



略 歴

出身：岡山県倉敷市
S52(1977). 3. 広島大学大学院工学研究科土木工学専攻修了
S52(1977). 4. 川田工業（株）技術本部
S54(1979). 4. 広島大学（工学部）
H29(2017). 3. 広島大学退職
H29(2017). 4. 広島大学名誉教授

専門：橋梁工学，維持管理工学，鋼構造，複合構造

資格：工学博士，技術士（建設部門）

本日の内容

1. 鋼橋の損傷
2. 一層の効率化が必要なインフラ維持管理
3. そもそも維持管理とは
4. 残存耐荷力からみた鋼橋の維持管理
5. その他 思いつきあれこれ

鋼橋の損傷

日本の道路橋の現状

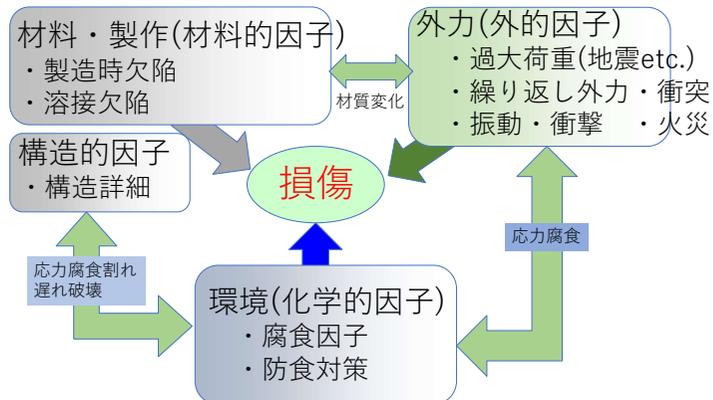
橋長15m以上の道路橋：約15万橋

PC橋：5.8万橋 (40%)	高速道・有料道路：0.9万橋 (6%)
鋼橋：5.7万橋 (39%)	直轄国道・補助国道：22万橋 (14%)
RC橋：2.6万橋 (18%)	都道府県道：3.1万橋 (21%)
その他：0.5万橋 (4%)	市町村道：8.4万橋 (58%)

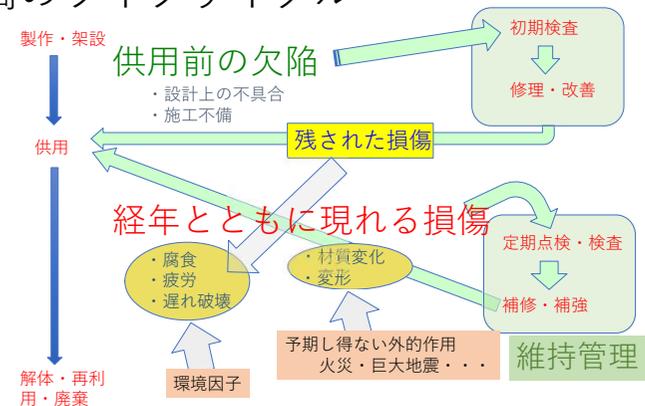
鋼橋(鋼構造物)の損傷の種類

- 疲労損傷
繰り返し荷重によるき裂→進展→脆性破壊
- 腐食損傷
腐食による減肉→強度・剛性の低下→座屈・破断
- 変形・材質変化
衝突等による変形・剥離・擦過→強度・剛性の低下→座屈・崩壊
火災による材質変化→強度・剛性の低下→座屈・崩壊
振動によるゆるみ→構造損傷→強度・剛性の低下
- 遅れ破壊
水素脆化・応力腐食割れ

鋼構造物の損傷と要因



鋼橋のライフサイクル



鋼橋の損傷と維持管理での役割

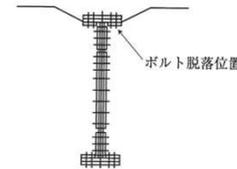
- 構造物の損傷は、
 - 1) 初期欠陥や設計・製作ミス等によるもの
 - 2) 経年とともに顕在化するもの
 - 3) 予期しない外的因子によるもの
 があり、通常、1)は供用前に対処するのが原則で、2), 3)は維持管理において対応する。
- 鋼構造物の維持管理では、疲労と腐食が特に重要
- 「維持管理」は、構造物の長寿命化のために極めて重要

損傷事例(1) 高力ボルトの遅れ破壊

遅れ破壊とは？

静的な負荷応力状態で、ある時間を経過したとき、外見上はほとんど塑性変形を伴うことなく、突然脆性的に破壊する現象

- 引張強さ $\sigma_B \approx 1235 \text{ N/mm}^2$ 以上の高強度鋼材料に発生(高力ボルト、PC鋼線)
- 水素脆化、応力腐食割れ
- 発生時期は環境条件により異なる (環境誘起破壊)



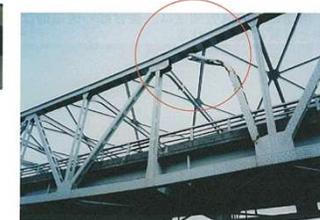
損傷事例(2) 火災による損傷



- 熱による残留変形
- 割れ
- 材質の変化
降伏応力, 延性



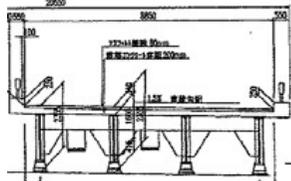
損傷事例(3) 車両衝突による変形・破断



主部材の破断は、落橋の可能性もある

損傷事例(4) 疲労(山添橋の鋼材き裂)

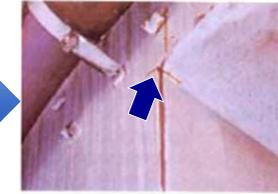
- 3径間連続非合成桁橋
- 橋長:128m (38+51+38)
- 1971年完成 約35年経過
- 示方書: S38 TL-20
- SM50(F11T)



