

東西線 PC 橋の維持管理に関するリスクアセスメント†

西 弘* 大塚 努** 亀井 啓太** 大西 弘志***

Risk Assessment about the Maintenance of the PC Bridge in Tozai Line

by

Hiroshi NISHI*, Tsutomu OTSUKA**, Keita KAMEI** and Hiroshi ONISHI***

Tozai line is the metro rail system serving the urban areas in Tokyo. It was built in 1960s and a construction method, PCT girder bridges is one of the most majority designs still in use through this rail system. In order to identify risk factors and determine appropriate ways to control the hazards, risk assessment for PC Bridge has to be conducted during maintenance activities. In this study, during the stage of construction, two main sources in risk analysis which cause a great failure or decline are insufficient PC grout filling and breaking of the PC steel member, respectively. On the other hand, according to the results of general inspection used in risk analysis, it reveals that although no severe deterioration occurred and the risk of present load-bearing capacity is low, the third-party disasters still retain risks. Therefore, the study reports herein attempt to address risk assessment process to evaluate hazards for PC bridges. Furthermore, considering the risks during the construction stage and the maintenance period, the former issue is evaluated by PC grouted filling condition; whereas the latter is judged by engineers to determine the proper protective approaches to that risks. Finally, by adopting the numerical analysis associated with above issues, the relationship between any changes in appearance and load-bearing capacity for PC bridges are assessed.

Key words:

Risk assessment, PC Bridges, Cable grout evaluation, Analytical study, Maintenance

1 緒 言

東京地下鉄(株)(以下、東京メトロと称す)では、現在、営業線約195kmのうちトンネルが約85%を占めている。残りの地上構造物は15%であり、そのうち、約9%の17.4kmがポストテンション方式単純Tけた橋(以下、PCTけた橋と称す)である。

東京メトロのPCTけた橋は1960年代に建設されている高架橋であり、その多くが市街地に隣接している。一般に鉄道構造物は2年に1回の通常全般検査が実施されているが、現行の維持管理標準には、PC構造物の健全性に大きく影響を与えるPCグラウト充填状況やPC鋼材の腐食状況を評価する方法は具体的に記されてなく、外観上でPC橋の健全性を評価することは極めて難しいところである。そのため、構造物管理者は予防保全的な維持管理を行うためにPCグラウト充填状況やPC鋼材の腐食、破断に関する調査を行って、その状況や傾向等について把握することが重要であると言われて²⁾。

以上から、現在、PCTけた橋を多く保有している東西線では、予防保全の補修工事を行うとともに、リスク評価としてPCグラウト充填度調査を実施している。一方、全般検査時、補修施工時、緊急対策時において、PCTけた橋の健全性を速やかに判断する必要があり、実務者が活用できるように、リスク低減策としてプレストレス低



Fig.1 View of the PCT bridge.

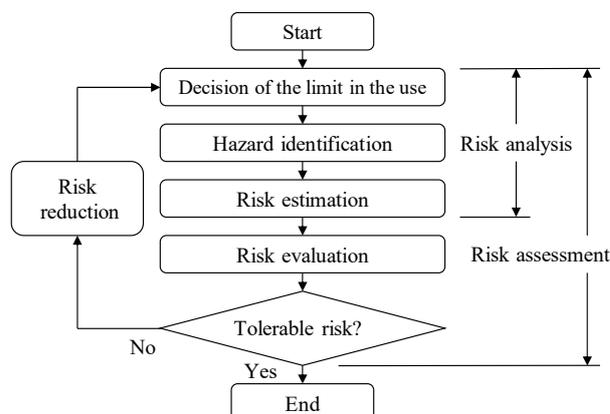


Fig.2 Procedure of the risk assessment^{3), 4)}.

† 原稿受理 平成 29年 7月 8日 Received July 8, 2017

©2018 The Society of Materials Science, Japan

* 岩手大学 工学研究科 〒020-8551 盛岡市上田

Graduate School of Engineering, Iwate University, Ueda, Morioka 020-8551.

** 東京地下鉄(株) 鉄道本部 工務部 〒110-8614 東京都台東区東上野

Infrastructure Maintenance, Department, Tokyo Metro Co., Ltd., Taito-ku, Tokyo 110-8614

*** 正会員 岩手大学 理工学部システム創成工学科 〒020-8551 盛岡市上田

Department of Systems Innovation Engineering Faculty of Science and Engineering, Iwate University, Ueda, Morioka 020-8551.

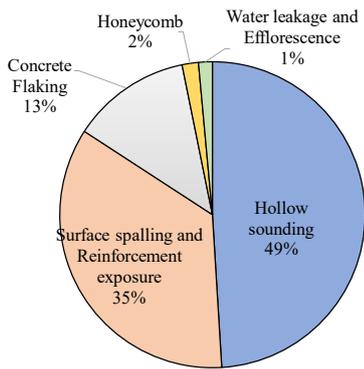


Fig.3 Types of deterioration.

