
高速道路橋の 維持管理の課題と高耐久化

— ライフサイクルコストの最小化を目指して —

2014年12月19日

中日本高速道路株式会社

技術・建設本部 専門主幹(橋梁担当) 酒井秀昭



資料の項目

NEXCO

1. 橋梁の経年化に伴う課題
2. 橋梁の維持管理の手順(高速道路の事例)
 - 2.1 点検結果による性能の評価と判定の事例(中性化)
3. 鋼橋鋼部材の変状と対策および今後の方策
 - 3.1 鋼構造の劣化要因
 - 3.2 鋼構造の腐食
 - 3.3 鋼構造の疲労
 - 3.4 鋼構造の非破壊検査方法
 - 3.5 疲労亀裂の補修・補強工法の概要
 - 3.6 鋼橋の鋼部材の高耐久化の方策

資料の項目

NEXCO

4. コンクリート橋の変状と対策および今後の方策

4.1 コンクリート構造の劣化要因

4.2 コンクリート構造の劣化

4.3 PC鋼材の劣化要因

4.4 PC鋼材の劣化

4.5 PC橋の点検の着目点

4.6 コンクリート構造の非破壊検査方法

4.7 コンクリート構造の主な補修補強工法

4.8 コンクリート橋の高耐久化の方策

5. 橋梁の高耐久化の方策

1. 橋梁の経年化に伴う課題

経年化に伴う主な劣化

NEXCO

コンクリート構造

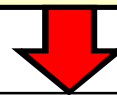
- ・コンクリートの中性化(二酸化炭素)
- ・塩害(海水からの飛来塩分・凍結防止剤)
- ・疲労[床版](自動車の輪荷重)
- ・アルカリシリカ反応(反応性骨材, アルカリ, 水)
- ・初期欠陥に起因する(かぶり不足・水・ひび割れ・補修不良)

PC鋼材

- ・鋼材の腐食
- ・疲労

鋼構造

- ・鋼材の腐食
- ・疲労



経年化により劣化の発生および進行が増大する

維持管理の課題

NEXCO

経年化により劣化の発生および進行が増大する



点検・診断・補修補強を適切に実施する。

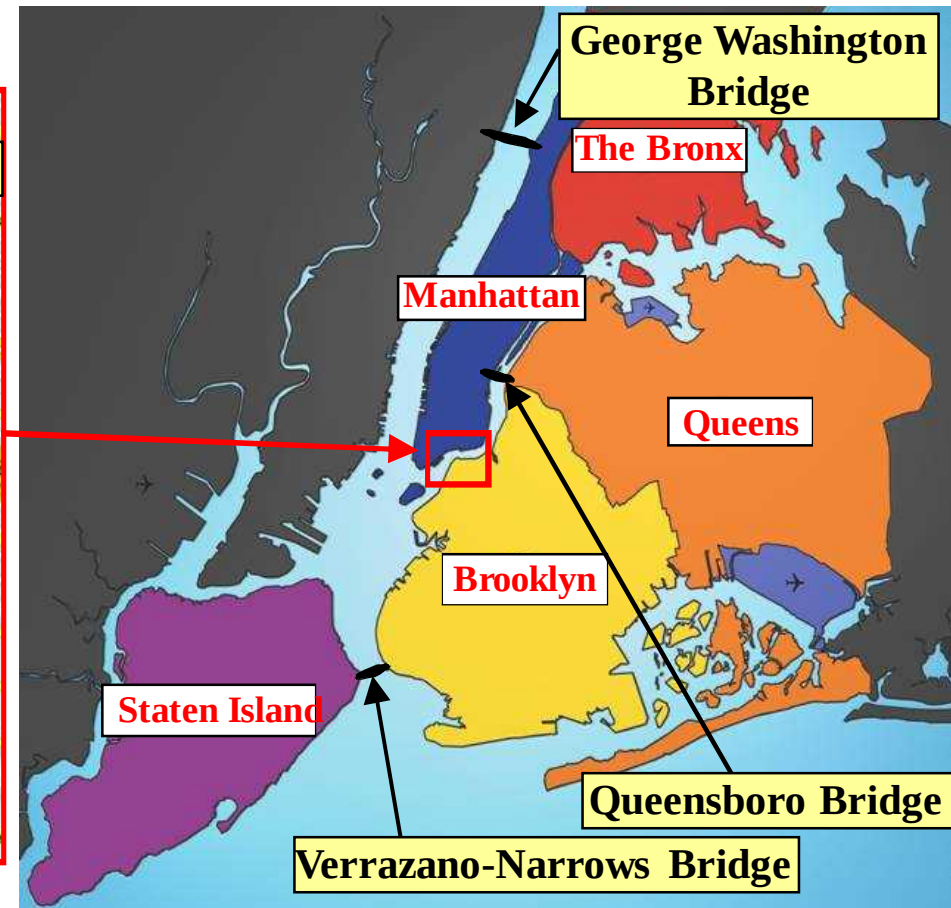
- ・ 確実な点検頻度の確保 (点検の制度化)
(見る)
- ・ 損傷の確実な発見・評価 (点検・診断の信頼性確保)
(見過ごさない)
- ・ 確実な補修・補強 (速やかで適切な実施・技術開発)
(先送りしない)



橋梁の高耐久化

ニューヨークにおける歴史的な橋梁

橋梁は維持管理を実施すれば100年後も供用可能



Brooklyn橋は130年後も供用中

NEXCO

適切な維持管理を実施

- ・鋼吊橋 (斜材併用) 橋長1,053m 中央径間486m 1,883年完成
幅員26m 車道6車線
- ・設計 John Roebling 基礎ニューマチックケーソン



Manhattan橋

NEXCO

鋼吊橋 橋長890m 中央径間448m 1,909年完成
幅員37m 車道 上層4車線 下層3車線 鉄道4線 自転車歩行者道
・補修実績 1985～2004年通行止めによる補修



Williamsburg橋

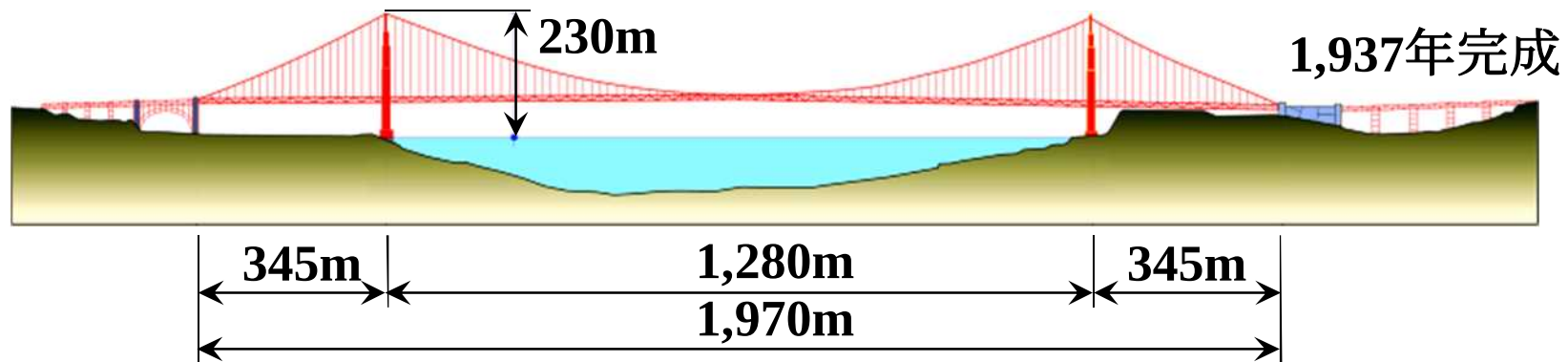
NEXCO

鋼吊橋 橋長671m 中央径間488m 1,903年完成
幅員36m 車道8車線 鉄道2線 自転車歩行者道
・補修実績 1988年4月 2ヶ月通行止めによる補修 (腐食等)
1990年代 6億\$で補修