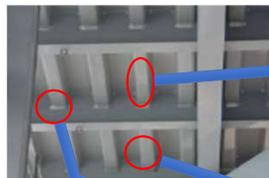
鋼製橋脚の疲労き裂



鋼製橋脚隅角部



鋼床版の疲労



鋼床版縦リブとデッキプレートの継手部



鋼床版縦リブと横リブ交差部の継手部



鋼床版縦リブの継手部

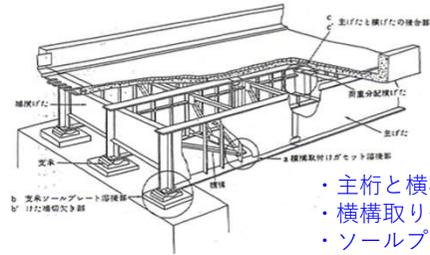
疲労(fatigue)とは？

- 構造物や材料が繰り返す荷重(外力)を受けて強度が減少する現象 (土木用語辞典)
- 繰り返す外力によりき裂が発生、進展する現象
- 鋼橋では、疲労損傷のほとんどが溶接の不具合(ブローホールや目違い残留応力など)による応力集中が原因



フランジ・ウェブ間隅内溶接部から発生した疲労き裂

疲労損傷部位と特徴(プレートガーダー)



- ・主桁と横桁の接合部
- ・横構取り付けガセット溶接部
- ・ソールプレートの溶接部

疲労き裂は、塗装替え時に見つかることが多い

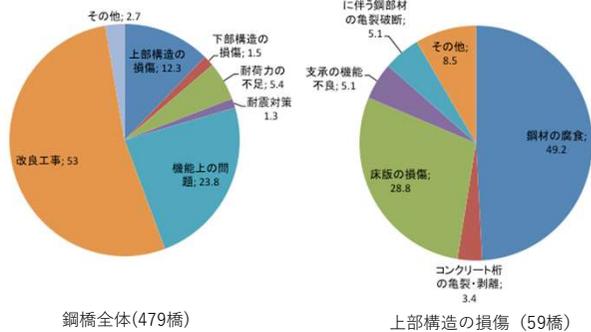
疲労強度の向上法

- ・応力集中の低減 (溶接部形状の平坦化)
 - 溶接部の切削, 研磨 (余盛除去, 溶接止端のグラインダー仕上げ)
 - 溶接止端部の再溶融 (TIG, プラズマ)
 - 化粧溶接法
 - ウォータージェット
- ・残留応力のコントロール
 - 予荷重, 加熱急冷, 局部加熱
 - ピーニング (ショット, ワイヤ, ハンマー)
 - 低変態温度溶接材料

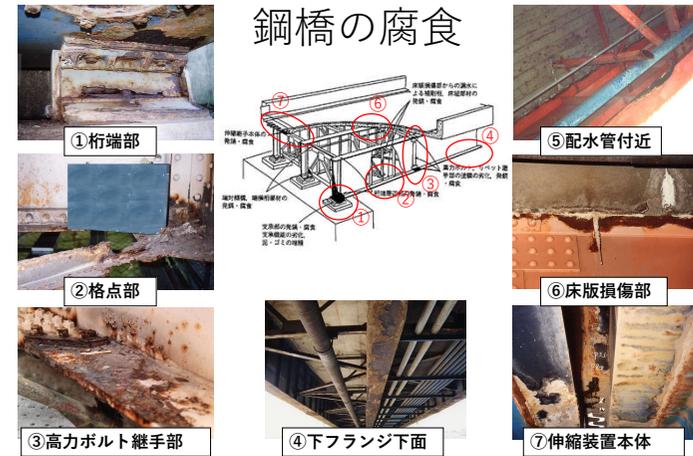
鋼橋の架け替え原因

(平成18年度調査結果)

- ・全体の半数が改良工事, 機能上の問題
- ・上部工の損傷による架け替えは12.3%
- ・このうち50%が鋼材の腐食による架け替え



鋼橋の腐食



損傷事例(5) 腐食(トラス橋斜材の破断)



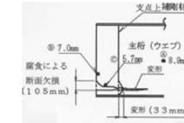
斜材の破断



補修後の状況

腐食した斜材。アクリル
ウレタンに、表面にアルミ
ドレインも設置する事で
修繕した

桁端の漏水による腐食



トラス橋 ボルト継手内部の腐食



上路トラス橋外観



下弦材高力ボルト継手



下弦材高力ボルト継手内部

HTボルト・当て板による補修例



問題点：

- ・補修設計の考え、目的は？
- ・補修効果の定量評価法は？

一層の効率化が必要なインフラ維持管理

急速に進むインフラ構造物の高齢化

- 橋長2m以上:70万橋（橋長15m以上：15万橋）

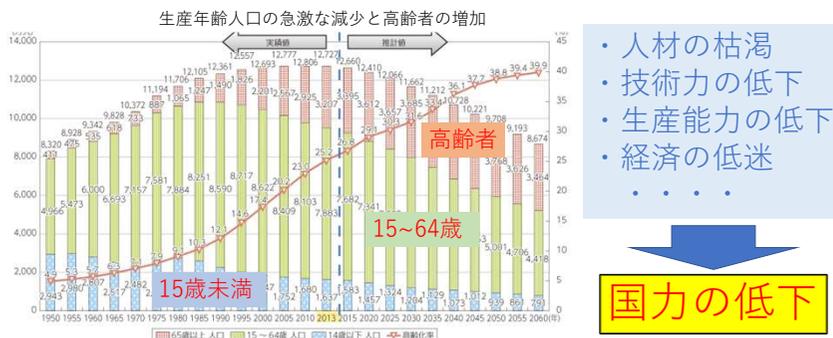
50年以上経過橋梁（2m以上）は、現在は**16%**であるが、10年後は**40%**、20年後には**65%**と急速に増加

