第48回プレストレストコンクリート 技術講習会 特別講演

既設PC橋の構造性能評価

金沢工業大学環境土木工学科教授 田中泰司

過酷な環境にある北陸地方







コンクリート構造物の塩害

◆新潟県沿岸部・山間部で,塩害劣化が深刻化

波しぶきを受ける橋梁の例



RC橋の塩害劣化の例(新潟県糸魚川市)









新潟県沿岸での塩害調査結果



評価レベル別橋梁数 A:111橋 1:143橋 2:74橋 3:9橋 (2013年)

⇔7割以上の橋梁で 塩害劣化を確認

管理者(コンサル)の悩み

- ・このまま放っておいても大丈夫なのか
- •いつまでもつのか
- ・どうやって維持管理すればよいのか

未知への不安

塩害劣化したRC橋の載荷試験





実験の目的

- ・見た目にひどく劣化しているコンクリート橋の構造性能を確認する
- 実験室レベルの知見がどの程度活用できるのかを確認する
- ・材料劣化した橋梁の性能をどのように評価すればよいのかを検討する





劣化状況(外桁の外観)

上越方面

スターラップはすべて破断 している

かぶり剥落, 鉄筋径測定箇所

外桁の載荷状況 (2009/7/24)



再現解析



中央変位(mm)

事前解析の限界



・解体して初めてわかる情報がないと解析精度が確保できない

・劣化情報さえあれば、RCの解析は比較的容易





























載荷後のひび割れ図



・曲げひび割れの分散性状が異なる
 ・破壊形式が異なる

載荷後のひび割れ図



- ・曲げひび割れ発生までは剛性は変わらない
- ・プレストレスカの低下はB桁の方が大きい
- ・最大荷重はA桁のほうが大きい









載荷実験の映像(B桁)



載荷実験の映像(C桁、疲労試験)





下フランジの鋼材の腐食減少率: 24% プレストレスカの減少率: 24% 使用プログラム: WCOMD 下フランジの鋼材の腐食減少率: 16% プレストレスカの減少率: 50% 使用プログラム: ATENA

- ・鋼材の破断が生じるまではおおむね実験値と一致
- 両者とも鋼材の破断は解析対象に含めていなかった。





<u>FEM解析</u>







<u>腐食したPC鋼材の機械的特性</u>

鋼材腐食したPC部材の耐荷性状を適切に評価する ためには、PC鋼材の腐食の程度と機械的性質を把握 しておく必要がある



<u>実験パラメータ</u>

	供試体番号	質量減少率
1	P-0	0%
2	P-10	10%
3	P-15	15%
4	P-20	20%
5	P-30	30%
6	P-40	40%



荷重と伸び率関係



<u>PC鋼材の機械的性質</u>



PC鋼材の応カーひずみ曲線

PC鋼材モデル(*φ*2.9より線)

鉄筋モデル





<u>実験と解析の比較</u>



- (2) 解析結果(D-I, D-II)
- •荷重-変位関係



荷重-載荷点変位関係

 ・陸らの式:ひび割れ発生荷重,最大荷重は実験値を若干上回る(D-I)あるいは 下回る(D-II)

→健全の解析値からみると,実験値と概ね一致しているとみなせる

○ 式(3):ひび割れ発生荷重,最大荷重は実験値を過大評価



・試験体の破壊状況



D-I(鋼材破断)



D-II(せん断破壊)