Golden Gate橋は77年後も供用中

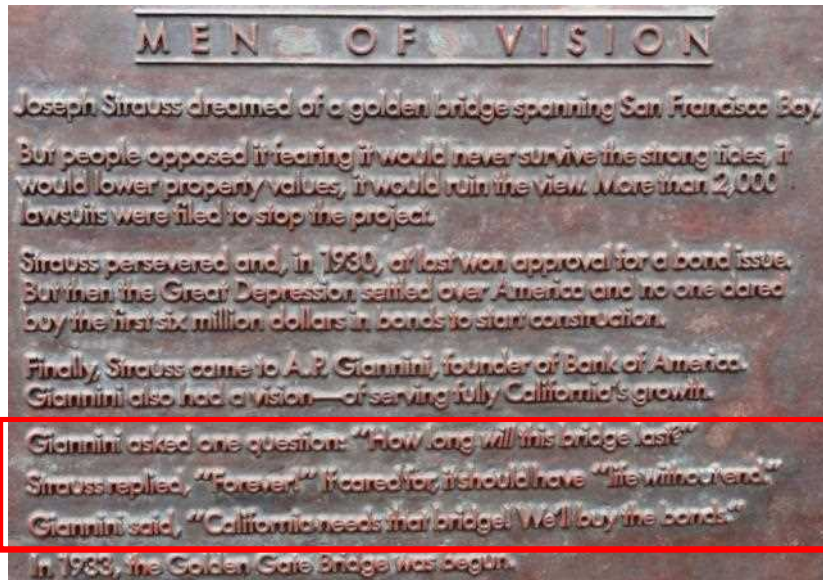
適切な維持管理を実施



Golden Gate橋の計画時の思想

NEXCO

適切な維持管理を実施すれば橋梁の寿命は永遠



MEN OF VISION

Giannini asked one question:

How long will this bridge last ?

Strauss replied,

"Forever !" If cared for, it should have "life without end."

Giannini said,

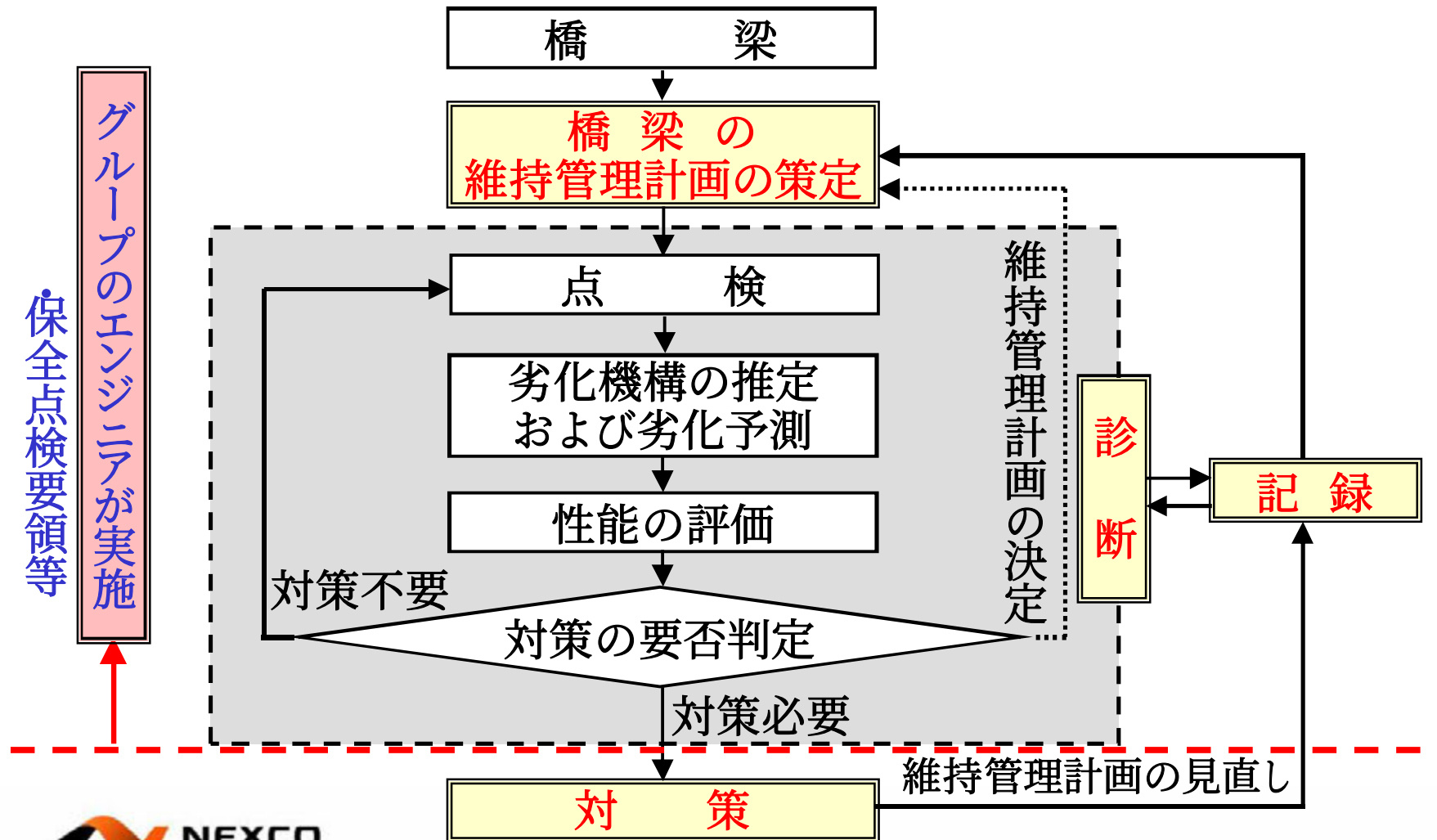
"California needs that bridge ! We'll buy the bonds."



2. 橋梁の維持管理の手順 (高速道路の事例)

