

令和2年度 北海道土木技術会 コンクリート研究委員会
技術発表会

塩害によりPC鋼材が破断した道路橋の 構造性能評価に関する一考察

(株)北未来技研 朝倉 啓仁

令和2年11月2日(月) 於)ホテルモントレエーデルホフ札幌

内 容

1. はじめに

2. 対象橋梁の概要

3. PC鋼材破断を考慮した構造性能評価の提案

4. 実橋載荷試験によるPC鋼材破断率の推定

5. 構造性能評価と対策要否の判定

6. おわりに

○ □塩害によりPCT桁のPC鋼線が破断

□課題1：塩害橋の構造性能評価手法が未確立

□本来、鋼材の腐食を許容しない設計法（桁の曲げMに対する設計）

□供用中、PC鋼材が腐食・破断を生じた場合、低下する構造性能の評価手法が未確立

□このため、構造性能の評価から対策の要否（供用の可否、緊急措置の有無等）を定めることが出来ない

➤解決策1：塩害により破断したPC鋼材を有するPC桁の曲げに対する設計手法を提案

➤ **PC鋼材破断率**を導入し、破断PC鋼材を有するPC桁の曲げに対する設計手法を提案

➤ 構造性能低下限界（使用性・安全性）を提案

➤ **PC鋼材破断率と構造性能低下率との関係図**により性能低下を可視化

○課題2: 実橋、PCT桁のPC鋼材破断総数が分からない

□PCT桁の構造安全上、全てのPC鋼材をはつり出して破断本数を調査出来ない

□現在のPC鋼材破断総数が分からない

□現在の構造性能を評価できない

➤解決策2: 実橋載荷試験によりPC鋼材破断率を推定

➤**実橋載荷試験**を行い、載荷段階毎に曲げひび割れの発生を目視確認

➤載荷段階毎に曲げひび割れの発生するPC鋼材破断率を算定

➤ある載荷段階で曲げひび割れが発生すると、**PC鋼材破断率を特定**することが出来る

➤なお、「コア切込みによる残存プレストレス推定手法」(オリエンタル白石)が実用化されているが、実橋載荷試験との併用によるキャリブレーションが妥当であること、試験費用が高価となることから不採用