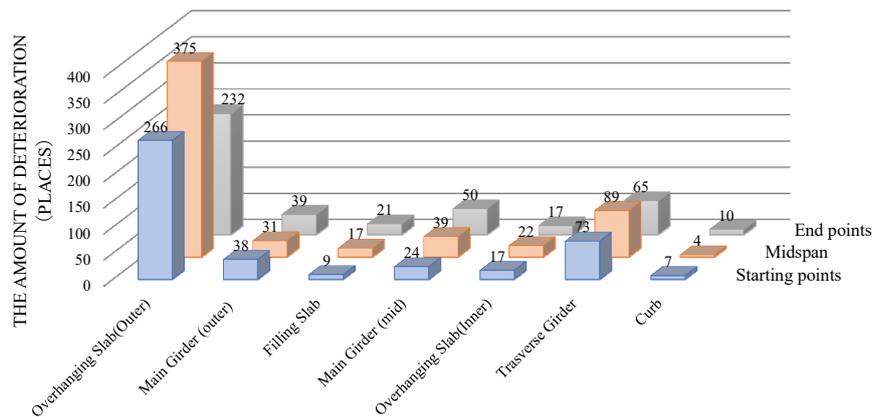


Fig.4 Tendency of Deterioration at different locations.

下による PCT けた橋の耐荷性能を数値解析にて算出し、ひび割れの発生過程をシナリオ上にて整理している。

Fig.2 に PCT けた橋の維持管理におけるリスクアセスメントの手順を示す^{3),4)}。本検討では建設時の背景と全般検査結果に基づいたリスク分析、PC グラウト充填度調査によるリスク評価、数値解析によるシナリオ上でのリスク低減策の整理を行ったので、その内容について述べる。なお、本稿のリスクアセスメントに関する用語は、ISO/IEC Guide51:1999³⁾、JIS Z 8051:2004⁴⁾ に準じて、リスクは危害の発生確率およびその危害の程度の組合せ、ハザードは危害の潜在的な源として定義している。

2 建設当時の背景と全般検査に基づいたリスク分析

2・1 建設時の背景によるリスク分析

東京メトロ東西線の全線開通は 1969 年であり、約 50 年が経過している。一般に建設時期が古い PC 橋は経年の影響を受け、古い橋梁ほど健全度が劣る傾向が示されており、その当時、PC グラウト技術が未熟であったことなどから、完全に PC グラウトが充填されていない可能性を有していると指摘されている²⁾。これらの背景から、東西線 PCT けた橋においても PC グラウト充填不足と PC 鋼材腐食や破断に対するリスクが高いと言える。建設当時を背景としたハザードを以下に示す。

- (1) 建設年次が 1960 年代であることから、PC グラウト材料のブリージング、PC グラウトの先流れ現象、施工機器の性能による空隙など、品質管理や施工管理が原因で PC グラウト充填不足のリスクが高い。
- (2) PC 鋼材種別では、横締めケーブルに PC 鋼棒 $\phi 24\text{mm}$ 、鋼製シース $\phi 35\text{mm}$ が使用されており、シース空隙率による PC グラウト充填不足や鋼製シースの腐食に対するリスクを有し、PC 鋼棒が破断すると PC 鋼棒突出により第三者に危害を与えるリスクが高い。
- (3) 構造形式は PCT けた橋であり、主ケーブルに PC 鋼線 $12\phi 7\text{mm}$ が配置され、主ケーブルのほぼ 3 割が上縁定着されているため、上縁定着部からの水の侵入や定着部のあと処理の不具合などから、PC グラウト充填不足や PC 鋼材腐食に対するリスクが高い。

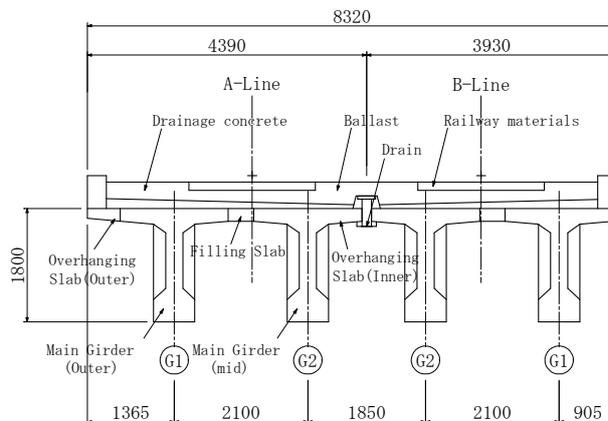


Fig.5 Sectional View.