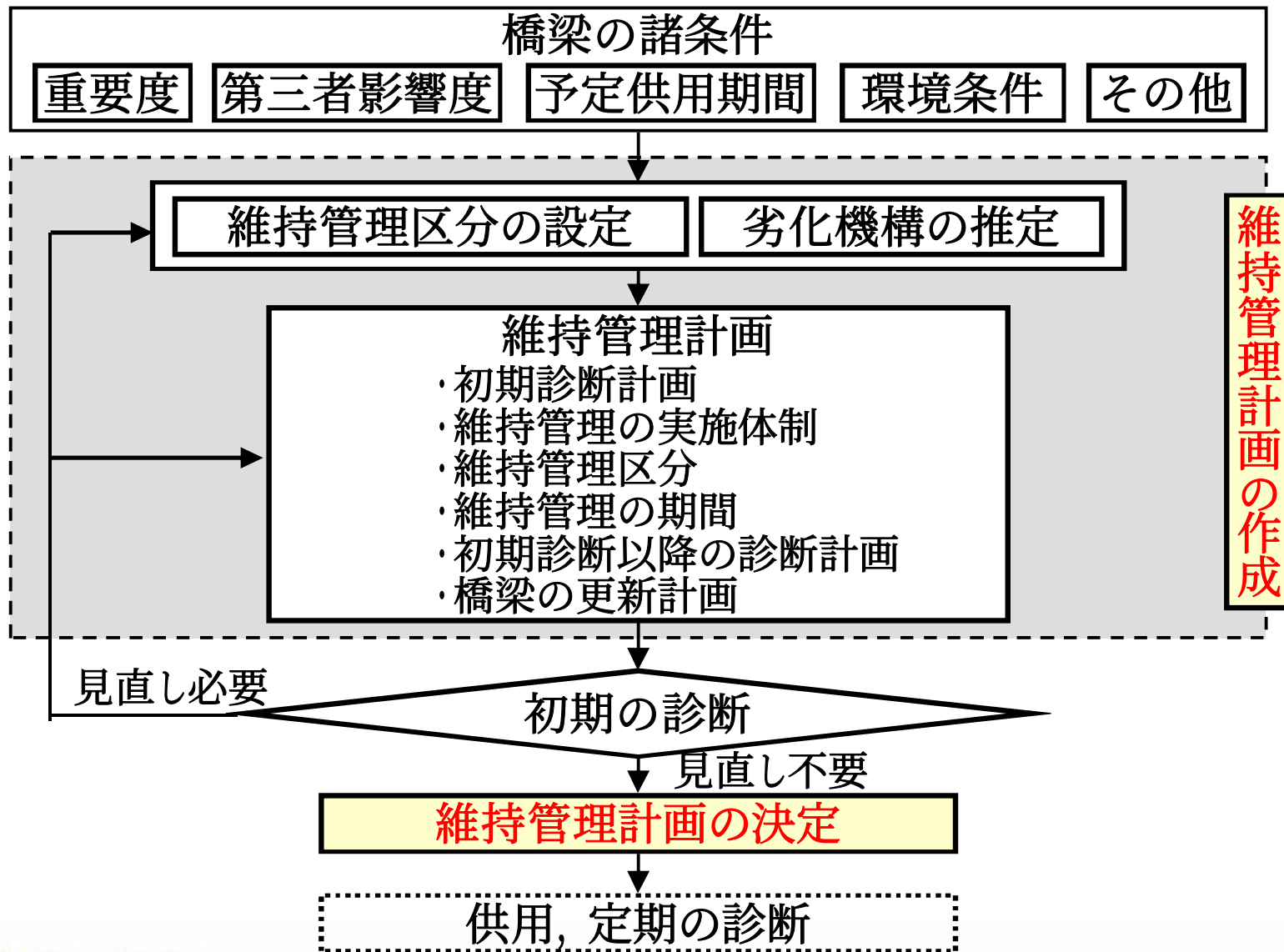
維持管理の手順

維持管理計画の策定, 診断, 対策, 記録から構成



維持管理計画の手順

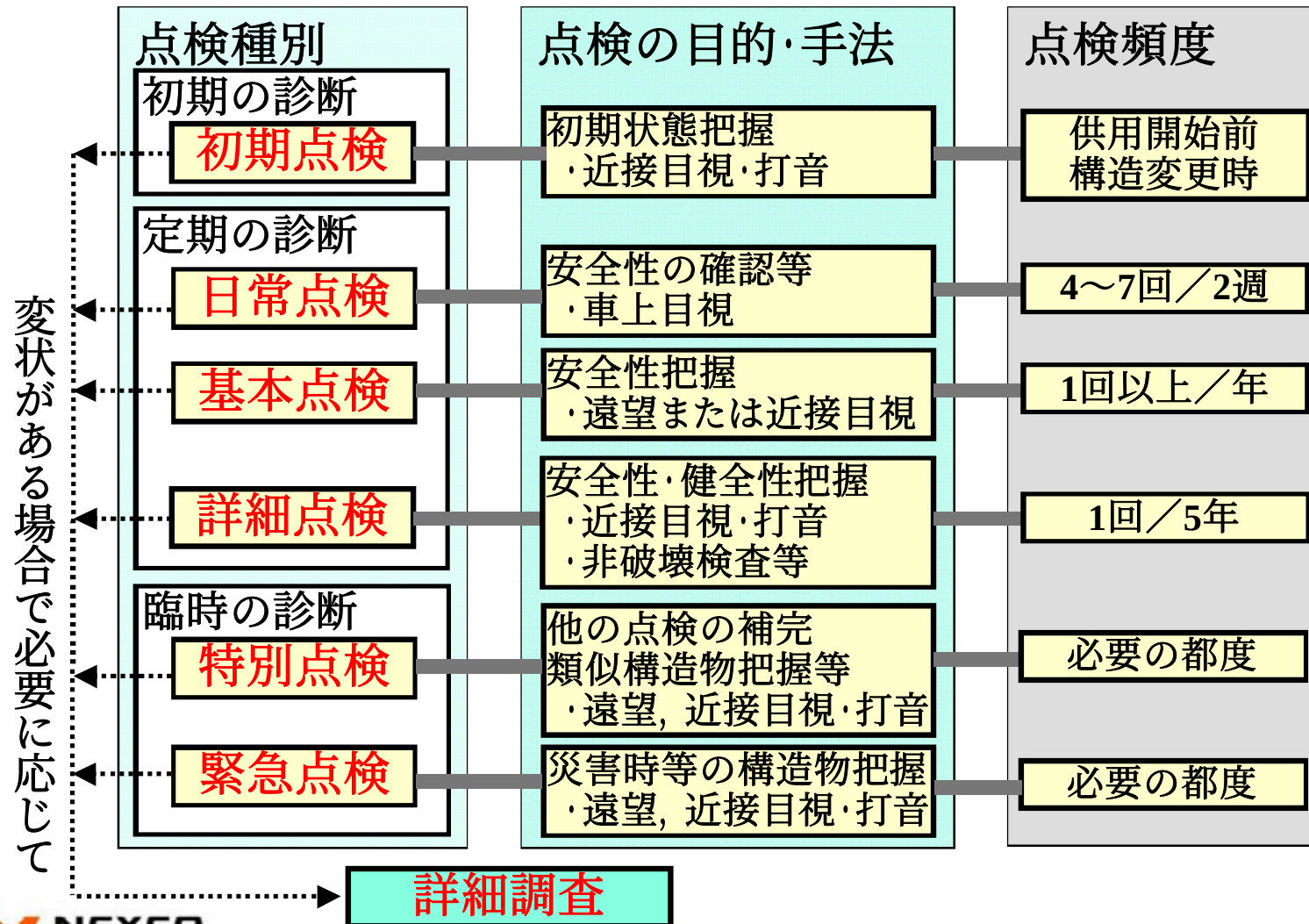
NEXCO



点検の種別

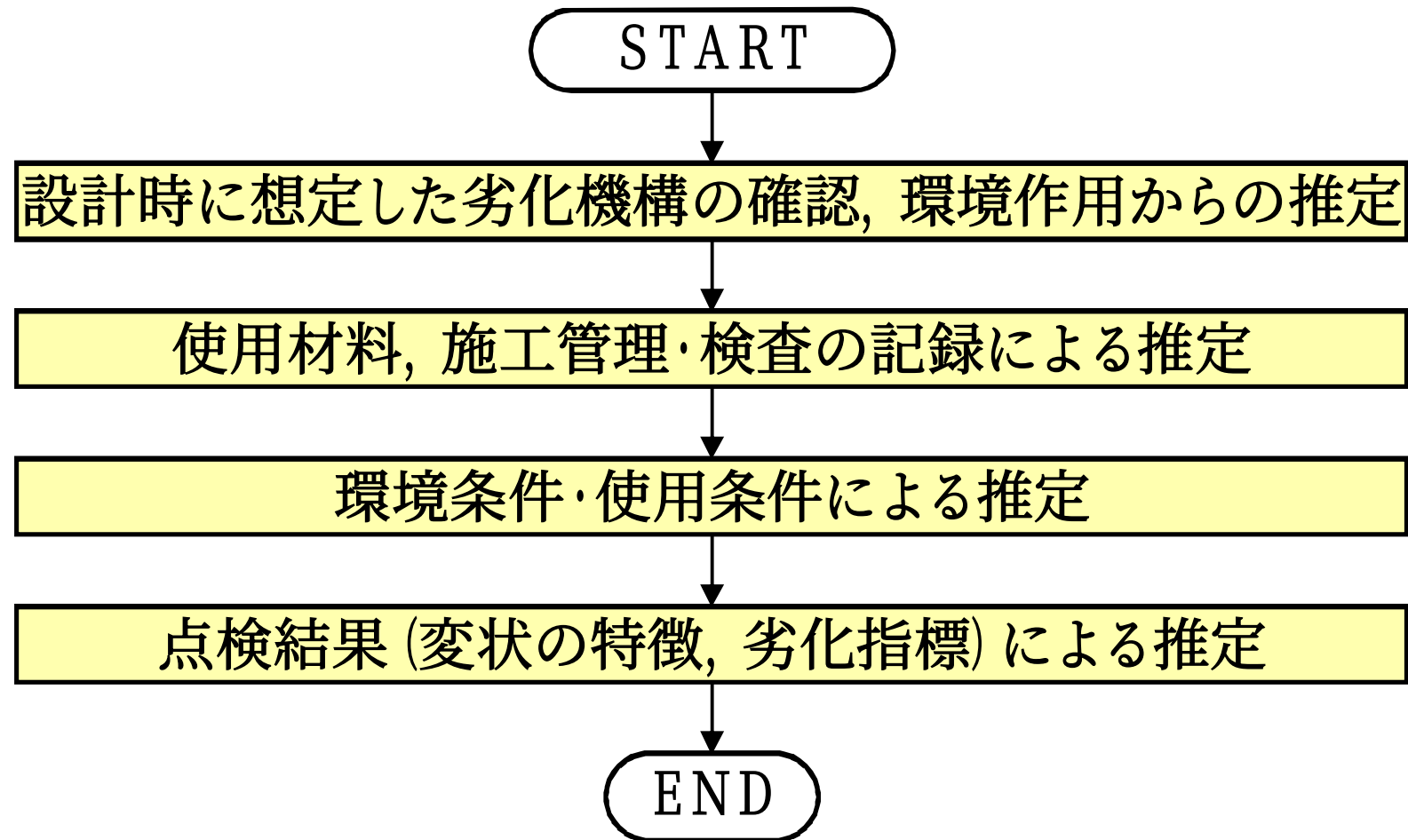
NEXCO

目的に応じた点検の実施

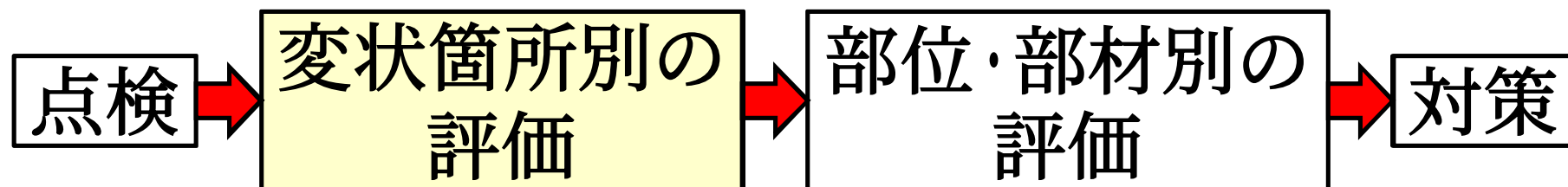


劣化機構の推定

NEXCO



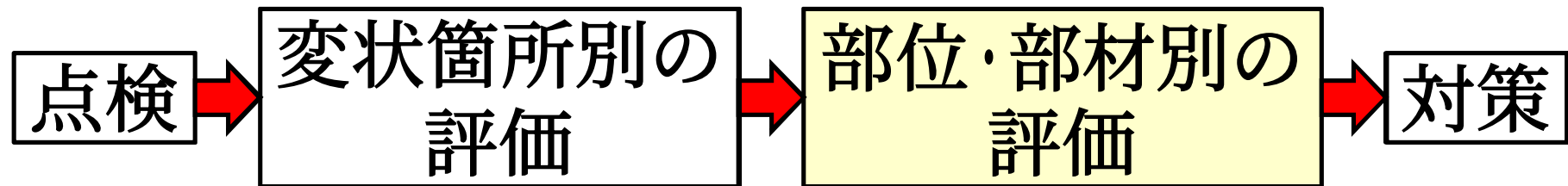
点検結果による性能の評価と判定



変状箇所別の評価の事例

評価区分		一般的状況
機能面に対する評価	AA	変状が著しく、機能面への影響が非常に高いと判断され、速やかな対策が必要な場合
	A	変状があり、機能低下に影響していると判断され、対策の検討が必要な場合
	A1	変状があり、機能低下への影響が高いと判断される場合
	A2	変状があり、機能低下への影響が低いと判断される場合
	B	変状はあるが、機能低下への影響は無く、損傷・変状の進行状態を継続的に観察する必要がある場合
	C	変状の状態（機能面への影響度合いなど）に関する判定を行うために調査を実施する必要がある場合
	OK	変状がないか、もしくは軽微な場合
第三者等被害に対する評価	E	安全な交通または第三者に対し支障となる恐れがあるため、対策が必要と判断される場合

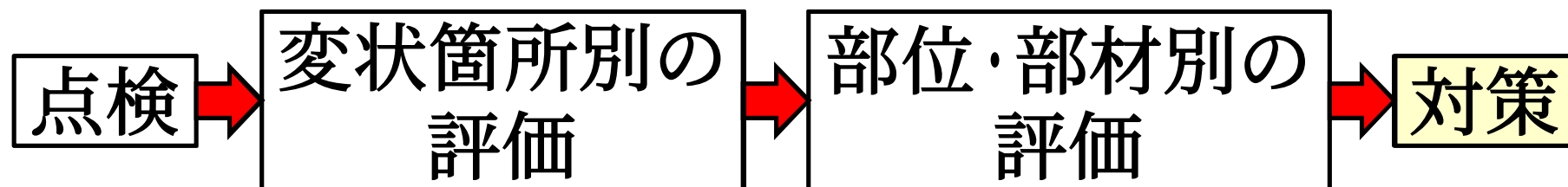
点検結果による性能の評価と判定



部位・部材別の評価の事例

変状 グレード	初期欠陥, 損傷 劣化の程度	構造物, 部位・部材の性能	備 考※
I	問題となる変状がない	性能低下は見られない	潜伏期
II	軽微な変状が発生	耐荷性能は低下していない	進展期