内 容

1. はじめに

2. 対象橋梁の概要

3. PC鋼材破断を考慮した構造性能評価の提案

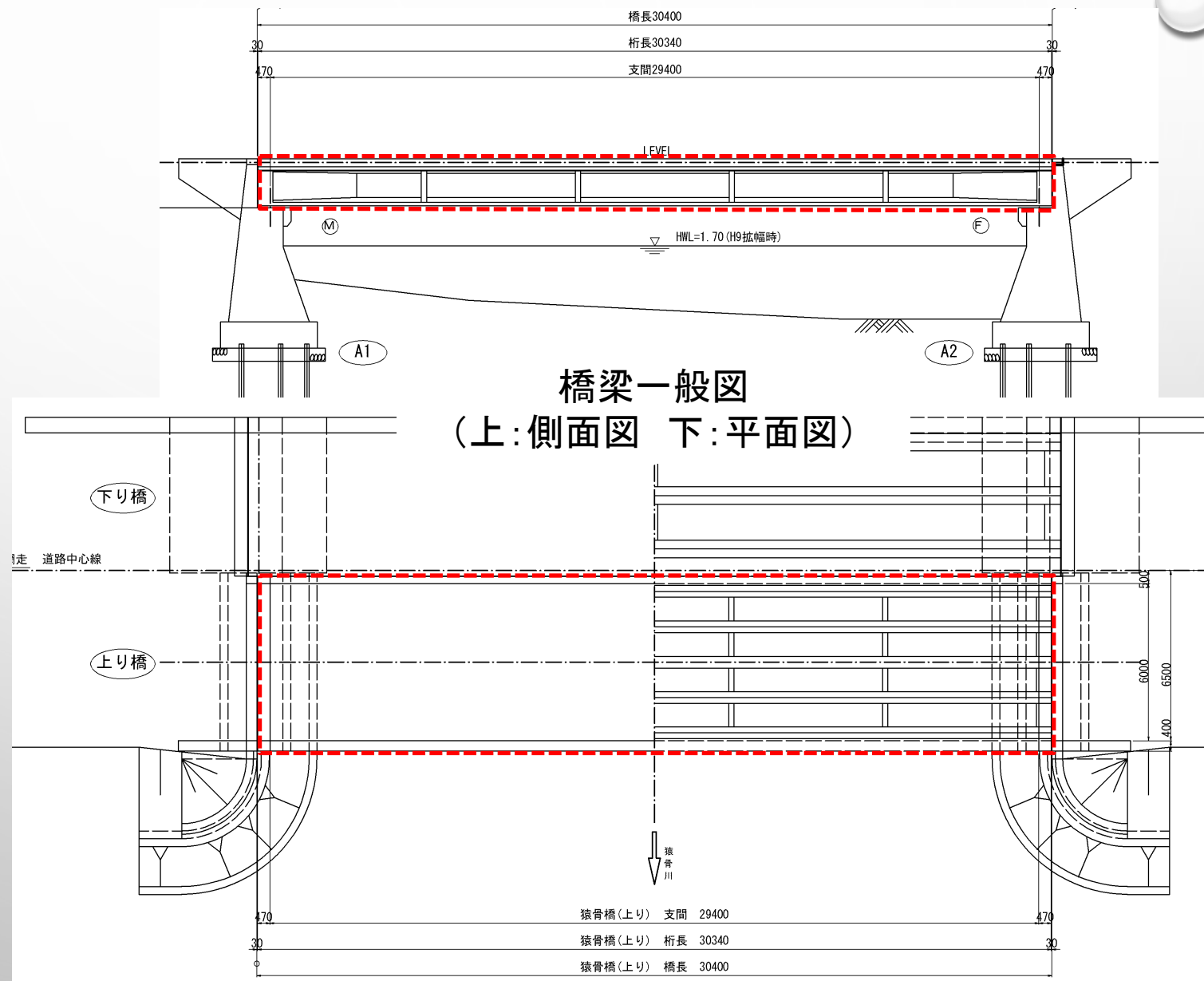
4. 実橋載荷試験によるPC鋼材破断率の推定

5. 構造性能評価と対策要否の判定

6. おわりに

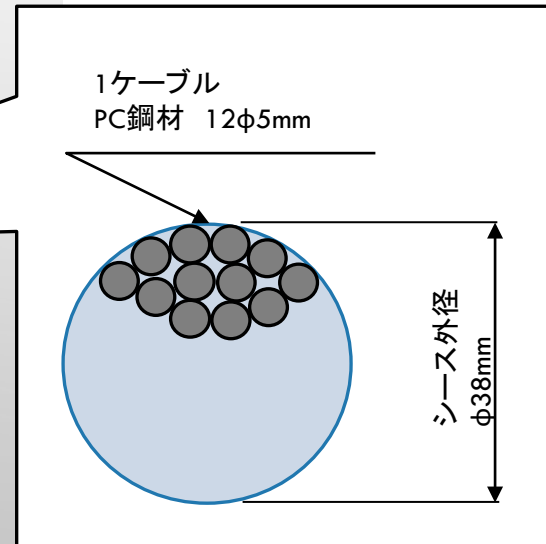
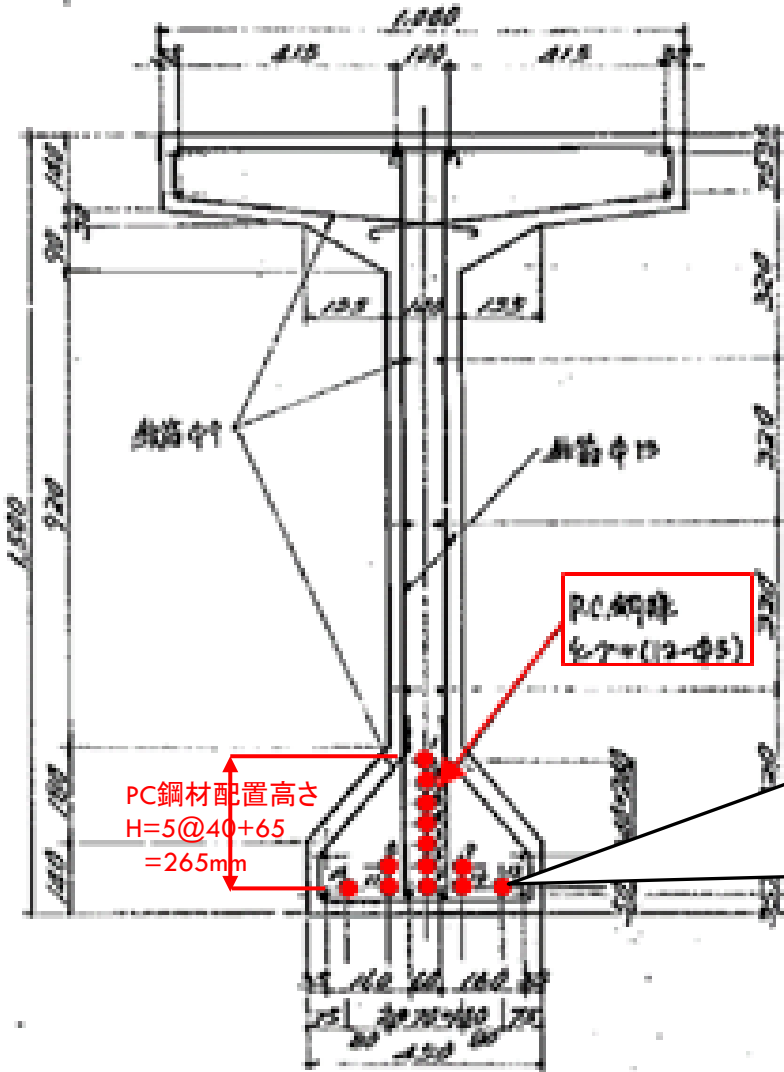
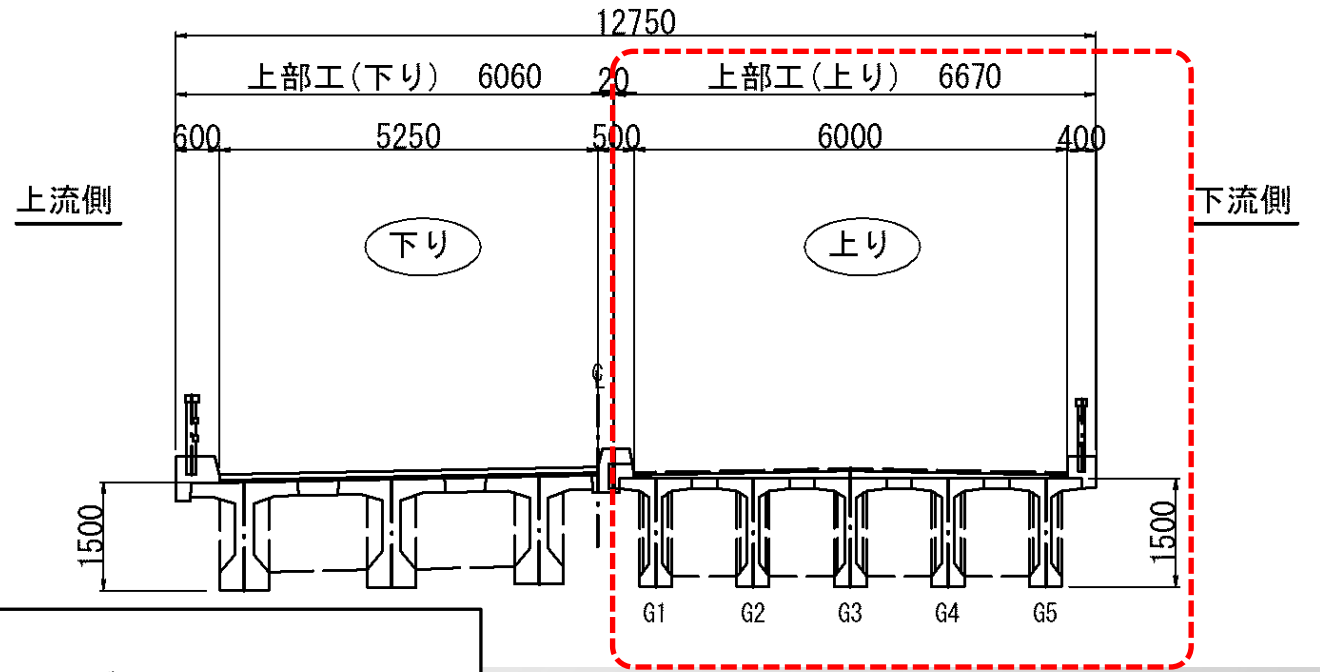
2.1 橋梁諸元 2.2橋梁一般図および主桁断面図