いままで通りの維持管理を行うと、2037年度からは、投資額（2010年度）は、維持管理だけで不足する。

つまり、2011年度から2060年度までの50年間に必要な更新費（約190兆円）のうち、約30兆円（全体必要額の約16%）の更新ができないと試算している。

<http://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h21/>

将来、生産年齢人口は急激に減少する



15～64歳の生産年齢人口は2013年10月時点で7,901万人、今後の予測では2060年には4,418万人まで大幅に減少。

我が国の高齢化の推移と将来推計 総務省HP:<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h26/html/nc141210.html>

インフラ老朽化対策が強く求められている背景

- 各種構造物（施設）において老朽化による危険生が顕在化しつつある。
- 限られた財源の範囲で不測の事態が発生するリスクを可能な限り低減しなくてはならなくなった。

言い換えれば

いままで大事に使ってこなかったツケがまわってきた

長寿命化対策

全般的な課題とわが国が取り組むべき項目

全般的な課題

- 高度経済成長期以降に整備し、老朽化した社会資本の割合が加速度的に上昇
- 土木費の減少
- 技術系職員の減少、不足

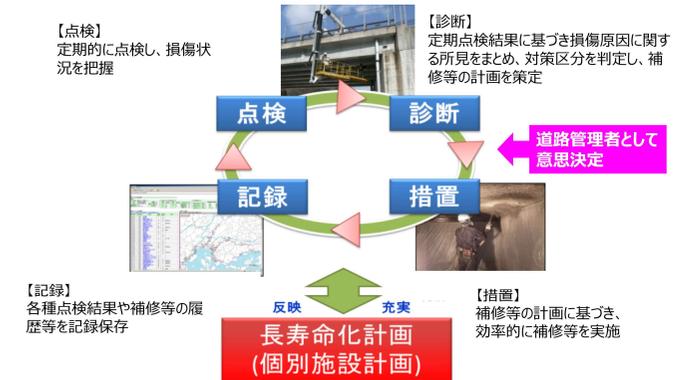
取り組むべき項目

- メンテナンスサイクルの確立
- 技術の継承・育成
- 新技術の活用

インフラメンテナンス国民会議「ちゅうごく」：インフラマネジメントシンポジウム2020発表資料から抜粋

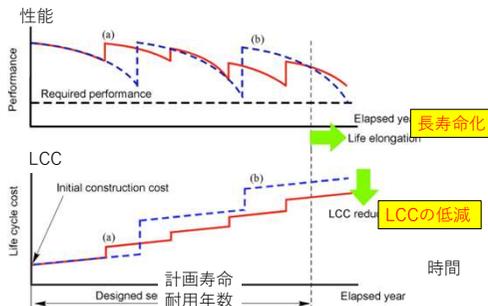
メンテナンスサイクルの構築

- 点検→診断→措置→記録→(次の点検)というメンテナンスサイクルの構築
- 長寿命化計画等の内容を充実し、**予防的保全を効率的、効果的に推進**



30

現在、維持管理の重要性が強く認識され
予防保全型の維持管理戦略が推進されつつある

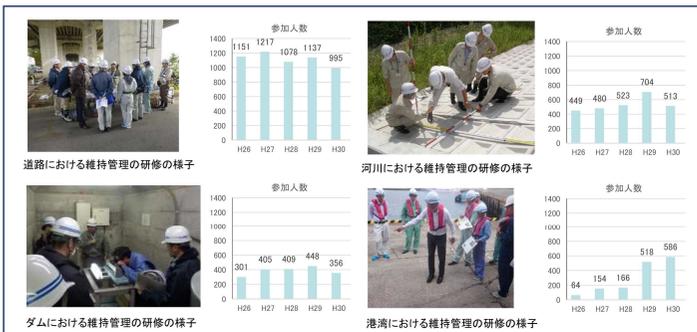


予防保全により
 ・長寿命化
 ・LCCの低減
 を図る

維持管理戦略は、しばしば劣化曲線を用いて説明される

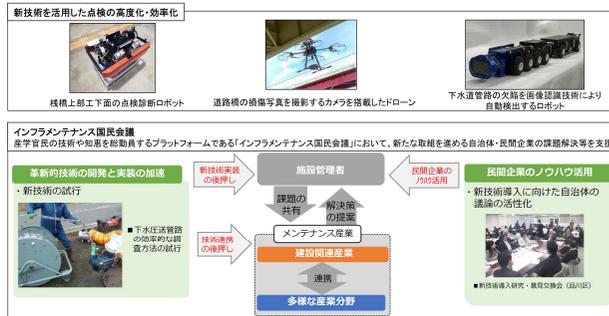
技術の継承・育成， 地方自治体支援

- 適切な維持管理が行えるよう、従来の取組みに加え、実務的な点検の適切な実施・評価に資する**研修体制**を充実・強化。
- 技術者不足が指摘されている**地方公共団体等への技術的支援**の一環として、研修への地方公共団体等職員の参加を呼びかけ、毎年数多く参加。



新技術の活用，メンテナンスの効率化

- 「予防保全」型のインフラメンテナンスへの転換に加え、**新技術を活用した点検の高度化・効率化**を推進し、メンテナンスに係る**トータルコストの削減・平準化**を図る。
- また、新技術の発信と社会実装を目的として、産学官民が情報交換を行う「インフラメンテナンス国民会議」等を活用し、**新技術の導入促進**を図る。



そもそも維持管理とは

維持管理とは

要求される期間(耐用年数)に亘って
構造物の保有性能Rが
要求性能Sを常に上回るように保つ行為

保有性能R > 要求性能S

上の条件が満たされるとき、**構造物は健全（安全）**であると判断される

要するに何が言いたいのかというと？

そもそも、維持管理とは、

- ・要求される期間（耐用年数）、構造物の保有性能が要求性能を常に上回るように保つ行為

保有性能R > 要求性能S

- ・現在：損傷グレード評価型維持管理

損傷が無ければ安全！ だが、・・・

無意味な点検・検査や不要な修復は無いだろうか？

そもそも維持管理とは

我々は、日々の生活の中で、自らの持ち物をあまり意識することなく、普通に維持管理しているのではないのでしょうか!?