III	変状が発生	耐荷性能は低下に対する 注意が必要	加速期前期
IV	変状が著しい	耐荷性能が低下しており, 管理限界に達する恐れがある	加速期後期
V	深刻な変状が発生	耐荷性能の低下が深刻であ り, 安全性に問題がある	劣化期

点検結果による性能の評価と判定



変状グレードに応じた対策の事例

変状グレード	初期欠陥, 損傷劣化の程度	構造物, 部位・部材の性能	予防維持管理	点検強化	補修	補強	供用性回復	供用制限	撤去解体	対策の方向性
I	問題となる変状がない	性能低下は見られない	○							対策無
II	軽微な変状が発生	耐荷性能は低下していない	◎							予防維持管理
III	変状が発生	耐荷性能の低下に対する注意が必要	◎	○	◎					主に補修
IV	変状が著しい	耐荷性能が低下しており, 管理限界に達する恐れがある		◎	◎	◎	◎			補強
V	深刻な変状が発生	耐荷性能の低下が深刻であり, 安全性に問題がある		◎	○	◎	◎	◎	◎	大規模対策

◎: 標準的な対策, ○: 予防的に実施される対策

2.1 点検結果による性能の 評価と判定の事例 (中性化)

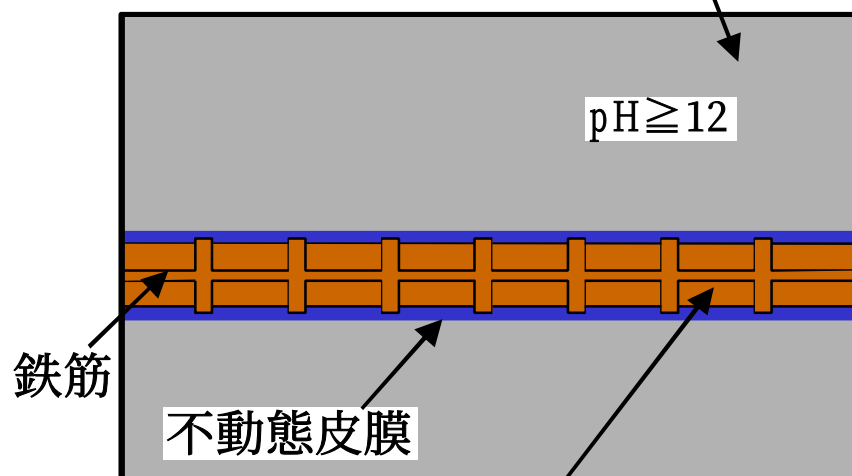
中性化について

NEXCO

コンクリートの炭酸化によりpHが低下し鉄筋が腐食

健全な状態

コンクリート中に水酸化カルシウムが多量に存在し、pH12以上の高いアルカリ性を保っている



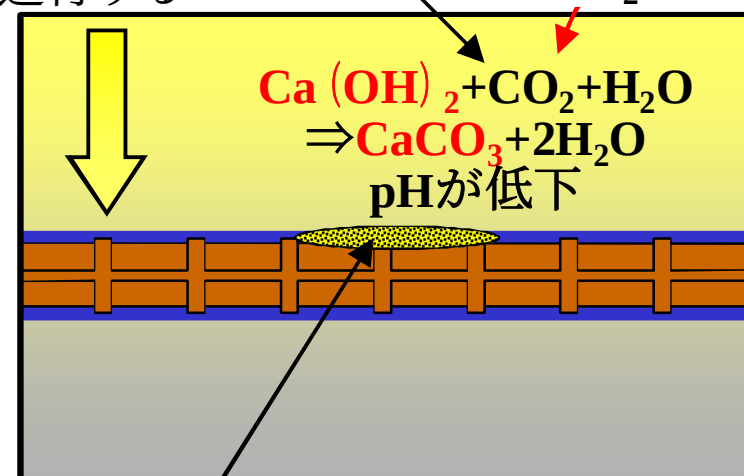
鉄筋は不動態皮膜に保護されて、さびない

中性化

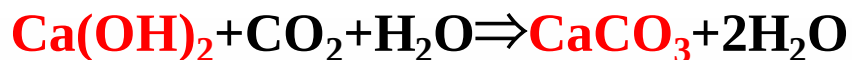
コンクリート中の水酸化カルシウム (Ca(OH)_2) が二酸化炭素と反応して炭酸カルシウム (CaCO_3) となり、pHが低下していく