破壊状況、構造性能を高精度で再現するためには

■ PC鋼材の腐食による破断・消失箇所を忠実に再現

■ PC鋼材の応力−ひずみ関係に腐食による機械的性質の低下を考慮したモデルを用いる





余寿命予測手法の検証データとして活用できる



■国道18号妙高大橋の損傷事例



■代替路線のない主要幹線道路
 ■直轄国道で唯一,特車の重量規制を実施
 ■R3年夏に架け替え予定



腐食により破断したPC鋼材

■PC橋の鋼材の腐食状況は、点検が困難 → 現状把握が難しい

■毎年1回,ダンプトラックによる載荷試験を実施

■深夜に過積載車が走行

現状評価、モニタリング方法の把握が必要

解析による現状評価



解析による現状評価



鋼材破断による耐力低下の評価



セグメント名 実測値(H24) 9 11 13 15 17 19 21 3 5 -5.0----計算值 0.0 平均変位(mm) 解析值 5.0 (Case1-2) 10.0 1.2 解析值 15.0 (Case3) 9 解析值 20.0 -----20.8 23.5 (Case4) 25.0

連続ケーブルの腐食が進行した場合の死荷重たわみ

死荷重たわみの増加量

120t 載荷試験のたわみ



・死荷重たわみの長期モニタリングを 実施すれば、腐食の進行が把握できる

管理レベル	状況概要	主な対応
注意レベル (たわみ+10 mm)	通常供用において注意が 必要なレベル	特車荷重の引き下げ 速度抑制 車間確保誘導 監視頻度等の強化
警戒レベル (たわみ+20 mm)	耐荷力低下が懸念され、 安全対策が必要なレベル	片側交通規制 載荷試験による確認 限界レベル対応準備
限界レベル (たわみ+30 mm)	荷重制限が必要なレベル	大型車通行止め (乗用車片交)

登石他、PCシンポジウム2021予稿集より

・120t程度の載荷試験では腐食の進行 をほとんどとらえることができない(異 常を検知したときには、相当腐食が進 行している)

・載荷試験は、現時点での構造性能を 確実に保証してくれるという利点があ る

桁の変位、長期計測結果



登石他、PCシンポジウム2021予稿集より

ここまでのまとめ

・塩害劣化したPC橋の構造性能は、腐食による材料劣化を適切に考えることで評価可能

・評価精度を確保するには、高密度・高精度な腐食情報 が不可欠

新たな非破壊試験を開発する必要がある

△異分野の技術の転用(土木技術者だけで実施可)

○異分野の技術を開発(異分野との協働が必要)



高出力X線による鋼材の腐食・破断調査

可搬型X線照射装置



(妙高大橋桁内)

妙高大橋第8ブロックでのX線撮影画像



- ・近年、X線照射装置の小型化が実現。現場へ運搬可能に
- ・フィルムのデジタル化、高精細化が進展
- ・CT技術の発達により、3D画像が取得可能
- ・4MeV未満の出力であれば橋梁検査に使用可能(放射線障害防止法)

漏洩磁束法、電磁波レーダー

①漏洩磁束法



(a) 磁石ユニット



(b)磁気計測ユニット





電磁波レーダ(SIR-EZ)





・漏洩磁束法の原理



鋼材健全時における計測手順

- 鋼材が強磁性体であることを利用して、表面から磁石ユニットで鋼材を着磁
- 磁気センサで磁束密度を計測



・漏洩磁束法の原理



鋼材破断時における計測手順

- 鋼材が強磁性体であることを利用して、表面から磁石ユニットで鋼材を着磁
- ・ 磁気センサで磁束密度を計測
- ・磁束の乱れから、破断箇所を検知



磁束密度分布波形

(5) 調査結果① 漏洩磁束法による調査結果



スターラップなどでも同様の変化
 →異常個所の特定が難しい



・破断消失箇所での計測結果

上流側



下流側

漏洩磁束法による破断箇所と電磁波レーダによる 3D測定箇所

• 実際に破断が確認されている箇所で3D測定を実施したところ,鋼材の消失を確認

- →漏洩磁束法は、局部的な破断の検知には適しているが、腐食を伴って破断して 消失している箇所ではS-N極が形成されにくい、破断していると判定したのは、横 筋の影響を受けているため。
- ⇒調査対象橋梁では、鋼材が破断して消失している箇所があるため、鋼材の有無 を判定できる電磁波レーダの方が適する.