- ・日常生活で普通に使っていれば、悪くなればすぐわかる。(点検)
 - ・愛情をもってきれいに大事に使っていれば長持ちする。(長寿命化)
- ただし、**観ていない箇所は、悪くなってもわからない**

➡ この場合、**事後保全**で対応するしかない

では、なぜインフラ維持管理が社会問題となったのか?

- ・インフラ(土木構造物)は、**永久構造物**という考えがあった。
- ・維持管理の考え自体なかった。
- ・いままでみ(観・診・看)てこなかった(自分の持ち物と思わなかった)

➡ いま、そのツケが回ってきている

長寿命化とは？

設定されている要求寿命を超えて要求性能を満たすようにすること



平成13年撮影

40年前の自分に戻ることはできませんが・・・
もう少しきちんとメンテをしていれば・・・
いまの自分より若いときの状態に近かったのでは!?

でも、必ず寿命は来ます。

維持管理に必要なもの (技術者への提言)

起こりうる**損傷の因果関係**を知る(基礎知識)

そのための**点検・計測、対応** ➡ **予防保全**が可能

例：損傷許容で飛んでいる飛行機(点検で安全確保)

外れたとき(**想定外**) ➡ **事後保全**しかできない

損傷対策は、第一に原因の除去
損傷防止には、豊富な経験と応用力が必要

維持管理に必要なもの (技術者への提言)

【力学的素養】

- ◇**損傷の原因を推定・特定**できる能力と知識
- ◇損傷が引き起こす**破壊形式**の推定 (破壊/崩壊のトリガー)
- ◇構成**部材の役割**の理解とその全体への影響度の評価
- ◇補修・補強対策後の**他部材への影響度**の推定
- ◇**この他に、様々な分野の素養や知識が必要。たとえば、**
【地理、歴史等の知識と応用力】
- ◇鋼材の歴史やコンクリートの変遷 (使用され始めた年代など)
- ◇地理的条件、気象・海象の地域的特徴
- 【その他諸々】 化学、流体力学、・・・

例えば

この地域では、同じようなRC橋が、同時期(昭和48年頃)に複数架設された。点検の結果、この橋だけ桁裏面のかぶり剥落していた



昭和50年代は、川砂が欠乏し、また、ポンプ圧送が普及した時代。この橋梁は、海砂を塩抜きしないで使用した橋と思われる(当時は、海砂洗浄の必要があるとは考えていなかった)。落下したコンクリート片の中には、貝殻が含まれていた。この場合、桁内部の塩分の除去は困難であり、コンクリート片落下(鉄筋腐食)の要因の除去は難しい。

さらに効率的な維持管理に向けて

損傷原因の除去



激しく腐食した床桁



さらに効率的な維持管理に向けて

取り替え部材

王泊大橋のハンガーロッドの定期的破断

➡ 維持管理可能



王泊大橋

点検を密に行えば、大きな費用も無く吊橋を安全に使える

単径間2ヒンジ補剛吊橋
橋長:151.75m
塔高:29.43m
完成:昭和32年

維持管理で大事なこと

維持管理の主役は、その地域の管理者と技術者
重要なことは

意識と継続

流行はだめ・無理をしない

「点検だけ」では 気休めになってしまう

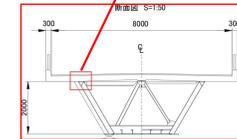
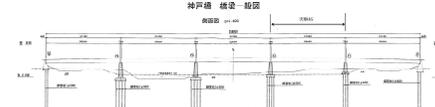
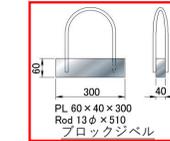
ほんとの維持管理はこれから

評価, 対策, モニタリング,

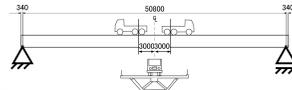
残存耐荷力からみた鋼橋の維持管理 (話題提供)

(1)合成箱桁橋の残存耐荷力

- 橋梁概要
 - 構造形式：5径間単純複合箱桁橋（各橋桁は、床版がRC、ウェブおよび下フランジが溶接とリベット併用で組み立てられた開断面箱桁で、RC床版と鋼桁が合成された逆台形断面合成箱桁）
 - 橋長：259m
 - 幅員：8m（2車線）
 - 支間長：50.8m
 - 床版厚：190mm（ハンチを入れた中央部では355mm）
 - 供用年：昭和39年の供用開始から約40年供用



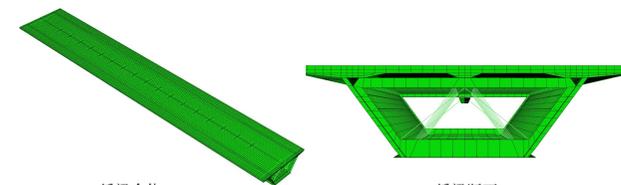
現場載荷実験(Proof Load Test)



載荷条件 (Case-1)

