考慮していない地覆の影響等と考えられる。この結果から、G1桁では設計段階で計画していた応力が導入されていたことが計測結果からも立証されたと判断できる。

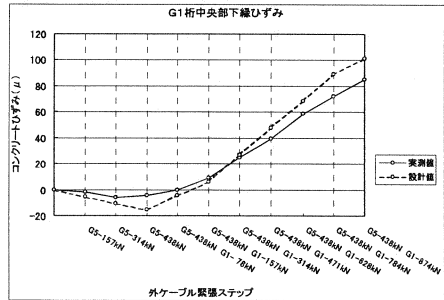


図-6 G1桁中央部下縁ひずみ

4. 5 外ケーブルの導入における分配の影響

載荷ステップ毎の桁中央部下縁ひずみを、図-7から図-10に示す。G2桁からG4桁では、G5桁の緊張およびそれに続いて行われたG1桁の緊張により、格子解析の結果からも圧縮ひずみが発生することが予想された。計測の結果、これらの桁からはほぼ設計上見込まれた圧縮ひずみが発生しており、格子解析により十分な精度でプレストレスの分配の影響を推定できることが検証された。

G5桁ではG1桁の緊張により約 30 μ の引張ひずみが発生することが予想されていたが、計測の結果、実際

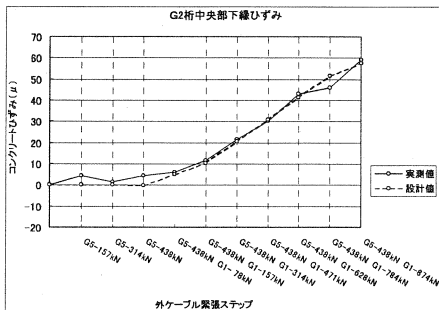


図-7 G2桁中央部下縁ひずみ

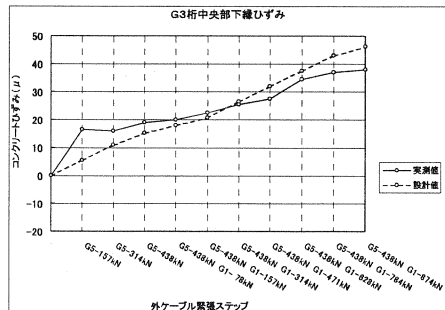


図-8 G3桁中央部下縁ひずみ

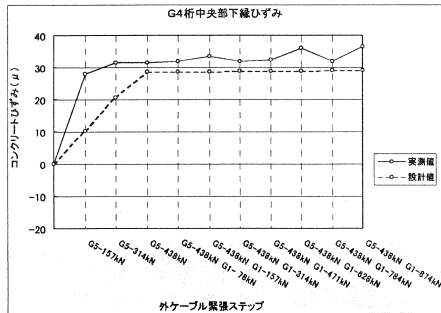


図-9 G4 桁中央部下縁ひずみ

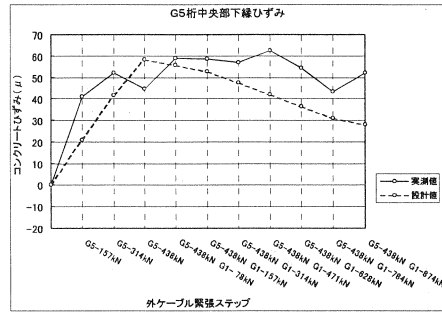


図-10 G5 桁中央部下縁ひずみ

に発生したのは最大約 20 μ の引張ひずみであった。この結果から、PC 鋼材等の損傷に対して外ケーブルにより特定の桁のみを補強する場合、外ケーブルによるプレストレスの導入によって他の桁で引張応力が発生することとなるが、その影響は格子解析により十分な精度で推定できることが明らかになった。

5. 結論

- ① 床版剛性を考慮した格子解析により設計されたポストテンション PC 単純合成桁橋において、設計上必要なプレストレスを導入した結果、実橋で設計上予定していた応力が導入されていたことが確認され、十分な補強効果が得られたことを検証できた。
- ② PC 鋼材等の損傷に対して外ケーブルにより特定の桁のみを補強する場合、外ケーブルによるプレストレスの導入によって他の桁で引張応力が発生することとなるが、その影響は格子解析により十分な精度で推定されることが明らかになった。
- ③ グラウトがほぼ完全に行われている PC 橋でも PC 鋼材が腐食し、プレストレスが損失する可能性があることが本橋により示された。このような場合、プレストレスの損失は損傷断面近傍に限定されるため、補強設計においてはプレストレスの損失とプレストレスの残留の両方の影響を考慮する必要がある。

謝辞

本橋の外ケーブル補強工事における計測工は、日本道路公団試験研究所と(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会との共同研究として実施したものである。本工事の設計、施工、計測工にあたって多大なるご指導、ご尽力をいただいた日本道路公団九州支社の藤村氏、日本道路公団久留米管理事務所の山本氏、極東工業(株)の浦川氏、その他関係各位に心から感謝の意を表します。

参考文献

1) 酒井伸治・遊佐和明・柳武夫・吉田光秀: RC2径間連続箱桁橋の補強工事, プレストレストコンクリート, Vol. 37, No. 6, pp. 33~41, 1995. 11