④非破壊検査による調査結果にもとづいた削孔調査結果

1) 鋼材番号のRは下流側. Lは上流側

|--|

鋼材 鋼材		破断判定		削孔結果	
No.	番号1)	漏洩磁束法	電磁波レーダ3D測定	グラウト充填状況	破断状況
1	L26	破断の可能性あり	破断の可能性あり	不足	素線1本破断
2	L22	破断あり	破断の可能性あり	良好	破断なし
3	R23	破断の可能性あり	未実施	良好	破断なし
4	L23	破断の可能性あり	未実施	不足	破断なし
5	L23	破断の可能性あり	未実施	不足	破断なし
6	R26	破断あり	破断の可能性あり	良好	破断なし
\bigcirc	L30	破断の可能性あり	破断なし	良好	破断なし
8	R23	破断の可能性あり	未実施	良好	破断なし
9	R22	破断の可能性あり	未実施	良好	破断なし
10	L25	破断あり	破断なし	良好	破断なし

破断

(a) ①の写真



(b) ④の写真



(c) ⑥の写真内視鏡写真の例

 素線1本の破断が確認された以外は、グラウト充填 不足の箇所もあるが、破断はしていなかった。

 現段階では、非破壊検査による破断判定と削孔調 査結果がほぼ異なり、非破壊検査の結果だけから 鋼材破断箇所を推定することは難しい。

使用する機材:SenrigaN(コニカミノルタ製)



- ・5個のセンサーを2段に配置(横4cm間隔、高さ2cm間隔)
- ・長軸方向に70cm走査
- X, Y, Zの3方向の磁束密度を計測

多軸・複数センサーによる漏洩磁束法の診断方法





スターラップはすべて のセンサーが同じ動 きをする

破断位置に近い センサーだけが 反応する

旧弁天大橋で計測、解体調査



計測結果と解体調査の比較

計測箇所	判定	判定位置	はつり結果	正誤	
G1桁25畨	判定不能		異物	0	
G3桁57番	弱い破断	13cm	素線破断	0	
G3桁63番	強い破断	55 c m	素線破断	0	
G3桁65番	弱い破断	32cm	素線破断	0	\langle
G3桁66番	弱い破断	32cm	素線破断	0	
G3桁67番	弱い破断	40cm	破断	0	
G3桁68番	健全	(隣面38cm)	健全	0	
G6桁33番	強い破断	31cm	素線破断	0	
G6桁34番	健全	-	健全	0	







1. 着磁した状態で計測



2. 磁石のない状態で計測



より深い鋼材の腐食・破断を検知するために、磁石を 置いたまま磁束密度を計測





計測結果(z軸、D10)



- D10, またはD19の異形
 鉄筋を長手方向に配置
- かぶりは3.5cmに設定
- 大気中とコンクリートの
 透磁率は同等なので大
 気中で計測
- センサーの位置35 cm
 に破断箇所を設けた
- 鉄筋の有無で大きく異 なる結果
- 破断箇所で急激に減衰

磁束密度の3次元ベクトル図

破断無



破断有

破断があるとその箇所からベクトルが急減する

磁束密度の3次元ベクトル図



x-z断面のベクトルの交点



ベクトルの交点の平均座標は鉄筋の平面位置を概 ね推定できている

深さ方向の精度は今後の検討課題

x-z断面のベクトルの交点



磁束密度の大きさを可視化することで破断の有無を視覚的に 推定できる可能性がある

PC橋内部の腐食・破断調査

高出力X線、磁気計測で調査できそうである ただし・・・

・異分野の技術者との協働が不可欠
 ・かなりの開発費用と時間が必要

異分野から見て **土木には**

- ・課題とフィールドはある
- ・魅力的なマーケットはない
- ・昔も今も作っているものはほとんど同じ

異分野を受け入れる準備ができているのか?

おわりに

スマートシティ、Society5.0、SDGs...