載荷条件 (Case-4)

複合非線形有限要素解析



橋梁全体

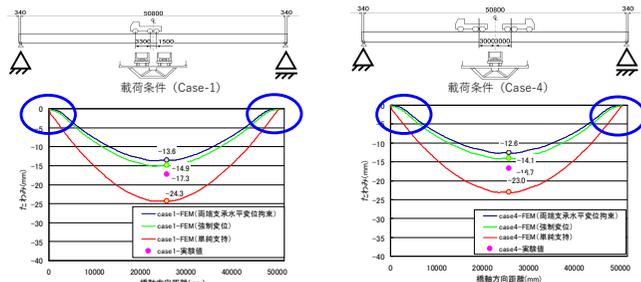
橋梁断面

表-要素・節点数	
Solid要素数	26304
Shell要素数	15176
Beam要素数	39
節点数	48057

要素分割図

RC床版と鋼桁上フランジ間のブロックジベルの接合状態は、完全合成と仮定。

実験結果と解析結果の比較(桁中央たわみ)

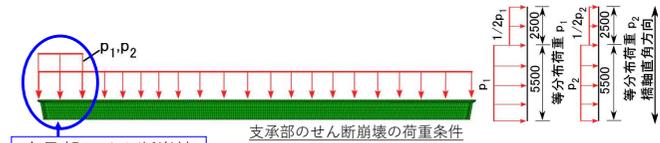


載荷条件	桁中央断面たわみ(mm)			
	実験	FEM	単純支持	両端水平変位拘束
Case-1	17.3	24.3	13.6	14.9
Case-4	16.7	23.0	12.6	14.1

実験での中央のたわみは、両端単純支持されたはりのたわみより小さくなった。

荷重条件(せん断力)

死荷重を作用させた後、支那部がせん断力により崩壊する荷重配置で道路橋示方書で規定されているB活荷重を増加させて終局状態まで解析した。



$$L = L_d + \alpha L_l$$

L_d : 死荷重
 L_l : B活荷重
 α : 活荷重倍率

活荷重倍率とは、B活荷重が作用した時に、その何倍の荷重まで耐えられるかを示す指標であり、B活荷重に対する安全率とみなすことができる。

解析結果(健全な場合)

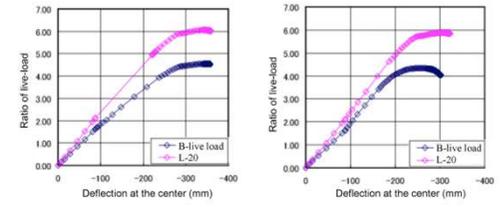
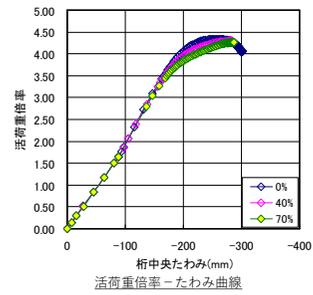


Fig. 11 Relationship between live load and deflection at the center

- 構造全体が有する強度は、活荷重の4~6倍
- 孔の開くような重篤損傷でも何とか持っている理由?