橋梁諸元	
活荷重	TL-20(1車線供用)
橋長	30.4m
支間長	29.4m
幅員	総幅員 6.67m (車道6.0m)
上部工形式	単純PCポストテンションT桁橋
下部工形式	重力式橋台
建設年	1956年完成 (調査時、62年経過)



2.1 橋梁諸元 2.2 橋梁一般図および主桁断面図

橋梁一般図(桁断面図)



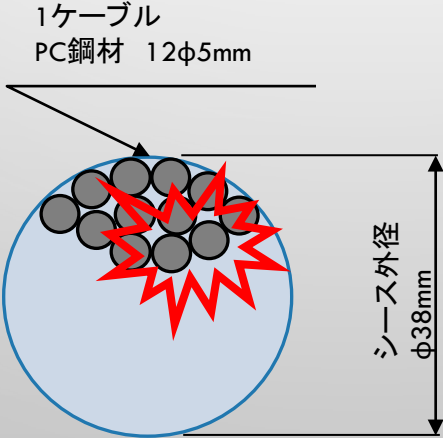


主桁断面図(赤丸:13本のPCケーブル)

2.3 補修履歴

年度（経年）	補修履歴（主にPCT桁の橋体工に着目）
1956 (0)	上り線完成
1976 (20)	G2、G3桁 鋼板補強 G1～G5桁 エポキシ樹脂塗装(FRP)
2002 (46)	G2、G3桁 鋼板補強 再設置 G1～G5桁 エポキシ樹脂塗装(FRP) 再設置
2012 (56)	G2、G3桁 鋼板補強 撤去 G1～G5桁 FRP撤去、断面修復、表面含浸材塗布(シラン系、鉄筋腐食抑制効果有)
2016 (60)	橋梁定期点検 「…、次回点検まで放置すれば、鋼材腐食の進行、破断により、橋梁の安全性が確保されない懸念がある」 「詳細調査を実施の上、塩害の進行に講じた措置が必要である」と診断
2018 (62)	補修設計業務内にて実橋載荷試験にて構造性能を評価(本報告)

2.4 はつり調査でPC鋼線の腐食破断を発見

はつり調査状況	写真解説
	<p>G3桁下フランジ下面より見上げた写真 断面修復部に生じたひびわれとはつり後の状況写真</p>
  <p>1ケーブル PC鋼材 12φ5mm</p> <p>シース外径 φ38mm</p>	<p>上記写真のはつり小口面の拡大写真</p> <ul style="list-style-type: none">・シース消滅・PC鋼線φ5mm 腐食と破断・PC鋼線群、軸方向鉄筋を經由して表面に到達する腐食ひびわれ

2.5 復元設計 曲げ作用に対してPC鋼材降伏先行破壊を確認

□ 曲げに対する設計

□ 脆性的な破壊を防止

□ コンクリートの圧壊に先行してPC鋼材が降伏する必要あり

□ 具体的には、曲げ破壊安全度の照査

□ PC鋼材のひずみが領域 I

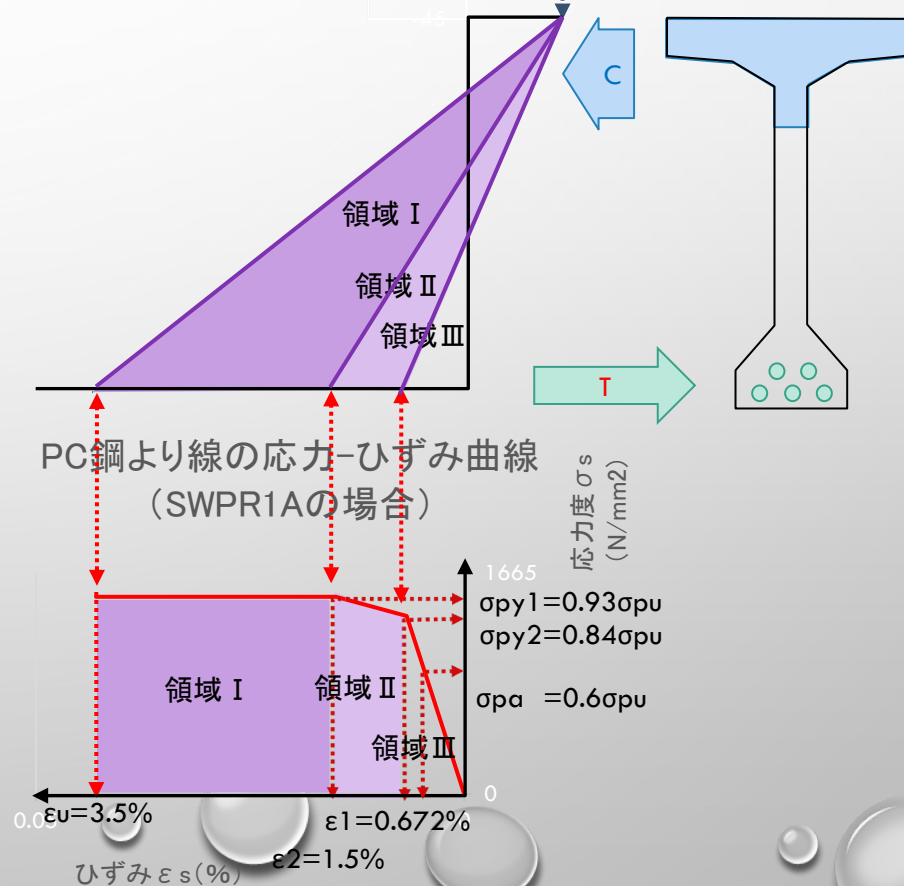
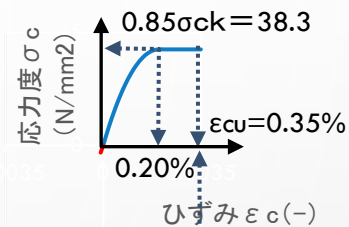
□ $C(\text{CON圧壊}) \geq T(\text{PC鋼材降伏})$