2・2 全般検査結果によるリスク分析

全般検査結果より PC 橋に発生している変状の種類と発生位置を集計し、東西線 PCT けた橋のハザードを特定した。リスク分析の対象径間は東西線行徳駅から妙典駅間のうち 34 連 (17 径間 \times 2 連) とした。全般検査結果は致命的な変状は無く、現状では耐荷性能上のリスクは低いと考えられる。Fig.3 に変状種類の割合を示す。濁音が 49%、はく離・鉄筋露出が 35%、浮きが 13%となっている。Fig.4 に部材位置における変状発生箇所数を、Fig.5 に部材位置を示す。変状発生箇所数は張出床版(外)が最も多く、次いで横けたとなっている。張出床版(外)が多く発生している原因は、横締め PC ケーブルの定着アンカー下側のかぶりが小さいため、ここに変状が集中して発生している。これらの変状が大きなコンクリート片として落下することで、第三者に危害を与えるリスクを保有している。

3 PC グラウト充填状況によるリスク評価と数値解析によるシナリオ上のリスク低減策

3・1 PC グラウト充填度調査によるリスク評価

3・1・1 調査方針

東西線 PCT けた橋では 1 主けた当たり 11~13 本配置されている。その中で 2~4 本が上縁定着ケーブルである。この上縁定着ケーブルは端部定着ケーブルと比べ、主ケーブルの曲上げ角度が大きい

め、ブリージングによる PC グラウト充填不足の可能性が高く、主けた上縁に切欠部を有することから、劣化因子の侵入リスクが高いケーブルである²⁾。そのためリスクが高い上縁定着ケーブル2~4本/けたの充填状況を調査し、その結果から端部定着ケーブルの充填状況を類推して、主ケーブル全体の充填状況を評価することとした。そのため主ケーブルの調査対象はすべての上縁定着ケーブルとした。一方、横締めケーブルには PC 鋼棒が使用され、PC 鋼棒突出による第三者危害のリスクを有していることから、床版、横けたに配置されているすべての横締めケーブルを調査対象とした。

調査方法は非破壊調査手法から、衝撃弾性波法、超音波法、電磁パルス法、X線透過法を抽出し、適用範囲、作業性、実績、経済性から衝撃弾性波法を選定した⁵⁾。また衝撃弾性波法により充填不足が疑われた PC ケーブルは、PC グラウト充填状況と腐食状況を確認するために、ドリルによる削孔と CCD カメラを挿入してシース内の状況を確認した(以下、削孔法と称す)。なお、削孔法による調査の結果、PC グラウトが充填不足と判断された場合は、速やかに PC グラウトの再注入を行った。調査対象径間は東西線葛西駅から妙典駅間のうち 33 径間とした。幅員構成は 1 径間当たり 2 主けたが 1 連として 2 連配置されており(4 けた/径間)、調査数量は拡幅径間を含む 68 連である。

3・1・2 主ケーブルの PC グラウト充填度調査 主ケーブルの調査方法は、部分的な空洞の有無を判断することができるインパクトエコー法を採用した⁵⁾。この方法はコンクリート表面にインパクトにて弾性波を入力すると、弾性波の縦波成分がコンクリート内部の空洞表面に反射して、コンクリート表面と空洞表面との間を往復する定常な波が生じる。これを縦波共振現象といい、この現象を利用して、入力付近における波形の周波数スペクトルのピーク位置からコンクリートの内部状況を定性的に推定する方法であり、近年使用実績が多くなっている。PC グラウト充填度調査では、予め電磁波レーダにて PC ケーブル位置とシースのかぶりを特定する。次にその位置のコンクリート表面に弾性波を入力し、センサにて反射波を受信して波形収録機に記録する手順である⁵⁾。

3・1・3 横締めケーブルの PC グラウト充填度調査 横締めケーブルは、直線状に配置されている PC ケーブル全長に対して充填状況を確認する打音振動法を採用した⁵⁾。この方法は PC 鋼材定着付近のコンクリート表面にハンマーやバネポインターなどで打撃して弾性波を入力し、その近傍の入力信号と反対側の定着付近に伝ばした弾性波の出力信号を AE センサにて受信して、波形収録に記録する手順である。評価方法は PC 鋼材を伝ばする弾性波の伝ばエネルギーの減衰程度と伝ば速度を測定することで、PC グラウト充填状況を定性的に評価する方法であり、1990 年代半ばから実用化され実績も多い⁵⁾。

3・1・4 調査結果と考察 調査径間数は 33 径間(68

Table1 Summary of grouting filling condition of PC bridges.