表面から中性化が進行する

空気中の二酸化炭素 CO_2



不動態皮膜が破壊されて、さびができる



中性化による劣化事例

NEXCO

中性化の進行 ⇒ 鉄筋の腐食・剥落



中性化の調査

NEXCO

主な調査のポイント

- ① 中性化の進行は**コンクリートが比較的乾燥している箇所**で速い。
 - ・張出し床版, 壁高欄, 橋脚躯体, 北面より南面
- ② 中性化の進行は, **強度が低い(W/Cが大きい)コンクリート**が早い。
 - ・PCよりRC, 壁高欄, 橋脚, C-BOX, 擁壁
- ③ **かぶりが小さい**ほど鉄筋の腐食が早く発生する。
 - ・橋梁上部工, 施工時にかぶりが少ない箇所(初期欠陥)
- ④ **コンクリートの充填不良箇所**(初期欠陥), **ひび割れ**は, 中性化の進行が早い。
- ⑤ 鋼材の腐食は, **湿潤状態箇所, 海岸部, 凍結防止剤影響箇所**で進行する。

主な調査方法

- ① 中性化深さ
 - ・フェノールフタレイン溶液「JIS A 1152 コンクリートの中性化深さの測定方法」
- ② 構造物の外観, ひび割れ状況, 鋼材のかぶり
- ③ 鋼材の腐食
 - ・コンクリートのはつりによる方法, 自然電位法, 分極抵抗法

中性化深さの予測方法①



①中性化深さの設計値の算定

中性化深さの設計値 y_d (mm) は、次式で算定される。

$$y_d = \gamma_{cb} \cdot \alpha_d \sqrt{t}$$

ここに、 α_d : 中性化速度係数の設計値 (mm/√年)

t : 中性化に対する耐用年数 (年)

γ_{cb} : 中性化深さの設計値 y_d のばらつきを考慮した安全係数
一般に1.15としてよい。

②中性化速度係数の設計値 α_d の算定

$$\alpha_d = \alpha_k \cdot \beta_e \cdot \gamma_c$$

ここに、 α_k : 中性化速度係数の特性値 (mm/√年)

β_e : 環境作用の程度を表す係数で、下表の値を用いてよい。

γ_c : コンクリートの材料係数で一般に1.0としてよい。

環境条件	環境作用の程度を表す係数 β_e
乾燥しやすい環境	1.6
乾燥しにくい環境	1.0

中性化深さの予測方法②

NEXCO

③ α_k (中性化速度係数の特性値) の設定

コンクリート標準示方書においては、中性化速度係数の特性値を、実験あるいは既往のデータに基づいて定めることを原則としている。

$$\gamma_p \alpha_p \leq \alpha_k$$

ここに、 α_p :コンクリートの中性化速度係数の予測値 (mm/ $\sqrt{\text{年}}$)

γ_p : α_p の精度に関する安全係数で、一般に1.0~1.3としてよい。

$$\alpha_p = a + b \cdot W/B \quad (\text{mm}/\sqrt{\text{年}})$$

ここに、 a, b :セメント(結合材)の種類に応じて、実績から定まる係数

W/B :有効水結合材比

α_p は、普通ポルトランドセメントの場合に以下の回帰式が提案されている。

$$\alpha_p = -3.57 + 9.0(W/B) \quad (\text{mm}/\sqrt{\text{年}})$$

ここに、 $W/B = W/(C_p + k \cdot A_d)$

C_p :単位体積あたりのポルトランドセメントの質量

A_d :単位体積あたりの混和材の質量

k :混和材の種類により定まる定数

高炉スラグ微粉末の場合 0.7

フライアッシュの場合 0.0

中性化深さの測定事例 (壁高欄・床版)

- ・床版上面については中性化の進行は確認されていない。
- ・中性化深さが鉄筋位置に達している箇所がある。
- ・中性化に起因して、鉄筋の腐食が発生している箇所がある。

中性化速度係数 α

$$\alpha = \frac{y}{\sqrt{t}}$$

α : 中性化速度係数 (mm/√年)

t : 経過年数 (年)

y : 中性化深さ (mm)

壁高欄の中性化の現況

橋梁名	経過年数 (年)	中性化深さ (mm)	中性化速度係数 (mm/√年)
C	41	7.0	1.09
H	38	20.5	3.33
I	38	3.5	0.57
K	37	12.0	1.97
L	38	6.0	0.97
T	38	4.5	0.73
U	39	11.5	1.84
V	39	15.8	2.52
W	39	12.3	1.96
X	37	10.3	1.69
平均	38.4	10.3	1.67

床版下面の中性化の現況

橋梁名	経過年数 (年)	中性化深さ (mm)	中性化速度係数 (mm/√年)
A	41	22.9	3.57
B	41	4.5	0.69
C	41	4.3	0.66
D	41	22.0	3.44
E	41	25.3	3.94
F	41	4.5	0.70
G	41	3.5	0.55
H	38	5.8	0.93
I	38	5.0	0.81
J	38	10.5	1.70
K	37	39.0	6.41
L	38	4.5	0.73
M	38	5.5	0.89
N	38	5.0	0.81
O	38	7.0	1.14
P	41	19.5	3.05
Q	41	15.8	2.46
R	41	15.8	2.46
S	40	28.3	4.47
V	39	18.3	2.92
W	39	28.3	4.52
X	37	40.5	6.66
平均	39.5	15.2	2.43



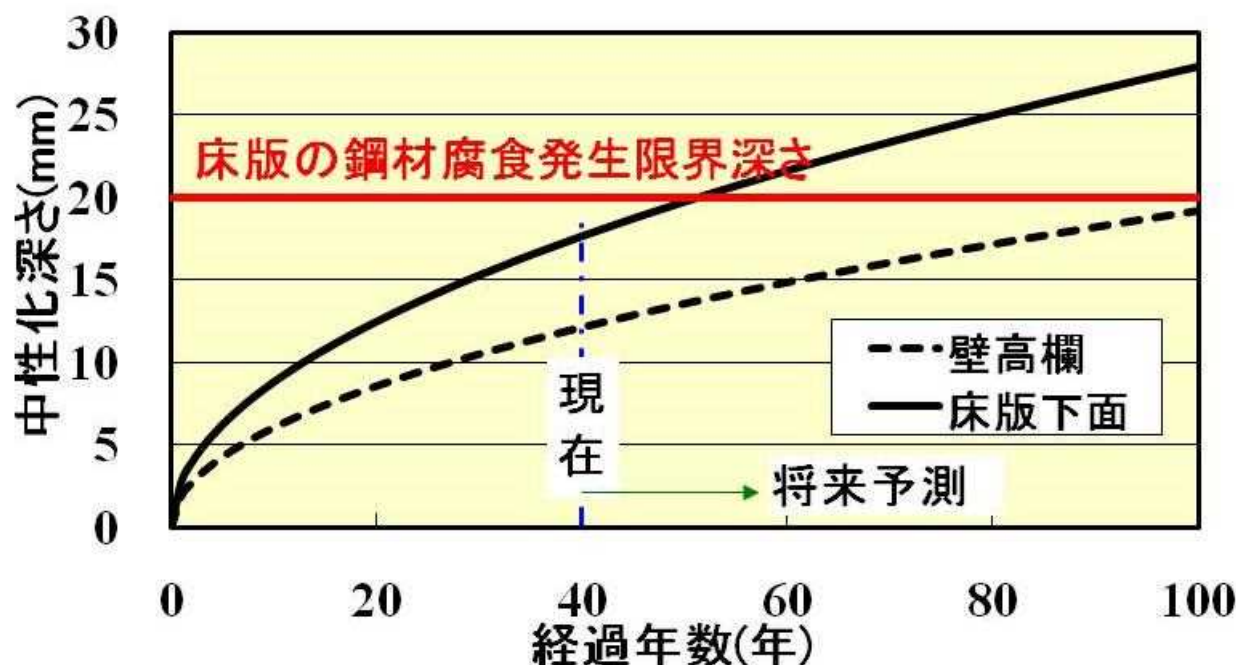
床版下面の中性化による鉄筋腐食状況

中性化の将来予測事例

NEXCO

調査結果を用いて、中性化深さを推計するとグラフのとおりとなる。ただし、安全係数 γ_{cb} は、コンクリート標準示方書に準拠して、1.15とした。

- ・壁高欄においては、100年経過後でも腐食発生限界深さに達しない。
- ・床版下面においては、55年後(残り15年)に中性化が鋼材腐食発生限界深さ(設計かぶり-10mmとして算定)に達するため、適切な補修等の必要性があると推察される。
- ・調査結果は、データのばらつきが大きいいため、今後も抽出調査を継続して、適切な補修計画を立案することが必要となる。