□ PC鋼材量の上限を設定

□ 塩害橋ではPC鋼材は最下段より腐食が開始し、破断によりPC鋼材量が減少する

□ すなわち、CON圧壊よりPC鋼材降伏が先行する破壊形態 ($C \geq T$) に変更はない

コンクリートの応力-ひずみ曲線
($\sigma_{ck}=45\text{N/mm}^2$ の場合)



内 容

1. はじめに
2. 対象橋梁の概要
3. PC鋼材破断を考慮した構造性能評価の提案
4. 実橋載荷試験によるPC鋼材破断率の推定
5. 構造性能評価と対策要否の判定
6. おわりに

3.1 PC鋼材破断率を用いた桁の曲げに対する設計

□コンクリートの応力度照査

$$M/Z + Pe/Ac + Pe \cdot ep/Z \leq \sigma_{ca}$$

ここに、

M/Z : 荷重による応力度 (N/mm^2)

M : 荷重による曲げモーメント ($N \cdot mm$)

Z : 主桁断面係数 (mm^3)

Pe : 有効プレストレス (N) $Pe = Pe \times (1 - hr/100)$

hr : PC鋼材破断率 (%)

ep : 主桁中立軸とPC鋼材図心の距離 (mm)

$$ep = ep - H/2 \times hr/100$$

Ac : 主桁断面積 (mm^2)

σ_{ca} : コンクリートの許容曲げ圧縮応力度 (N/mm^2)

H : PC鋼材配置高さ (mm)

3.1 PC鋼材破断率を用いた桁の曲げに対する設計

	PCケーブル配置(支間中央断面)	荷重による応力度	プレストレスによる応力度	合成応力度
PC鋼材 破断 無 hr=0	<p>PC鋼材偏心量 e_p</p>	M/Z 	P_e/A $P_e \cdot e_p/Z$ 	$M/Z + P_e/Ac + P_e \cdot e_p/Z$ $\leq \sigma_{ca}$
PC鋼材 破断 有 hr=1/5=20%	<p>PC鋼材偏心量 $e_p = e_p - H/2 \times hr/100$</p> <p>PC鋼材配置高さ H</p>	M/Z 	P_e/A $P_e = P_e \times (1 - hr/100)$ $P_e \cdot e_p/Z$ $e_p = e_p - H/2 \times hr/100$ 	$M/Z + P_e/Ac + P_e \cdot e_p/Z$ $\leq \sigma_{ca}$

3.1 PC鋼材破断率を用いた桁の曲げに対する設計

□PC鋼材の応力度照査

$$n \times (\sum \sigma_{dg} + \sigma_{lg}) + \sigma_{pe} \leq \sigma_{pa}$$

ここに、

n : ヤング係数比(ー) ($E_p/E_c=6.45$)

σ_{pe} : PC鋼材の有効引張応力度(N/mm^2) $\sigma_{pe} = \sigma_{pe} / (1 - hr/100)$

$\sum \sigma_{dg}$: 考えているPC鋼材図心位置における主桁自重以外の死荷重曲げ応力度(N/mm^2)

σ_{lg} : 考えているPC鋼材図心位置における活荷重による曲げ応力度(N/mm^2)

σ_{pa} : PC鋼材の許容引張応力度(設計荷重時) $\sigma_{pa} = 0.6 \sigma_{pu} (N/mm^2)$

3.2 PC鋼材破断率に応じた構造性能低下限界の提案

構造性能	限界値	限界値の内容
使用性 低下程度	低下限界1	塩害によりPC鋼材の腐食が発生
	低下限界2	下縁CON許容引張
	低下限界3	下縁PC許容引張
	低下限界4	下縁CON曲げひび割れ発生
安全性 低下程度	低下限界5	下縁PC降伏
	低下限界6	下縁PC塑性
	低下限界7	死荷重時下縁CON残留ひび割れ発生