Item	Main Girder			Slab/Cross Beam		
	Number of samples	Grouting conditions		Number of samples	Grouting conditions	
		Fully grouting	Poor grouting		Fully grouting	Poor grouting
IE Method	476	471	5	—	—	—
Impact elastic wave method	—	—	—	2,998	2,842	156
Drilling Method	5	4	1	156	30	126
Final judgement	476	475	1	2,998	2,872	126
Insufficient filling rate of grout	0.21%			4.20%		

Notes IE Method: Impact-Echo Method Unit: Cable
 Drilling Method: Drilling + CCD Camera
 Insufficient filling rate of grout:
 Number of insufficient grouting of drilling method/ number of samples×100

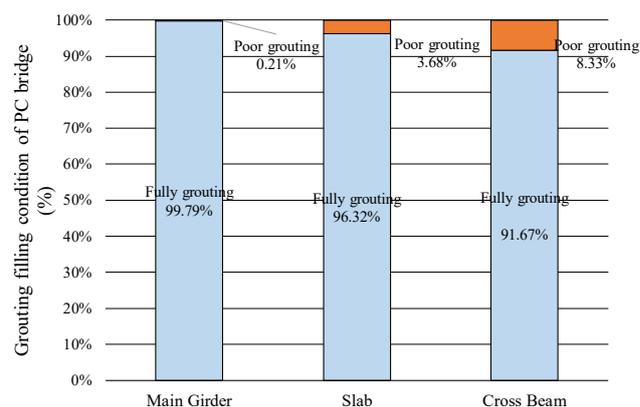


Fig.6 Grouting filling condition of PC bridge by elements.

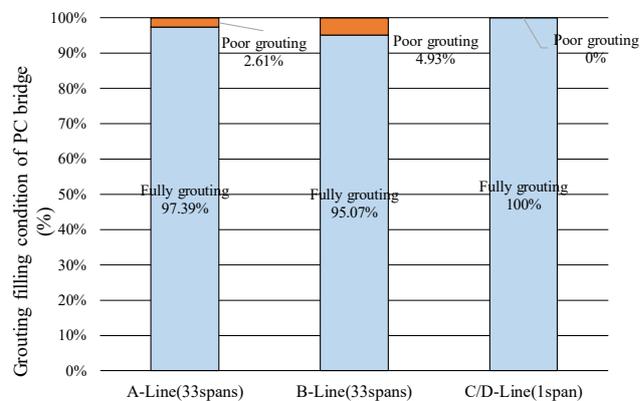


Fig.7 Grouting filling condition of PC bridge by routes.

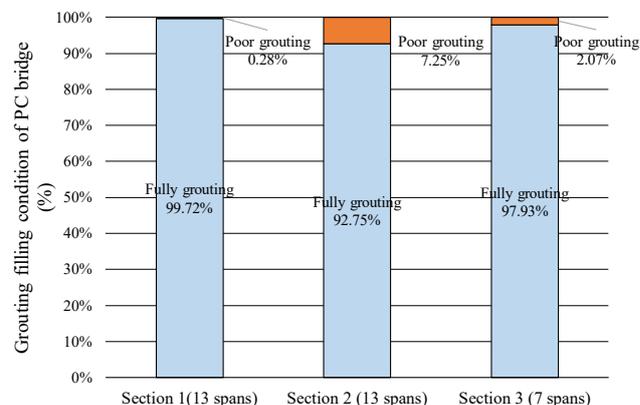


Fig.8 Grouting filling condition of PC bridge by Section.

連), 主けた本数は 140 けた, 調査対象とした上縁定着の主ケーブル数は 476 ケーブル (インパクトエコー法の調査箇所数は 952 箇所) である。横締めケーブルの調査数量は, 床版が 2,662 ケーブル, 横けたが 336 ケーブル (打音振動法による調査数量は 2,998 ケーブル) である。

インパクトエコー法と打音振動法による調査の結果, 充填不足として判定したケーブルは, 削孔法にて充填状況と PC 鋼材腐食状況を確認した。その数量は主けたでは 5 ケーブル, 床版が 117 ケーブル, 横けたが 39 ケーブルであった。なお, 充填状況の最終判定は目視確認ができる削孔法の結果を優先に判定した。

Table1 に PC グラウト充填度調査結果の総括を示す。主ケーブルでは 476 ケーブルのうち 1 ケーブルが充填不足 (充填不足率=充填不足 1 ケーブル/調査対象 476 ケーブル×100=0.21%) であり, 概ね PC グラウトが充填されている結果が得られた。上縁定着ケーブルは端部定着ケーブルと比べ充填不足と PC 鋼材腐食に対するリスクが高いケーブルである。今回調査対象とした上縁定着ケーブルでは PC グラウト充填率が高かったこと, 建設時の PC グラウト注入は一連の作業で施工することが基本であることから, 今回調査していない端部定着ケーブルもほぼ PC グラウトが充填されていると推定した。以上から, 今回調査した区間の主けたは, PC グラウト充填に対して健全性は確保されており, リスクは低いと考えられる。

横締めケーブルでは 2,998 ケーブルのうち 126 ケーブルが充填不足 (充填不足率 4.20%) であり, 充填不足率は低いものの PC グラウトの充填不足が認められた。部材別の PC グラウト充填状況を Fig.6 に示す。床版が 3.68% であり, 横けたが 8.33% である。横締めケーブルは PC 鋼棒突出による第三者災害が残留リスクであり, 東西線は市街地に隣接していることから, 今後もリスク低減策として PC 鋼棒突出防止を実施する必要があると言える。