腐食による強度の低下

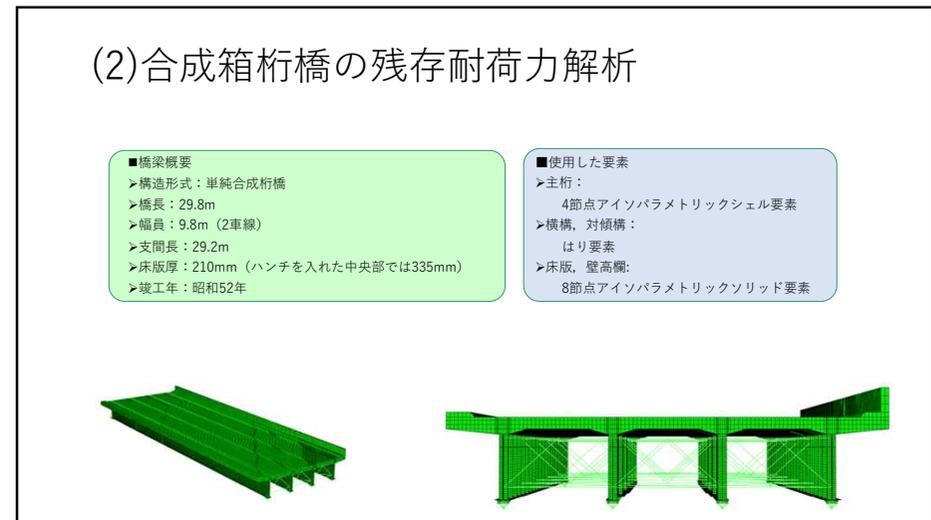
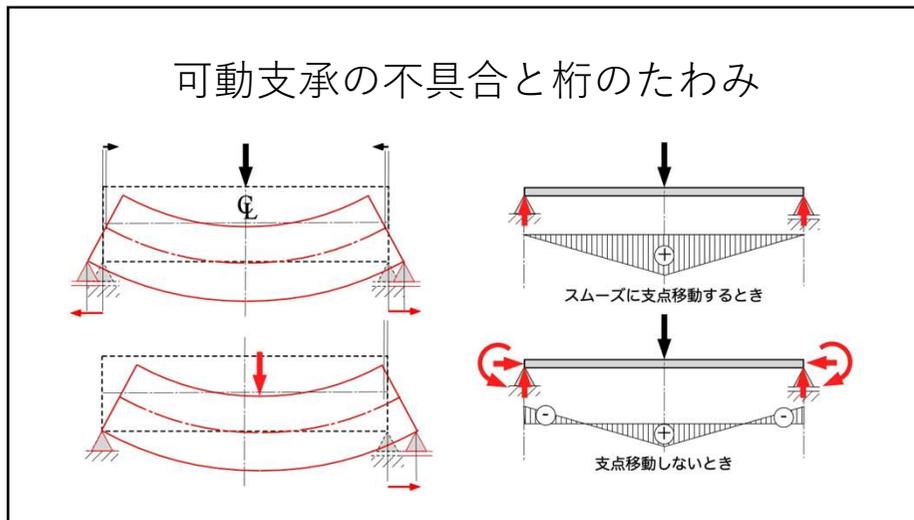
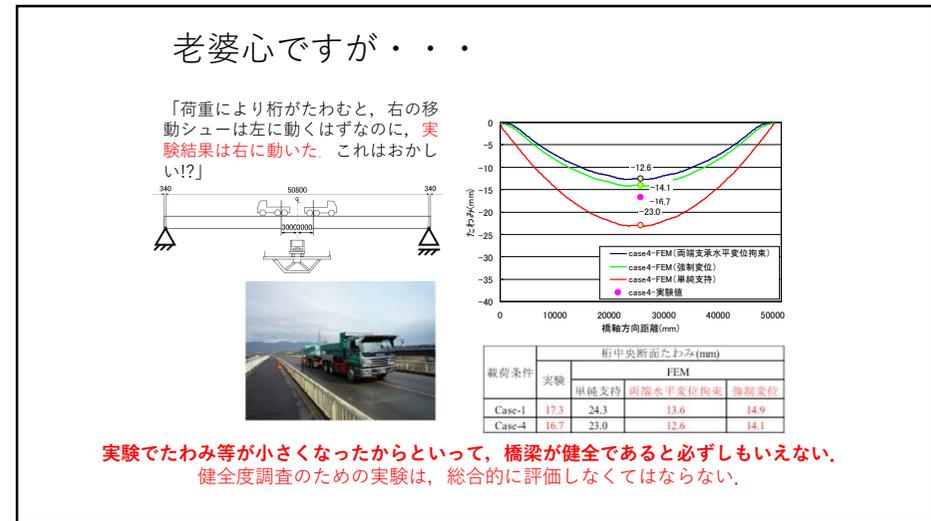
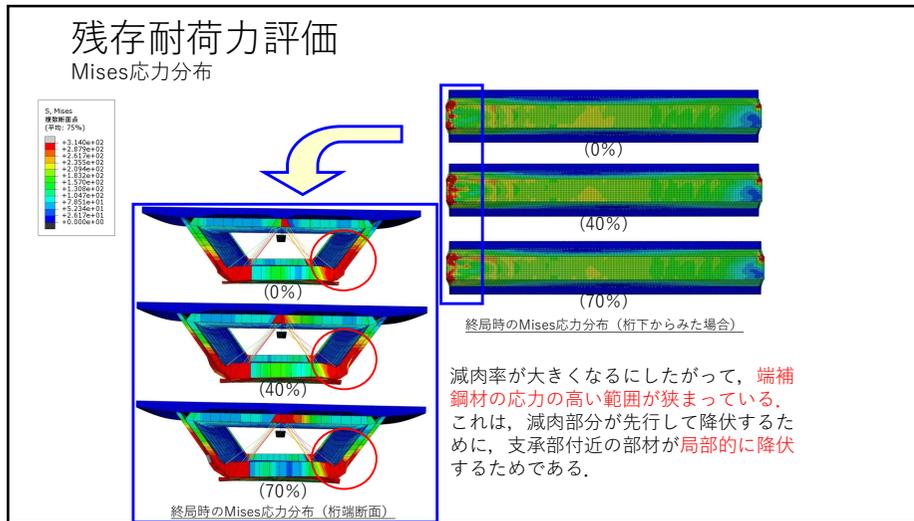
(桁端せん断耐力)



終局時の活荷重倍率は腐食減肉率に関係なく約4.3となった。これは、支那部で局部座屈が発生しても、後座屈強度と座屈後の応力再配分があるためと考えられる。

しかし、40%以上の減肉があると荷重が低い段階からたわみが増加することがわかる。これは、支那部ウェブの減肉量が大きくなるにしたがって、その部分が早期に局部座屈を起こすためである。

減肉率	死荷重時($\alpha=0.0$)	設計活荷重時($\alpha=1.0$)	終局時($\alpha=\alpha_u$)	
	桁中央たわみ(mm)	桁中央たわみ(mm)	桁中央たわみ(mm)	活荷重倍率= α_u
0	88.1	128.2	259.4	4.34
40	88.2	128.5	281.3	4.29
70	88.3	128.9	286.8	4.27



解析例：解析結果（活荷重倍率）

L-20		支点からの距離				
桁番	0	1/8	1/4	3/8	1/2	
G1	7.21	7.42	7.45	6.22	5.77	
G2	7.86	8.36	7.84	6.51	6.1	
G3	7.38	8.28	7.21	5.95	5.67	
G4	7.34	7.48	6.85	5.71	5.34	

B活荷重		支点からの距離				
桁番	0	1/8	1/4	3/8	1/2	
G1	5.80	5.80	5.28	4.51	4.23	
G2	6.60	6.60	5.71	4.72	4.45	
G3	6.55	6.55	5.21	4.35	4.12	
G4	5.89	5.89	4.98	4.11	3.95	

B活荷重倍率とL20の活荷重倍率の比（B活/L-20）

B活/L-20		支点からの距離				
桁番	0	1/8	1/4	3/8	1/2	
G1	0.80	0.78	0.71	0.73	0.73	
G2	0.84	0.79	0.73	0.73	0.73	
G3	0.89	0.79	0.72	0.73	0.73	
G4	0.80	0.79	0.73	0.72	0.74	