中性化に対する補修・補強

NEXCO

補修・補強に期待する効果と工法の例

期待する効果	工 法 例
中性化の進行を抑制	表面被覆工法, 表面含浸工法
中性化深さを0にする	断面修復工法, 再アルカリ化工法
鉄筋の腐食進行を抑制	表面被覆工法, 表面含浸工法, 断面修復工法 再アルカリ化工法, 電気防食工法, 鋼材防錆処理 水処理

構造物の劣化過程と工法の例

劣化過程	標 準 的 な 工 法
潜伏期	表面被覆工法, 表面含浸工法, 再アルカリ化工法
進展期	表面被覆工法, 表面含浸工法, 断面修復工法 再アルカリ化工法
加速期前期	表面被覆工法, 表面含浸工法, 断面修復工法 電気防食工法, 再アルカリ化工法
加速期後期	断面修復工法
劣化期	断面修復工法, (接着工法・巻立て工法等)

ライフサイクルコストの検討事例

NEXCO

コンクリート床版におけるライフサイクルコストの検討事例

検討条件

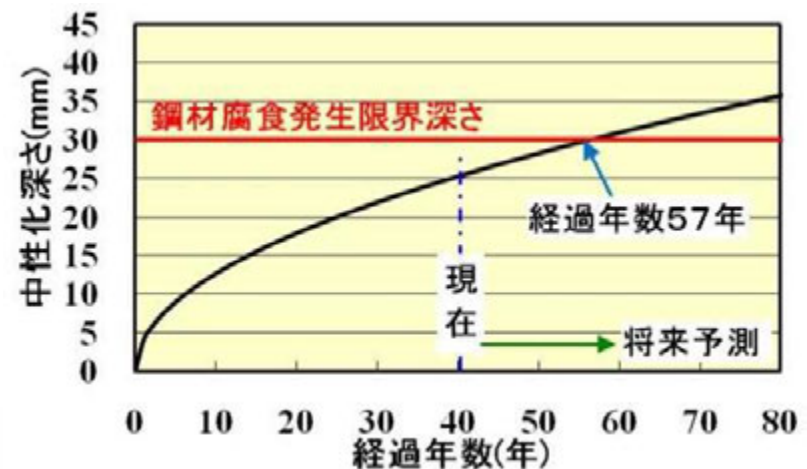
- ①床版の経過年数40年, 中性化深さ25.3mm, 鉄筋かぶり40mmである。
- ②経過年数および中性化深さから, 中性化速度係数は $4.0\text{mm}/\sqrt{\text{年}}$ となる。

検討手順

- ①鉄筋の腐食発生限界深さを鉄筋かぶりから10mmを差し引いた30mmとする。
- ②中性化速度係数 $4.0\text{mm}/\sqrt{\text{年}}$ から, 腐食発生限界深さまで中性化が進行する年数を算定すると経過年数57年となる。

判断

- ①現時点は潜伏期に相当するため, 表面被覆工法や表面含浸工法などの比較的安価な補修工法が採用できる。
- ②現時点から17年後以降は, 進展期に達することが予想されるため, 断面修復工法等の比較的高価な補修工法となる。
- ③現時点での補修する場合のコストと進展期以降に補修する場合のコストを比較し, 安価な方法を採用する。



3. 鋼橋鋼部材の変状と対策 および今後の方策

3.1 鋼構造の劣化要因

劣化機構と要因, 指標, 現象

NEXCO

劣化機構	劣化要因	劣化現象	劣化指標の例
腐食	紫外線 塩化物イオン 酸性物質・酸素 雨水(結露)など	紫外線は塗膜表面を分解して粉状にすることによる白亜化と顔料の艶やかさを低下させる。浸透雨水と酸素による塗膜下でのマクロセル腐食, 塗膜貫通穴の発生(点錆), ミクロセル腐食による錆範囲の拡大の順で発生する。錆が進展すると, 鋼材の減肉に繋がる。塩分はこれを加速させる。	変退色・はがれ 錆・腐食面積 減肉厚 減肉面積
疲労	繰返し载荷 応力集中	降伏点以下の応力の繰返しにより, 部材取合部の溶接止端部(特に回し溶接部) やすみ肉溶接ルート部のような応力集中部に亀裂が発生する。	亀裂

鋼構造の劣化要因に対する課題

劣化に対する適切な対策の実施が高耐久化を推進

腐食

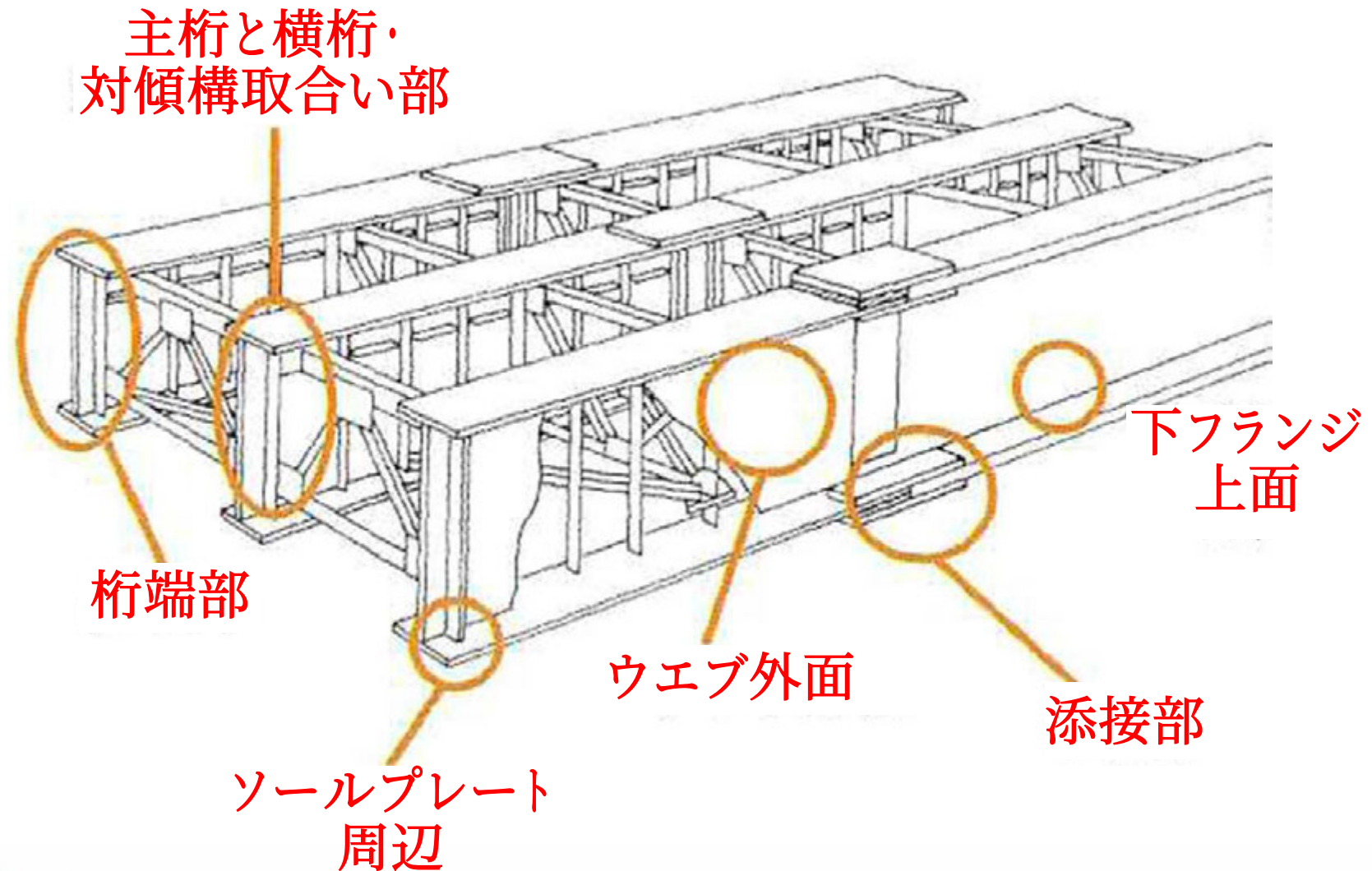
- 鋼材は、適切な防錆処理を実施しなければ腐食が進行する。
- 鋼材の防錆処理が塗装仕様の場合は、定期的な再塗装(補修)を実施することが前提として設計されている。