Fig.7 に車線別に分類した PC グラウト充填状況を示す。A~D 線のうち B 線の充填不足率が最も高い値 (充填不足率 4.93%) を示している。Fig.8 に区間別に分類した PC グラウト充填状況を示す。区間は補修工事の工区にて分類しており, 第 1 区間は葛西方面, 第 3 区間は行徳方面であり, 第 2 区間は第 1 区間と第 3 区間の間である。そのうち第 2 区間の充填不足率が最も高い値 (充填不足率 7.25%) を示している。車線別と区間別に分類した PC グラウト充填状況は, 充填不足率と建設当時の工区に関係しており, 施工会社の違いによるものと考えられる。そのためリスク評価として今後も継続的にデータ収集と分析を行う必要があると判断している。

3・2 PC 橋の耐荷性能の検討によるリスク低減策

3・2・1 検討方法

東西線では建設時にキロ程, 橋長, 車線に分類し標準けたが設定され設計されている (以下, 標準設計と称す)。検討対象区間は, 標準設計より設計荷重時に最も大きい断面力が生じている径間とし, Fig.5 に示す A-Line の 1 連を選定した。Table2 に

橋梁諸元を示す。検討方法は 3 次元ソリッドモデルによる線形 FEM 解析を用いた。

主ケーブル本数は 1 主けた当たり 13 ケーブル配置されている。PC 鋼材の破断の想定はプレストレスによる曲げ応力度の影響が大きい最下段の主ケーブルから 1 本毎にプレストレス量を除去することとし, プレストレス量は有効引張力に弾性変形ロス分を足し合わせた平均値 (361.663kN/cable) とした。除去本数は最多 4 ケーブルとして, プレストレス低下による主けた, 床版, 横けたの応力状態と変位を確認した。主ケーブルのプレストレスを低下させる主けたは G1 けたを基本とし, 2 主けたとも破断した場合の影響を確認するために G2 けたが健全な場合と主ケーブル 1 本除去した場合を検討した。

横締めケーブルのプレストレス低下の影響を確認するために, 床版は標準部の配置間隔 600mm のところ最多 2 ケーブルのプレストレス量 (254.683kN/cable) を, 横けたでは中間横けた, 端部横けたとも配置ケーブル本数は 1 本/横けたであり, その 1 本のプレストレス量 (263.532kN/cable) を除去する検討を行った。なお, 横締めケーブルのプレストレス量は有効緊張力の平均値とした。

Table2 Specifications of the bridge (A-Line).

Structure type	Posttension system simple girder	
Girder length	24.96m (Span length 24.10m)	
Width / Angle	Width 4.39m / Angle 90°00'00"	
Live load	Axle load 16tf (Train load)	
Concrete strength	Girder 40N/mm ² , Slab・Beam 30N/mm ²	
Prestressing steel	Girder	PC steel wire SWPR 12 φ 7mm
		Tensile force: 361.663kN/cable
	Slab・Beam	PC steel stick SBPC110 φ 24mm
		Tensile force(Slab) : 254.683kN/cable Tensile force(Beam) : 263.532kN/cable
Reinforcing bar	SR235	
Maximum size of coarse aggregate	25mm	
Cracking load	Girder	fbck=1.34N/mm ² (40N/mm ² h=1.80m)
	Beam	fbck=1.18N/mm ² (30N/mm ² h=1.54m)

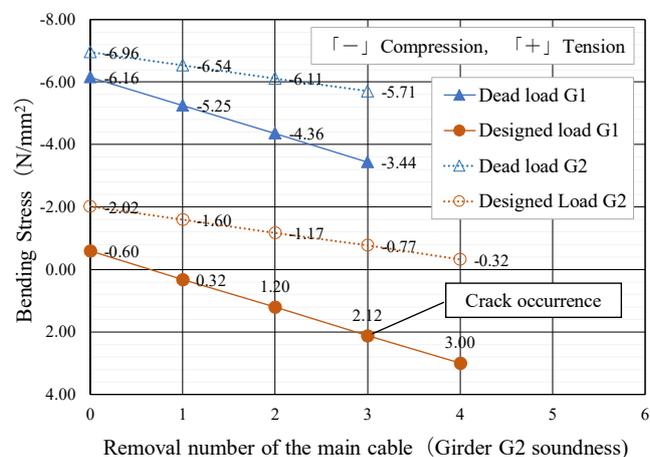


Fig.9 Combined Stress (Bottom fiber).