3.2 PC鋼材破断率に応じた構造性能低下限界の提案

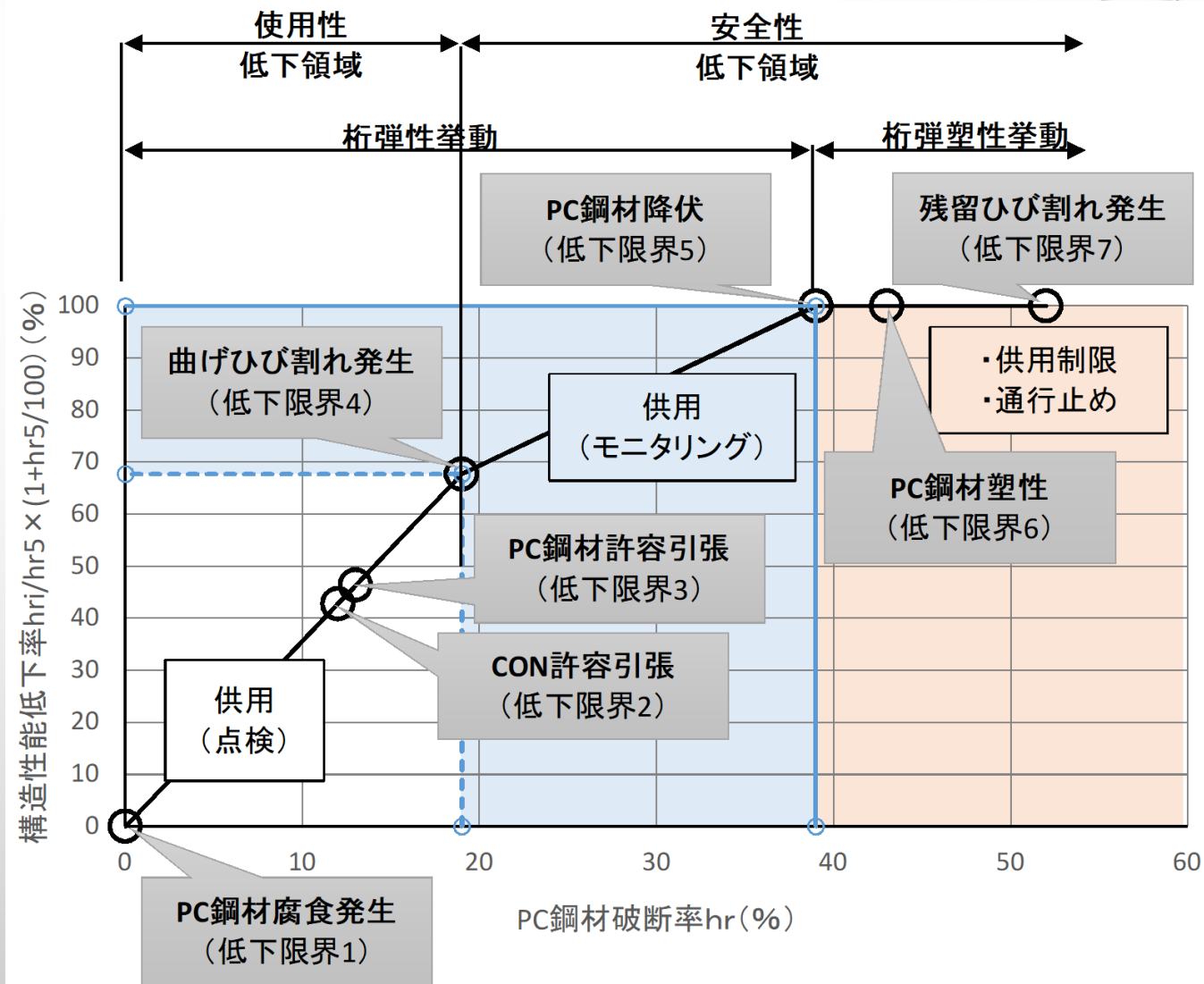
構造性能	限界値内容	限界値の詳細	PC鋼材破断率 hr(%)	構造性能低下率 $hr_i/hr_5 \times (1+hr_5/100)$ (%) *トリリニアの折れ線を仮定
使用性 低下程度	【低下限界1】 PC鋼材腐食発生	・鋼材位置の塩化物イオン量が発錆限界超過 他	hr1=0	$hr_1/hr_5 \times (1+hr_5/100)=0$
	【低下限界2】 下縁CON許容引張	$\sigma_{ca}'=-1.5N/mm^2$ for $\sigma_{ck}=40N/mm^2$	hr2=12	$hr_2/hr_5 \times (1+hr_5/100)=43$
	【低下限界3】 下縁PC許容引張	$\sigma_{pa}=990N/mm^2$ for SWPR1A	hr3=13	$hr_3/hr_5 \times (1+hr_5/100)=46$
	【低下限界4】 下縁CON曲げひび割れ発生	$\sigma_{bt}=-2.9N/mm^2$ for $\sigma_{ck}=45N/mm^2$	hr4=19	$hr_4/hr_5 \times (1+hr_5/100)=68$
安全性 低下程度	【低下限界5】 下縁PC降伏	$\sigma_{py1}=1600 \times 0.84$ $=1344N/mm^2$	hr5=39	max100
	【低下限界6】 下縁PC塑性	$\sigma_{py2}=1600 \times 0.93$ $=1488N/mm^2$	hr6=43	max100
	【低下限界7】 死荷重時、下縁CON残留ひび割れ発生	死荷重時 $\sigma_{bt}=-2.9N/mm^2$	hr7=52	max100

3.2 PC鋼材破断率に応じた構造性能低下限界の提案

提案: 構造性能判定表

(PC鋼材破断率により桁の挙動と維持管理方法を提案)

構造性能	限界値	限界値の内容	PC鋼材破断率 (%)	構造性能低下率 (%)	桁の挙動	維持管理方法 (例)
使用性 低下程度	低下限界1	PC鋼材の腐食が発生	0	0	弾性挙動	・供用 (定期点検)
	低下限界2	コンクリートが許容引張応力度超過	12	43		
	低下限界3	PC鋼材が許容値超過	13	46	弾性挙動	・供用 (モニタリング)
	低下限界4	コンクリートに曲げひび割れ発生	19	68		
安全性 低下程度	低下限界5	PC鋼材が降伏	39	100	弾性限界	・供用制限 ・通行止め
	低下限界6	PC鋼材が塑性	43	100	弾塑性挙動	
	低下限界7	死荷重時、残留ひび割れ発生	52	100	弾塑性挙動	