残存耐荷力解析における留意事項

橋全体を対象として、残存耐荷力解析を行う場合、

- 橋全体をどのようにモデル化するか
床組や主構などの各種部材を強度部材とみなすか？
- どのように仮定し、境界条件や荷重条件を設定するか
平面保持の仮定、材料特性
- どのような解析法を用いるか
はり理論
有限要素解(線形、非線形、複合非線形)(使用する要素の特性)

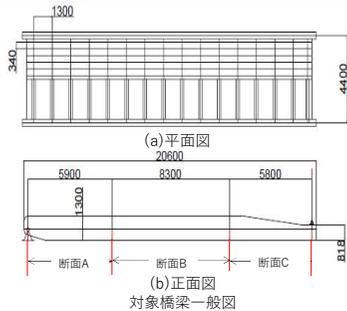
などにより、解析結果間でかなり異なったり、また実橋梁の残存耐荷力とも大きな差異を発生する可能性があることに注意されたい。

(3) フェリー渡橋の残存耐荷力解析



渡橋で典型的な腐食損傷
⇒海塩粒子の付着によって腐食しやすい主桁下フランジを腐食減肉させた場合を想定する

構造形式	単純2主中路式 鈹桁橋
支間長 [m]	20.0
床版	Steel
材質	SS400



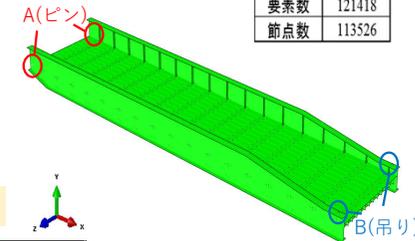
解析モデルの概要

◆使用要素

4節点6自由度アイソパラメトリックシェル要素

要素の大きさ：最大50×50mm

◆境界条件



要素数	121418
節点数	113526

◆鋼材の材料特性

弾性係数 [N/mm ²]	降伏応力 [N/mm ²]	ポアソン比 [-]	単位体積重量 [kN/m ³]
210000	253.2	0.3	78.5

完全弾塑性

解析条件

◆主桁下フランジの腐食

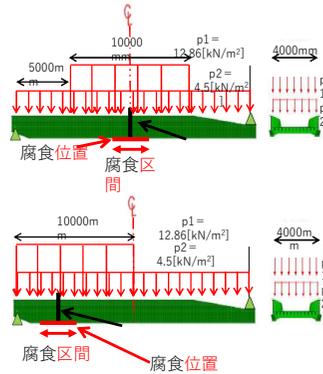
腐食箇所：桁中央と桁端付近の2ケース
 減肉の状態⇒減肉率R [%]
 ※R=100%：フランジが無い状態

◆荷重条件

腐食部が最も不利となる荷重配置

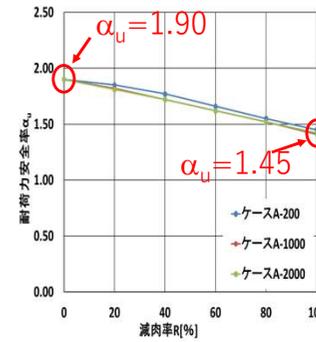
$$L_{all} = L_d + \alpha \cdot L_l$$

L_d ：死荷重
 L_l ：活荷重
 α ：活荷重倍率

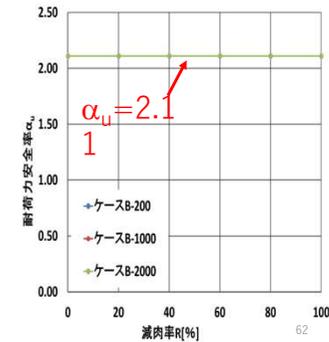


腐食に伴う強度低下

支間中央主桁下フランジ腐食



桁端付近主桁下フランジ腐食

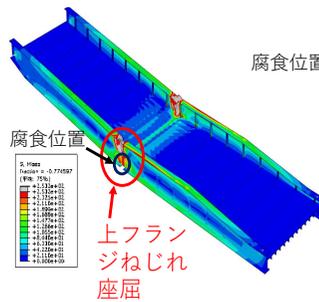


元々強度余裕は2程度しかない

終局状態

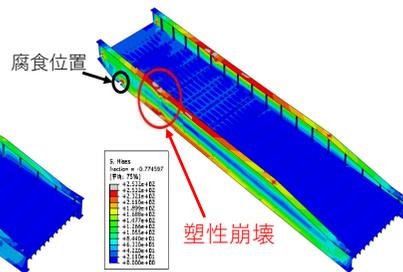
支間中央下フランジ腐食

腐食している断面で終局

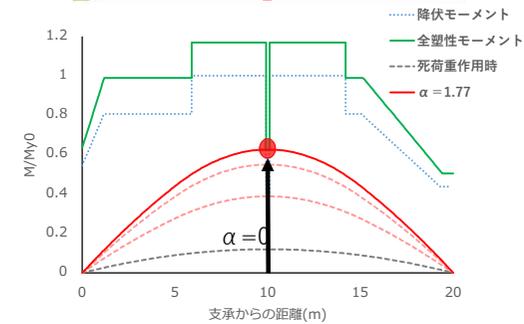
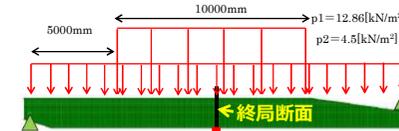