ひび割れの評価は死荷重時と設計荷重時における各部材の引張応力度が、コンクリート標準示方書の曲げひび割れ強度 ($f_{bck}=1.34\text{N/mm}^2$, 40N/mm^2) に達した時にひび割れが発生することとした。なお、粗骨材の最大寸法は建設当時の設計図書より 25mm とした。解析モデルは、東西線 PCT けた 1 連が 2 主けたの構成であり、PC 鋼材の破断対象を主ケーブルと横締めケーブルに着目することから、主けた、床版、横けたを構成した 2 主けたで、橋軸方向の対称性を考慮した支間 1/2 モデルとした。使用要素はコンクリートがソリッド要素、PC ケーブルと鉄筋を埋込鉄筋要素とした。なお、解析ステップは建設当時の施工順序 (主けた架設、横組工、橋面工、活荷重) を再現した。

3・2・2 解析結果

(1)主けたのひび割れ

Fig.9 に G1 けたの主ケーブルを 1 本毎にプレストレスを除去した時の主けた下縁支間中央部の合成応力度を示す。設計荷重時において G1 けたの主ケーブルを 3 本除去した場合、G1 けた下縁に引張応力度 2.12N/mm^2 が生じ、曲げ引張強度 (1.34N/mm^2) 以上となる。さらに主ケーブル 4 本除去すると、主けた下縁引張応力度 3.00N/mm^2 となり、コンクリート引張強度 (2.69N/mm^2) 以上となる。G1 けたのプレストレスの低下とともに、G1 けたのたわみが増加して G2 けたに荷重分配する。その G2 けたに生じる増加応力は G1 けたの主ケーブル 1 本除去ごとに 0.4N/mm^2 程度発生することが確認できた。G2 けたの主ケーブル 1 本除去した場合は、G1 けたに曲げひび割れが生じる G1 けたの主ケーブル除去本数は 2 本となり、1 連当たり除去する主ケーブル本数 (設計荷重時 1 連当たり 3 本除去) と同等な時期に主けた下縁支間中央部に曲げひび割れ強度以上の引張応力度 1.63N/mm^2 が発生する結果となった。

(2)横けたのひび割れ

上部工の挙動は主ケーブルのプレストレス低下により、プレストレスを除去した方の主けたのたわみが増加する。この時 G1 けたと G2 けたのたわみ差によって、主けたと横けたにねじりが生じ、主けたと端部横けた、主けたと中間横けたの接合付近に橋軸直角方向の引張力が発生した。

G1 けたの主ケーブル除去本数が 2 本の場合、死荷重時に主けたと端部横けたの接続付近に引張応力度 1.38N/mm^2 が、3 本の場合には主けたと中間横けたの接続付近に引張応力度 1.49N/mm^2 が生じ、曲げひび割れ強度 ($f_{bck}=1.18\text{N/mm}^2$, 30N/mm^2) 以上の引張応力度が発生する結果となった。

横締めケーブルのプレストレスを除去した場合の横方向への影響は、床版では床版横締めケーブル 1 本除去すると床版支間中央下縁に 0.9N/mm^2 程度の引張応力度が発生したが、2 本除去の場合は除去していない横締めケーブルのプレストレスの影響があり、設計荷重時の合

成応力度は圧縮応力度 1.75N/mm^2 であった。横けたでは横けた横締めケーブル 1 本除去すると、設計荷重時に横けた下縁に引張応力度が生じ、中間横けた (中央部) では引張応力度 1.35N/mm^2 が、中間横けた (端部側) では引張応力度 1.60N/mm^2 が発生した。一方、端部横けたでは死荷重時に引張応力度 1.61N/mm^2 が発生した。

横締めケーブルのプレストレスを除去した場合の主けたへの影響は、主けた支間中央下縁で、横締めケーブル 1 本当たり、床版では引張応力度 0.25N/mm^2 、中間横けたでは引張応力度 0.12N/mm^2 の橋軸方向に引張応力度が発生した。以上から、横けたには曲げひび割れ強度以上の引張応力度は発生するが、主けたには支間中央下縁に引張応力度 $0.12\sim 0.25\text{N/mm}^2$ 程度の増加応力であり、曲げひび割れ強度を超過するまでには至らないことが確認できた。

(3)主けたの変位

Fig.10 に G2 けたが健全な場合で、G1 けたの主ケーブル 1~4 本のプレストレスを除去した時の鉛直変位を示す。4 本除去した場合、G1 けたでは支間中央部の主けた下縁

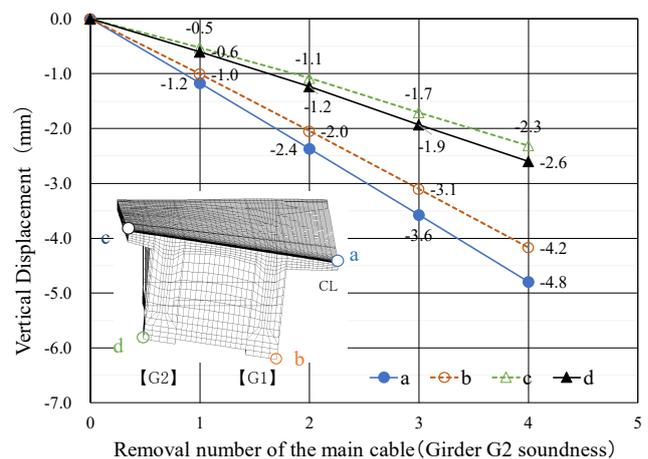


Fig.10 Vertical Displacement.