疲労

- 平成14年の道路橋示方書より以前の示方書では、合理的な疲労設計が実施されていない。
- 示方書で想定した輪荷重よりも大きな輪荷重の車両が走行している。
- 疲労の診断や対策には、高度な専門的知識が必要となる。

3.2 鋼構造の腐食

鋼材腐食が発生しやすい箇所 (鋼鈑桁)



鋼材腐食事例(桁端部)

NEXCO



中間架違い部桁端



橋台部桁端

鋼材腐食事例(添接部)

NEXCO



添接部近傍



添接部高力ボルト

鋼材腐食事例(接合部)



トラス格点部



桁接合部

鋼材腐食事例(支承)



鋼材腐食事例(耐候性鋼材)



桁端部



高力ボルト

斜張橋斜材変状事例(USA)

NEXCO



中日本 © 2014 Central Nippon Expressway Co. Ltd. All rights reserved.

高速道路橋の維持管理の課題と高耐久化

変状箇所別の判定事例

NEXCO

鋼橋の腐食の判定事例

判定区分		変状判定・写真	
AA	腐食により主部材に孔食や著しい断面減少が生じ、構造物の耐荷力に影響を及ぼす恐れがある。		
	腐食による断面減少が進行し、主部材が断面欠損している。	腐食により下フランジに著しい断面損失があり、構造上支障となる恐れがある。	腐食により主桁のウェブに断面欠損が生じており、耐荷力に影響を与えている。

変状箇所別の判定事例

NEXCO

鋼橋の腐食の判定事例

判定区分			変状判定・写真	
A	腐食により部材に減厚や孔食が生じている。	A1	 	減厚や孔食が主部材の広範囲に生じており、変状の進行により早期に構造物の耐荷力に影響を及ぼす恐れがある。
		A2	 	減厚が局部的に生じており、損傷の進行により構造物の耐荷力に影響を及ぼす恐れがある。

変状箇所別の判定事例



鋼橋の腐食の判定事例

判定区分		変状判定・写真	
B	減厚や孔食に進行する恐れのある腐食・発錆。		
		主部材に減厚や孔食に進行する恐れのある腐食，発錆が見られる。	

鋼部材の腐食の判定基準について

判定基準はLCCの最小化を考慮しているか？

課題

- B判定では補修しないのが通常であるが、「腐食」についてはA判定まで**放置した場合にLCCが増大**する可能性が高い。
B判定:変状はあるが、機能低下への影響は無く、損傷・変状の進行状態を継続的に観察する必要がある場合
- A判定の箇所は、**ブラスト等**による素地調整（**1種ケレン**）が必要となり、コストが増大する。B判定の箇所は、ディスクサンダー等による素地調整（3種ケレン）で可能である。
1種ケレン:さびや旧塗膜を除去し、正常な鋼材面とする。(ブラスト)
3種ケレン:さびや劣化塗膜を除去し、鋼材面を露出させるが、劣化していない塗膜(活膜)は残す。
- AA判定の箇所は、**当て板補修**や部材の**取り換え**等が必要となり、**コストが大幅に増大**する。

鋼部材の腐食の進行事例

NEXCO

腐食および原因を放置すると腐食は進行する！

H15点検時



H19点検時



H24点検時



排水管からの漏水に起因する腐食の進行

鋼部材の腐食の進行事例

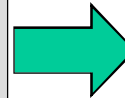
NEXCO

腐食および原因を放置すると腐食は進行する！

H15点検時



H19点検時



H24点検時



桁端部からの漏水に起因する腐食の進行

鋼部材の腐食の進行事例

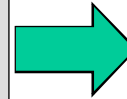
NEXCO

腐食および原因を放置すると腐食は進行する！

H15点検時



H20点検時



H24点検時



NEXCO

中日本

© 2014 Central Nippon Expressway Co. Ltd. All rights reserved.

雨水の滴下に起因する腐食の進行 (トラス橋下弦材)

高速道路橋の維持管理の課題と高耐久化

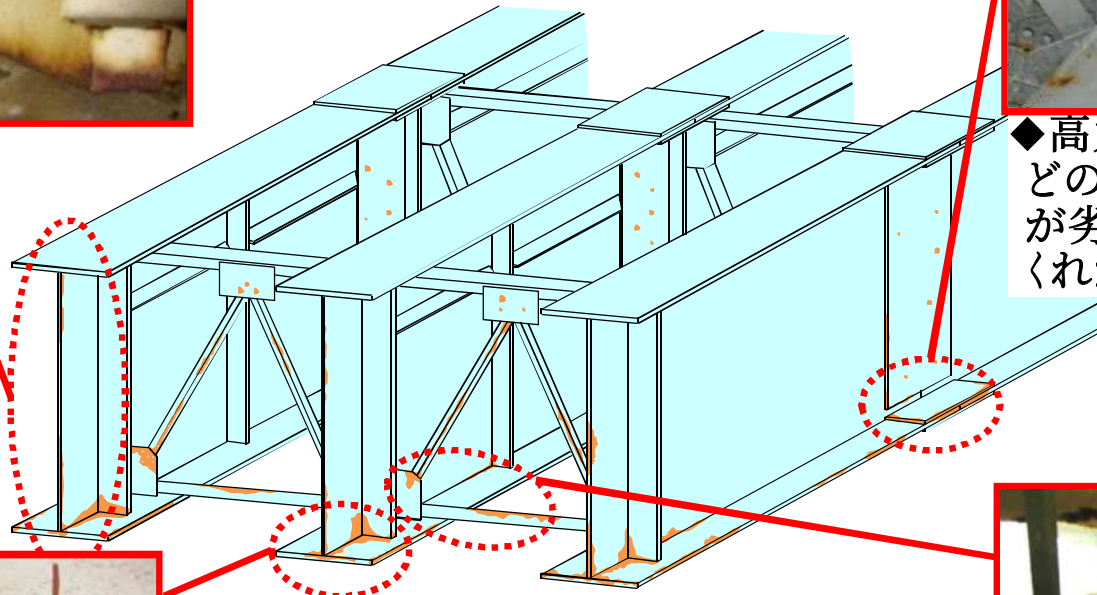
鋼鈑桁橋の腐食の進行(グレードII)