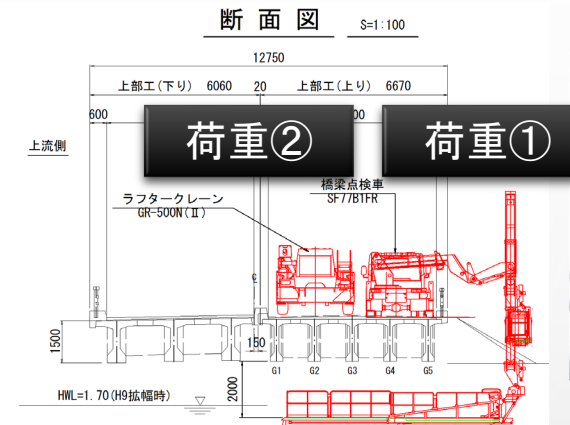
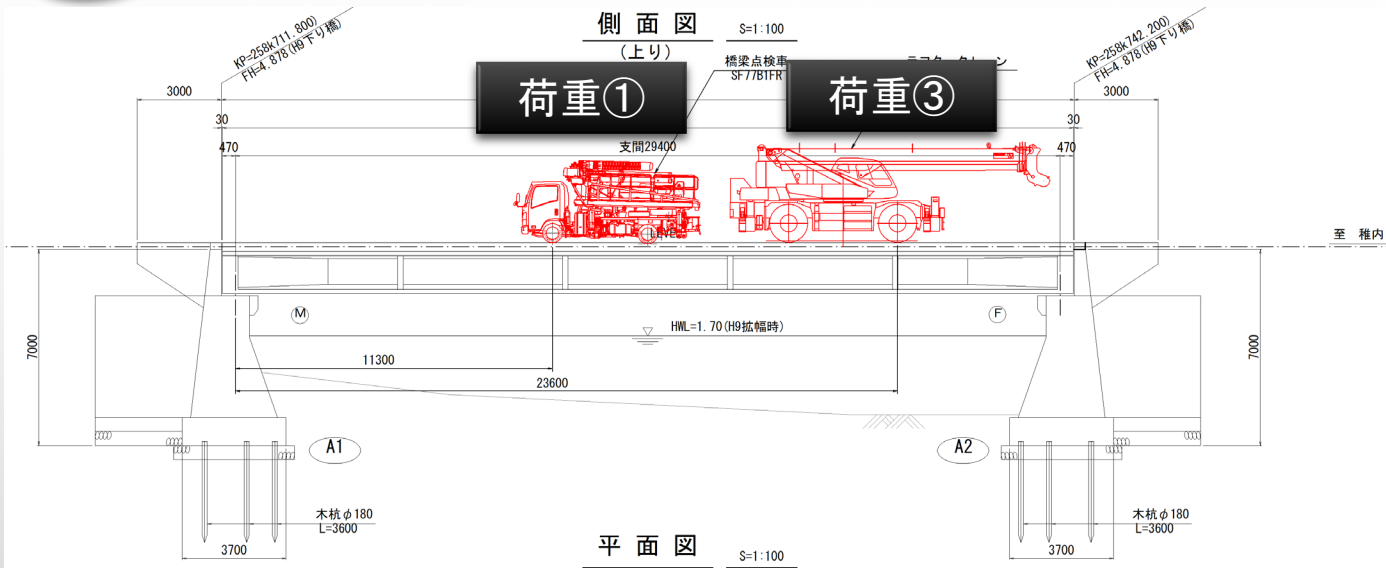
提案: 構造性能判定図

(構造性能低下率により耐力低下を可視化)