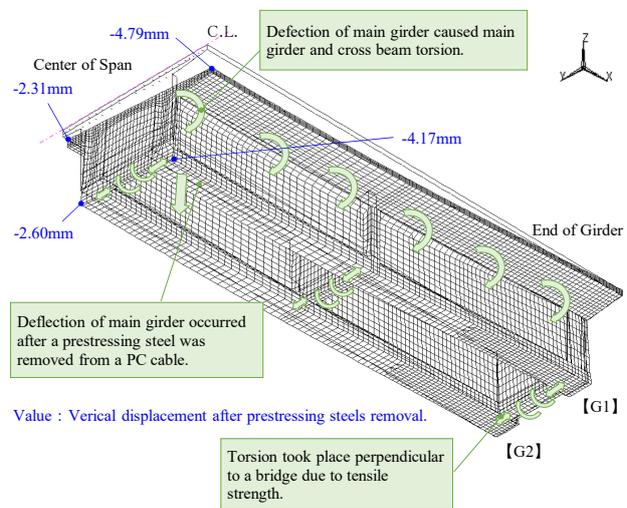


Fig.11 Behavior after prestressing steels removal.

Table3 Summary of the risk assessment.

Hazard identification	Risk estimation	Risk evaluation		Protective measure
		Severity of harm	Frequency of occurrence	
When deficient grouted, When fully grouted, corrosion and breaking of steel tendons are the major problems	Main cable rupture and the load-bearing capacity of main girder decrease	Critical (III)	Incredible (0)	Numerical evaluation on any changes in appearance and load-bearing capacity
	The transverse cable rupture and PC tendon exposure cause third party disasters	Marginal (II)	Remote (1)	Investigation on PC grout filling and prevention of PC reinforcment exposure.
Deterioration of surface spalling, reinforcment exposure and concrete flaking can cause the concrete delamination. A great amount of deterioration occurs at overhanging slab.	Spalling concrete causes third party disasters.	Negligible (I)	Frequent (5)	Cross sectional restoration method and spalling concrete prevention.

b で 4.2mm, G2 けたの主けた下縁 d では 2.6mm の鉛直変位が生じている。G1 けたの主ケーブルのプレストレス量が 1 本分除去する毎に 1mm 程度の鉛直変位が G1 けたの支間中央部で発生することが確認できた。そのため、高感度の計測機器を用いることで上部工の健全度をモニタリングできる可能性があると考えられる。

3・2・3 PC 橋のリスク低減策 PC 橋の維持管理において、リスク低減策の判断として、PCT けた橋の外観変状と耐荷性能の関係をシナリオ上にまとめると以下の通りとなる。

(1) PC ケーブルに沿ったひび割れ

外観変状: PC グラウト充填不足が存在すると、その充填不足部分に水や塩化物などの劣化因子が侵入し、水の凍結膨張圧あるいはシーラ腐食や PC 鋼材腐食が原因で PC ケーブルに沿ったひび割れが生じる。

リスク低減策案: PC グラウト充填度調査, PC 鋼材腐食状況調査, 補修の検討を実施することが望ましい。

(2) 主けたと端部横けたの接合部にひび割れ

外観変状: 死荷重時に主ケーブル 2 本分のプレストレスが低下すると、主けたの相対変位に伴い主けたと横けたにねじりが生じ (Fig.11), 主けたと端部横けたの接合部に橋軸直角方向のひび割れが発生する。この時主けたが健全な時と比べると、主けたのたわみ量は鉛直方向に約 2mm 増加する。

リスク低減策案: PC 鋼材腐食状況, 残存プレストレス量, 上部工の変位量などに着目した詳細調査と健全度を検討して、補修および補強の計画を実施することが望ましい。

(3) 主けたと中間横けたの接合部, 主けた支間中央にひび割れ

外観変状: 死荷重時において、主ケーブル 3 本分のプレストレスが低下すると、主けたと中間横けたの接合部に橋軸直角方向のひび割れが生じる。また、設計荷重時では主けたの支間中央部で曲げひび割れが生じる。この時、死荷重時の主けたのたわみ量は鉛直方向に約 3mm となる。

リスク低減策案: 主けたの応力改善を目的とした補強を実施することが望ましい。

(4) 主けたの支間中央部に曲げひび割れ (設計荷重時)