桁端付近下フランジ腐食

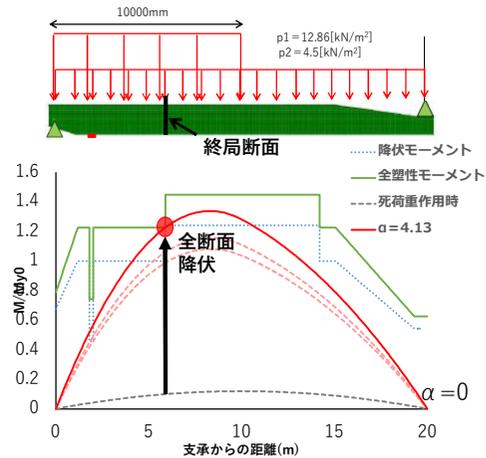
腐食している断面とは異なる断面で終局



現象の説明（支間中央下フランジ腐食）



現象の説明（桁端付近下フランジ腐食）



65

まとめ

- 一般の道路橋は、かなり大きな安全余裕がありそうだ。
- 重篤な腐食損傷があっても安全なのはこの余裕があるから!?
- 一方、フェリー栈橋などはこの余裕が無い（元々弱い構造物）ので注意すべき
- 腐食箇所で破壊（崩壊）するとは必ずしもいえない。腐食箇所をやみくもに補修しても強度は変わらない場合がある。

➡ この場合補修しても効果無し

一層の効率化を目指して・・・

- メンテナンスサイクルの【診断】に於いて、初期設計の設計概念を用いて診断するのではなく、メンテナンス時では実際の損傷を考慮した構造物全体に着目した性能評価を行って診断する考え方を導入できないだろうか!?

理由：

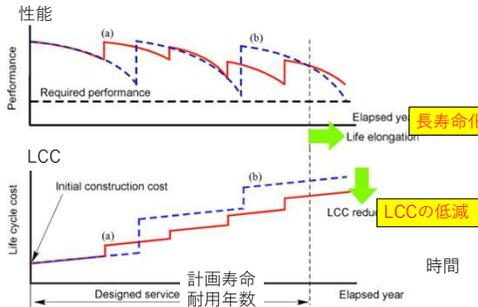
不確定要素が多い初期設計の考えとは異なり、メンテナンス時には、現実の構造物が目前に存在するから、実構造物の性能をかなり正確に評価できるのではないか。

初期設計では、部材設計をアセンブルして構造物を構築するが、維持管理では構造物全体からみた安全率の議論も可能ではないか。

その他
思いつきあれこれ

よく使われてきた(いる)劣化曲線

事後保全から予防保全へ → 狙い：インフラの**長寿命化**，**LCCの低減**
 予防保全：損傷が大きくなる前に対処する，損傷を予測して対処する。
 ライフサイクルコスト(LCC)を削減できる



今まで維持管理戦略に示される劣化曲線は、補修により元の状態(初期状態)まで性能回復するものが多い。
 これは、実状と異なることは明白。
 また、劣化曲線は、個々の構造物毎に描かれるべきで、実状に合わせて修正し易い曲線とすべき。
 構造物は、人と同じで、生まれたときから強いものもあれば元々弱いものもある。治療しても、必ずしも元の元気な状態に戻るとはいえない。
 また、構造物の設置環境によっても、ダメージ要因が強い場合や弱い場合もある。
 維持管理は、構造物毎に特性/特徴を捉えて適切かつ効率的に行う必要がある

防食機能の劣化と耐荷力の低下

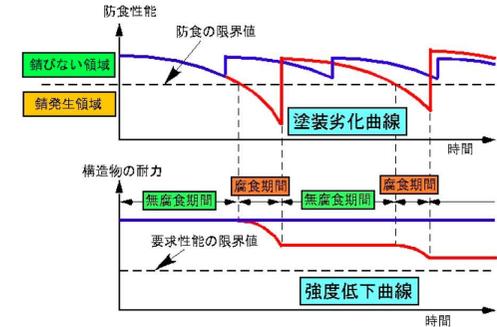
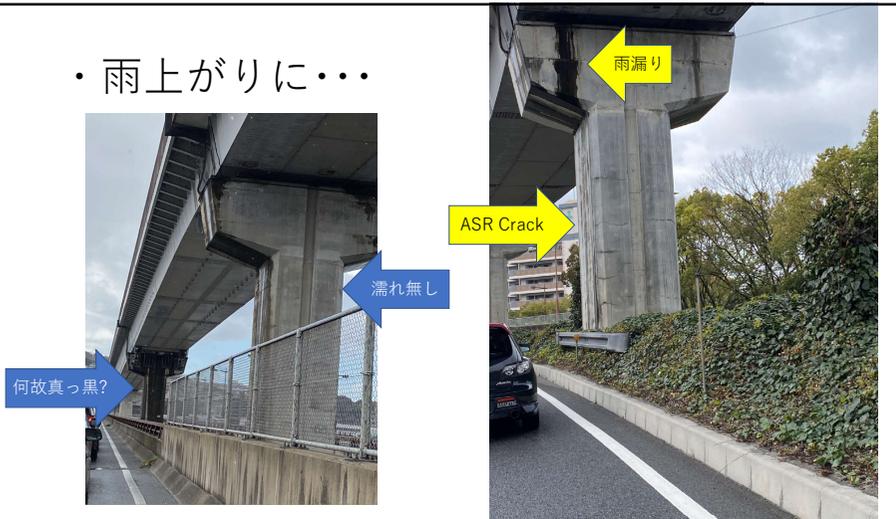


図-1 塗装防食と構造物強度の経年変化の概念

雨上がりに...



雨上がりに...



除部橋

現場に行かない
現場を知らない
現場を見ない
エンジニアは真のエンジニアとは言えない

ご静聴
ありがとうございました。

見る
維持管理の基本
診る

松井繁之先生談

写真：JR西日本提供