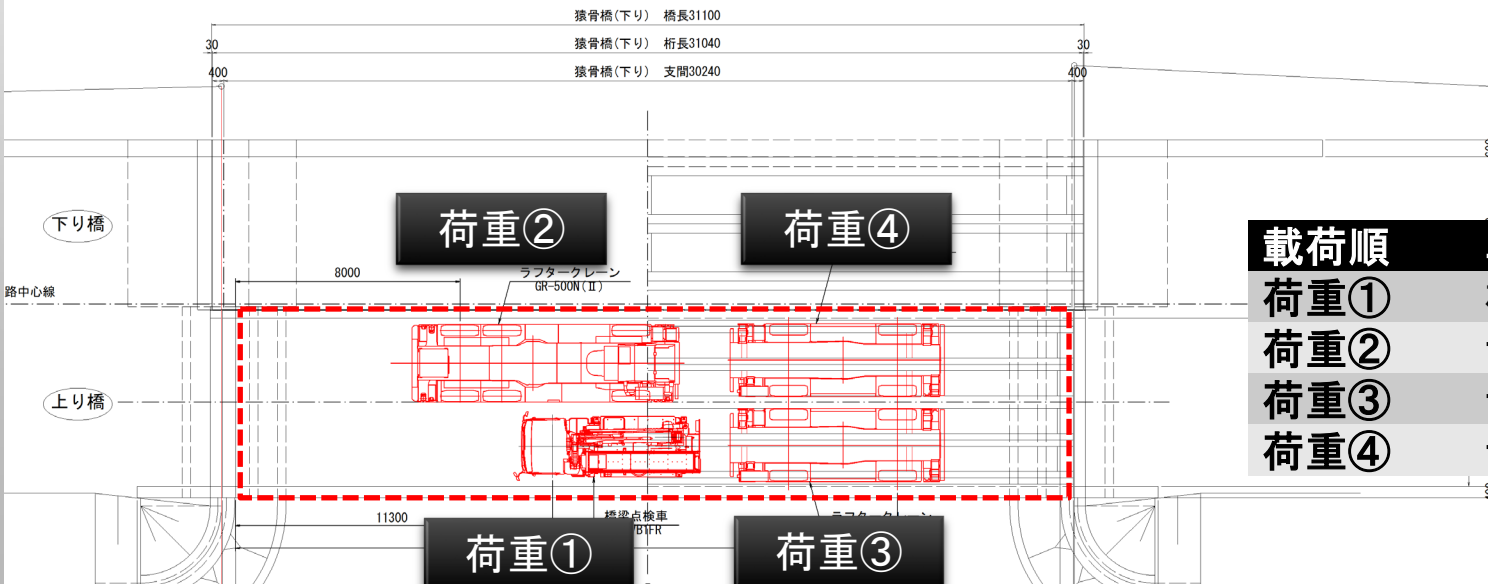
内 容

1. はじめに
2. 対象橋梁の概要
3. PC鋼材破断を考慮した構造性能評価の提案
4. 実橋載荷試験によるPC鋼材破断率の推定
5. 構造性能評価と対策要否の判定
6. おわりに

4.1 実橋載荷試験



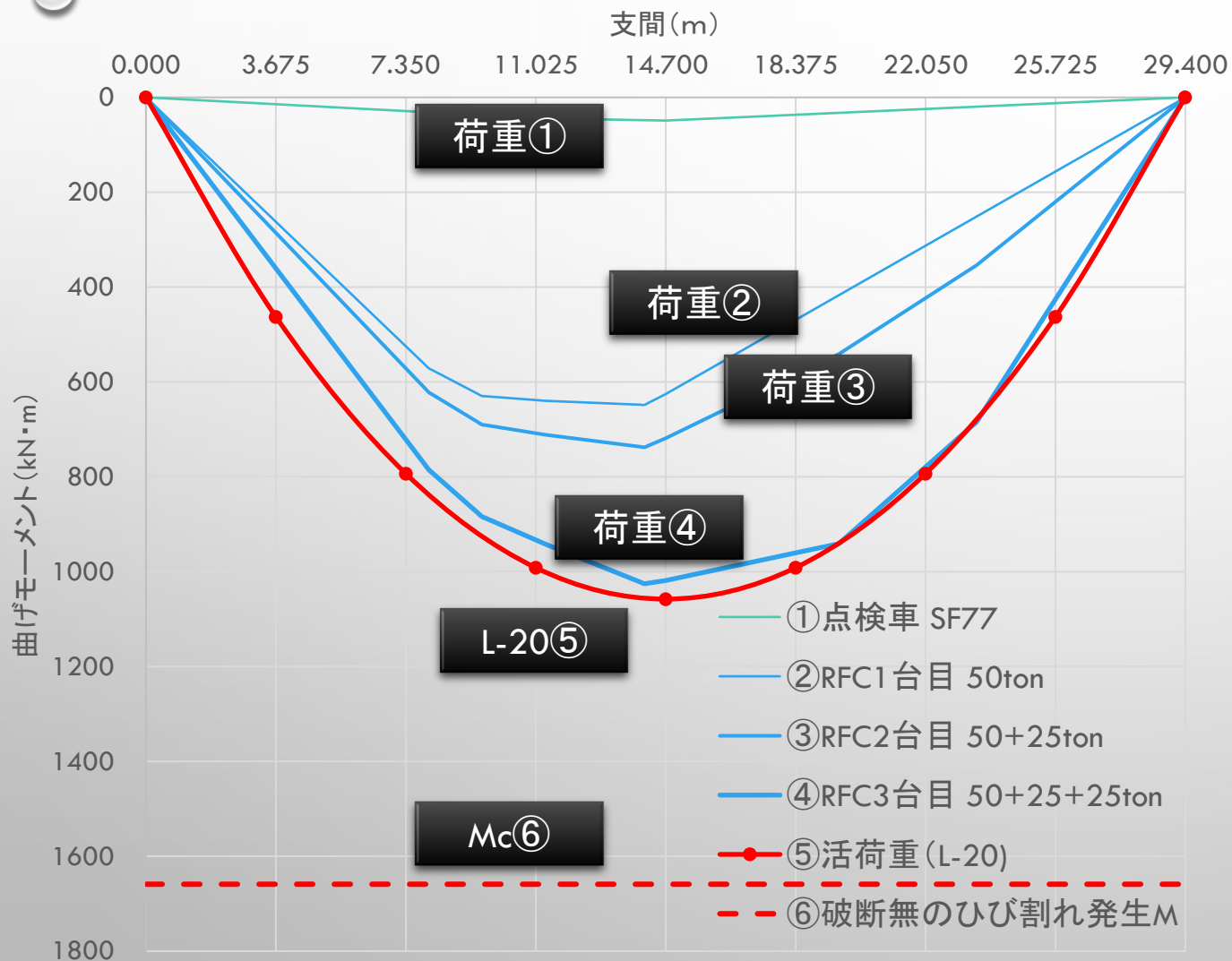
荷重① 荷重②



載荷順	車両総重量(軸重によりM算出)	
荷重①	橋梁点検車	W=7.8ton
荷重②	ラフタークレーン50ton吊	W=35.8ton
荷重③	ラフタークレーン25ton吊	W=25.6ton
荷重④	ラフタークレーン25ton吊	W=25.6ton

4.1 実橋載荷試験

STEP1 載荷重によるM(G2)



発生Mで曲げひび割れが生じた場合のPC鋼材破断率 (事前に計算)

載荷順	発生M (kN・m)	PC鋼材破断率 (%)	載荷試験結果 (G2桁に着目)
荷重①	49 (0.05)	50.0	曲げひび割れの発生は確認されなかった。
荷重①②	626 (0.59)	32.1	
荷重①②③	719 (0.68)	29.2	
荷重①②③④	1018 (0.96)	19.9	
L-20⑤	1058 (1.00)	18.6	曲げひび割れ発生と仮定 PC鋼材破断率約 19%
Mc⑥	1658 (1.57)	0.0	