外観変状: 設計荷重時において、主ケーブル 4 本分のプ

レストレスが低下すると、主けたの支間中央部に上記(3)より顕著に曲げひび割れが発生する。この時の死荷重時の主けたのたわみ量は鉛直方向に約 4~5mm となる。

リスク低減策案: 列車運行停止の準備とともに、上部工の荷重支持による緊急対策を実施することが望ましい。

3・3 リスクアセスメント

東西線 PCT けた橋を対象としたリスクアセスメントの結果の概要を Table3 に示す。全般検査の結果からは致命的な変状は無く、現状では耐荷性能上のリスクは極めて低いが、剥落等の第三者災害のリスクを保有している。一方、PC グラウト充填度調査の対象径間では概ね PC グラウトは充填されていたものの、横締めケーブルには一部充填不足が認められた。東西線はリスクが比較的高いと言われている年代の PCT けた橋であることから、他の径間も予防保全としての補修工事, リスク評価として PC グラウト充填度調査およびデータ蓄積を継続的に行う予定である。

4 結 言

4・1 PC グラウト充填度調査

リスク評価として PC グラウト充填度調査を行った結果をまとめると以下の通りとなる。

- (1) 主ケーブルでは 476 ケーブルのうち 1 ケーブルが充填不足 (充填不足率 0.21%) であり、概ね PC グラウトが充填されている結果が得られた。このことから、主けたの耐荷性能に対するリスクは低いと言える。
- (2) PC グラウト充填不足に対するリスクが高い上縁定着ケーブルの充填率が高かったこと、建設時の PC グラウト注入は一連の施工であることから、調査対象外の端部定着ケーブルも概ね充填されており、調査対象径間の主けたの健全性は良好であるとともに PC 鋼材腐食に対するリスクは低いと考えられる。
- (3) 横締めケーブルでは 2,998 ケーブルのうち 126 ケーブルが充填不足 (充填不足率 4.20%) となり、充填不足率は低いものの、PC グラウトの充填不足が認められたことから、今回の調査対象外の径間について、PC 鋼材破断は残留リスクと考えられる。
- (4) 横締めケーブルの充填不足率の内訳は、床版が 3.68%、横けたが 8.33% である。PC 鋼棒突出による第三者災害は残留リスクであり、東西線は市街地に隣接していることから、今後もリスク低減策として PC 鋼棒突

出防止を実施する必要があると言える。

4・2 PC 橋の耐荷性能の検討

リスク低減策をシナリオ上にて判断するために検討したプレストレス低下による PCT けた橋の耐荷性能に関する結果を以下に示す。

- (1) 上部工の挙動は、主ケーブルのプレストレスが低下すると、主けたの相対変位に伴ない主けたと横けたにねじりが生じ、主けたと横けたの接合部に橋軸直角方向の引張応力が生じる。その後、プレストレス低下が進むと主けたの支間中央部に曲げひび割れが生じる。
- (2) 解析の結果、例えば G1 けたの主ケーブル 2 本分のプレストレスを除去すると、死荷重時に主けたと横けたの接合部の横けた側に曲げひび割れ強度以上の引張応力度が発生する。この時、主けたにはひび割れは発生していないが、その後、主ケーブル 3 本分のプレストレスが除去され、列車荷重が載荷されると G1 けたの支間中央部に曲げひび割れが発生する。
- (3) 主ケーブル 4 本分のプレストレスを除去した場合の設計荷重時には、G1 けたの支間中央部に発生している曲げひび割れは顕著となる。そのため、主けたに曲げひび割れが認められた場合は、速やかに詳細調査、健全度評価、列車運行停止の準備を行うとともに

に耐荷性能を回復するための対策が必要となる。

- (4) 一連当たりの主ケーブルのプレストレスが 1 本除去する毎に 1mm 程度の鉛直変位が主けたの支間中央部で発生することから、高感度の計測機器を用いることで上部工の健全度をモニタリングできる可能性が有ることが判った。

参 考 文 献

- 1) H.Nishi, T.Otsuka, K.Kamei and H.Onishi, "Analytical study for health assessment of a PC bridge by simulating PC tendon rupture", The 29th Symposium of Reliability Engineering and International Workshop, pp.91-96 (2016).
- 2) Japan Prestressed Concrete Contractors Association, "Guidelines for inspection of prestressing steels and repair & strengthening of existing bonded post-tensioned concrete bridge" (2016).
- 3) ISO/IEC Guide51:1999, "Safety aspects-guidelines for their inclusion in standards" (1999).
- 4) JIS Z 8051:2004, "Safety aspects guidelines for their inclusion in standards" (2004).
- 5) N.Ogura, H.Nishi, H.Manabe and T.H.Ahn, "Various non-destructive tests for infrastructures in JAPAN", Journal of Ceramic Processing Research.Vol.16, Special.1, pp.132-137 (2015).