L-20設計荷重に対して発生Mで96%までの載荷を計画

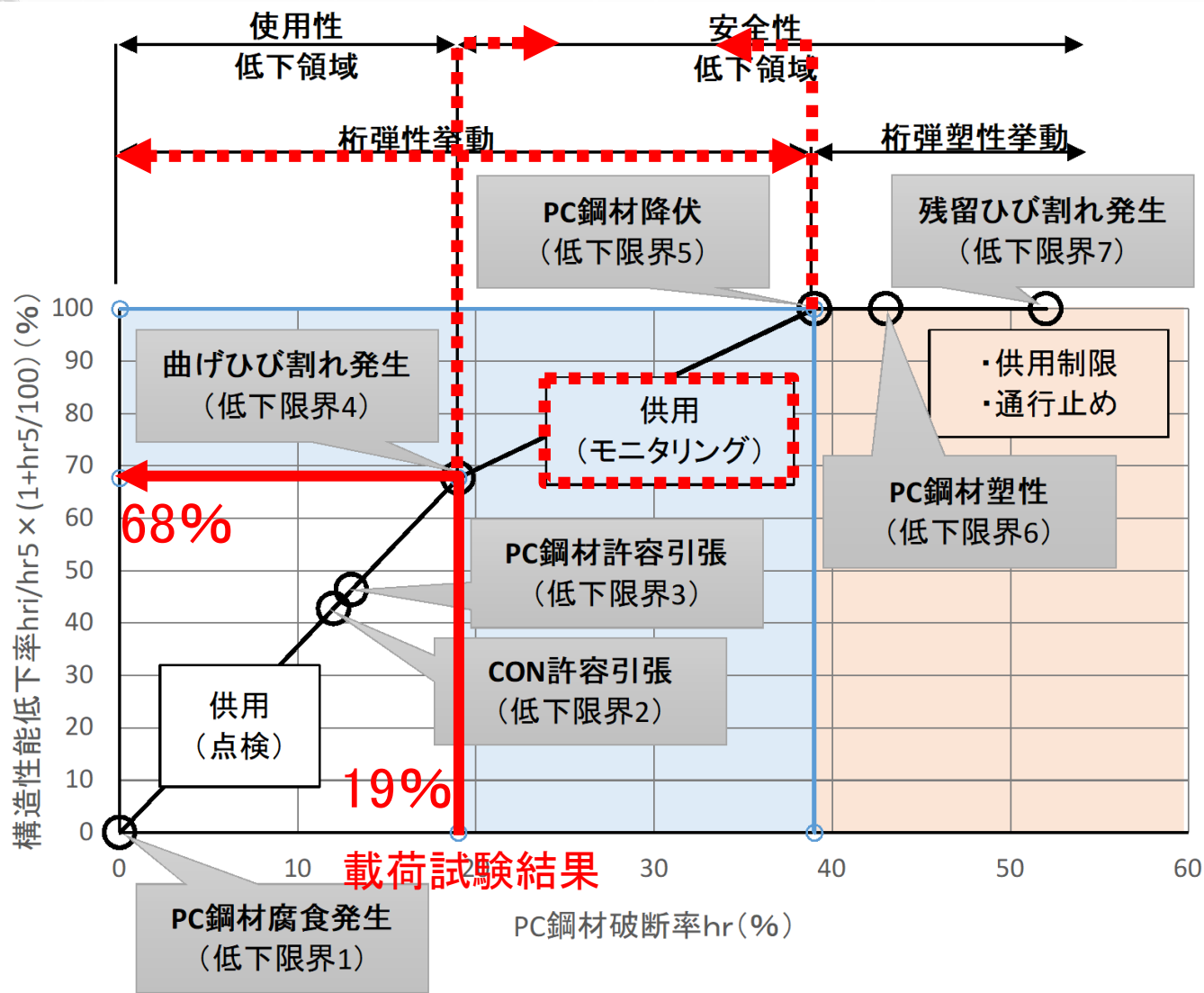
内 容

1. はじめに
2. 対象橋梁の概要
3. PC鋼材破断を考慮した構造性能評価の提案
4. 実橋載荷試験によるPC鋼材破断率の推定
5. 構造性能評価と対策要否の判定
6. おわりに

5 構造性能評価と対策要否の判定

□ 構造性能評価と対策要否の判定

- 曲げひび割れ、安全性低下領域の入り口
- 桁は弾性挙動であり、供用可
- しかし、PC鋼材の腐食進行のモニタリングが必要
- PC鋼材降伏(弾塑性挙動の入り口)以前に、架替事業を完了する必要がある



PC鋼材破断率と構造性能低下率との関係図

内 容

1. はじめに
2. 対象橋梁の概要
3. PC鋼材破断を考慮した構造性能評価の提案
4. 実橋載荷試験によるPC鋼材破断率の推定
5. 構造性能評価と対策要否の判定
6. おわりに

6 おわりに

□鋼材は腐食しやすい

□コンクリート中ではかぶりを確保し腐食を回避

□耐久性への配慮が充分でない時期に設計されたストックは高齢化

□あるいは、厳しい塩害外力に曝される環境

□既に、鋼材腐食が開始している塩害橋が海岸線を中心に多数存在

□RC橋：鉄筋の腐食（孔食）は離散的に進行するため、伸び能力があり、即鉄筋破断に至らない

□PC橋：PC鋼材の腐食（孔食）は、張力を導入しているため破断に直結、さらに年数を重ねる毎に破断が進行！！

□塩害により破断したPC鋼材を有する桁の構造性能の評価手法を提案

□学協会等に論文発表し、ブラッシュアップの予定

□令和2元年度土木学会北海道支部論文報告集に投稿予定

ご清聴ありがとうございました。

END