◆ウェブやフランジなどの角部やこば面の塗膜が劣化し、錆や塗膜のふくれが部分的に見られる。



◆高力ボルトや添接版などの角部やこば面の塗膜が劣化し、錆や塗膜のふくれが部分的に見られる。



◆砂塵などの堆積が見られ、下フランジや支点補剛材、ウェブの塗膜が劣化し、錆や塗膜のふくれが部分的に見られる。

◆二次部材は、部材角部などの錆や塗膜のふくれが早期に見られることがある。また、ガセットなどは砂塵がたまりやすい。



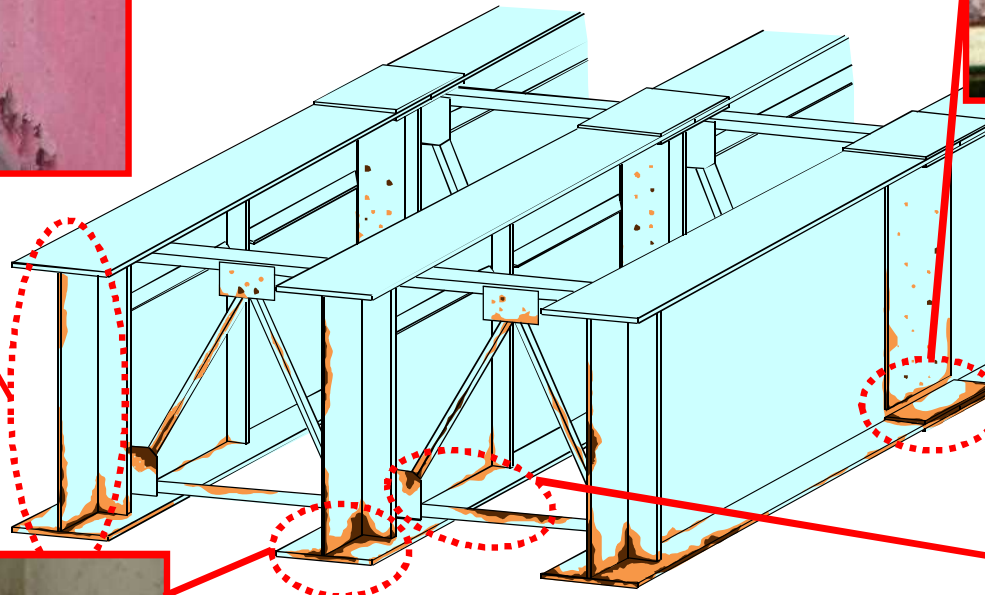
鋼鈑桁橋の腐食の進行(グレードIII)



◆フランジの角部, ウェブ下端やこば面の塗膜が劣化し, 塗膜のふくれや層状錆が部分的に見られる。



◆高力ボルトや添接版などの角部やこば面の塗膜が劣化し, 塗膜のふくれや層状錆が部分的に見られる。



◆砂塵などの堆積が見られ, 下フランジや支点補剛材, ウェブの塗膜が劣化し, 層状錆や塗膜のふくれが見られる。

◆ガセットや部材角部などに塗膜のふくれや層状錆が見られる。



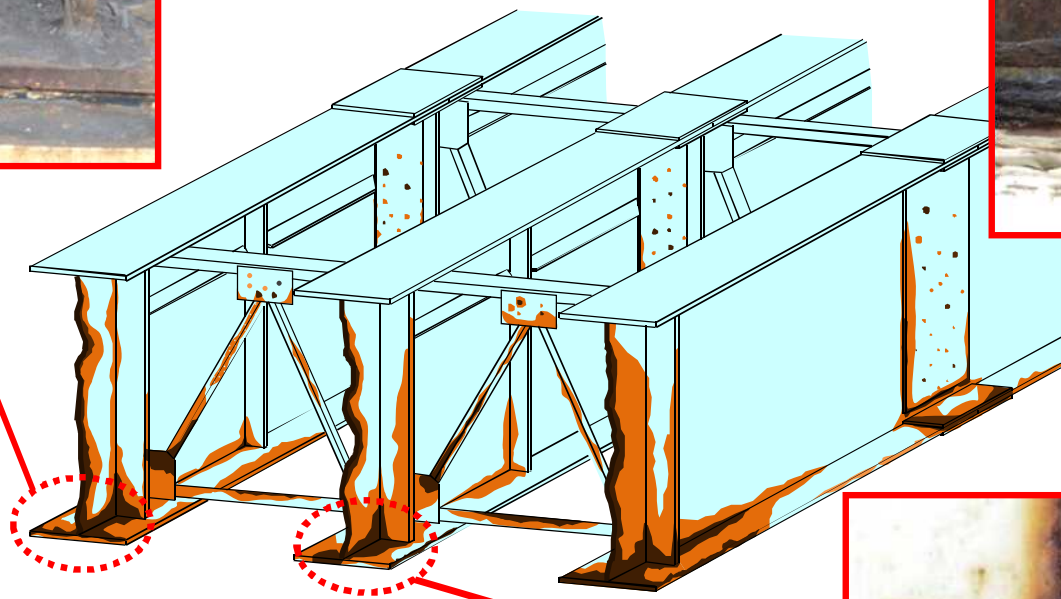
鋼鈑桁橋の腐食の進行(グレードIV)



◆桁端のウェブ下端に著しい断面欠損が生じている。



◆下フランジが腐食し、板厚が減少して著しい断面欠損が生じている。



◆桁端の下フランジに層状錆が著しく発生し、板厚が減少して断面欠損が生じている。



3.3 鋼構造の疲労

鋼部材の疲労

NEXCO

原因

外力 (交通荷重・風等) による鋼材の応力の繰返しによる。

現象

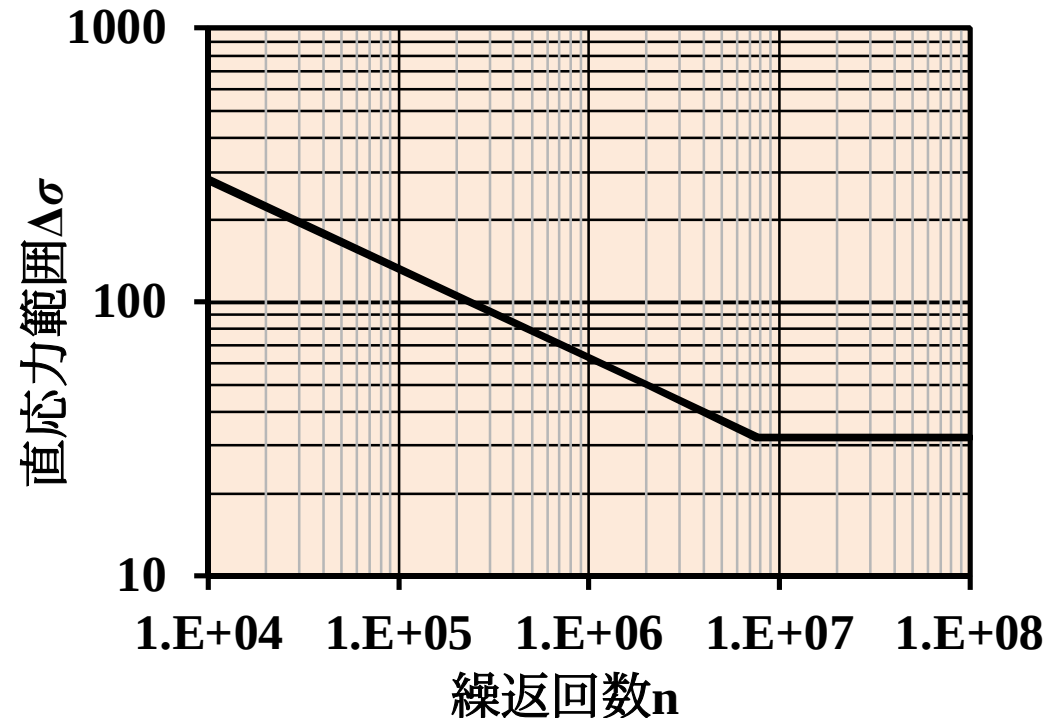
応力集中部から亀裂が発生し、発生部位によっては、進展すると脆性破壊を引き起こし、橋の安全性に重大な影響を与えるおそれがある。

小さな荷重でも、何百万回繰返し作用することにより、亀裂の発生につながる。

発生箇所

- ・構造的な応力集中部
- ・溶接形状や溶接欠陥等に起因する応力集中部

※道路橋示方書によるすみ肉溶接継手のまわし溶接部の疲労設計曲線 (G等級)



直応力を受ける継手の疲労設計曲線例※

疲労亀裂の発生要因

NEXCO

①疲労設計が考慮されていない場合（面内の一次応力等）

支承周辺のソールプレート前面溶接部や、主桁面外ガセット取付部などの応力集中により発生する亀裂である。既設鋼橋においては疲労設計が考慮されている場合は少なく、疲労強度の低い継手が使われている場合が多い。

②変位誘起等（面外の二次応力等）

対傾構や横構取付部などの接合部に発生する二次応力により発生する亀裂である。

③溶接欠陥

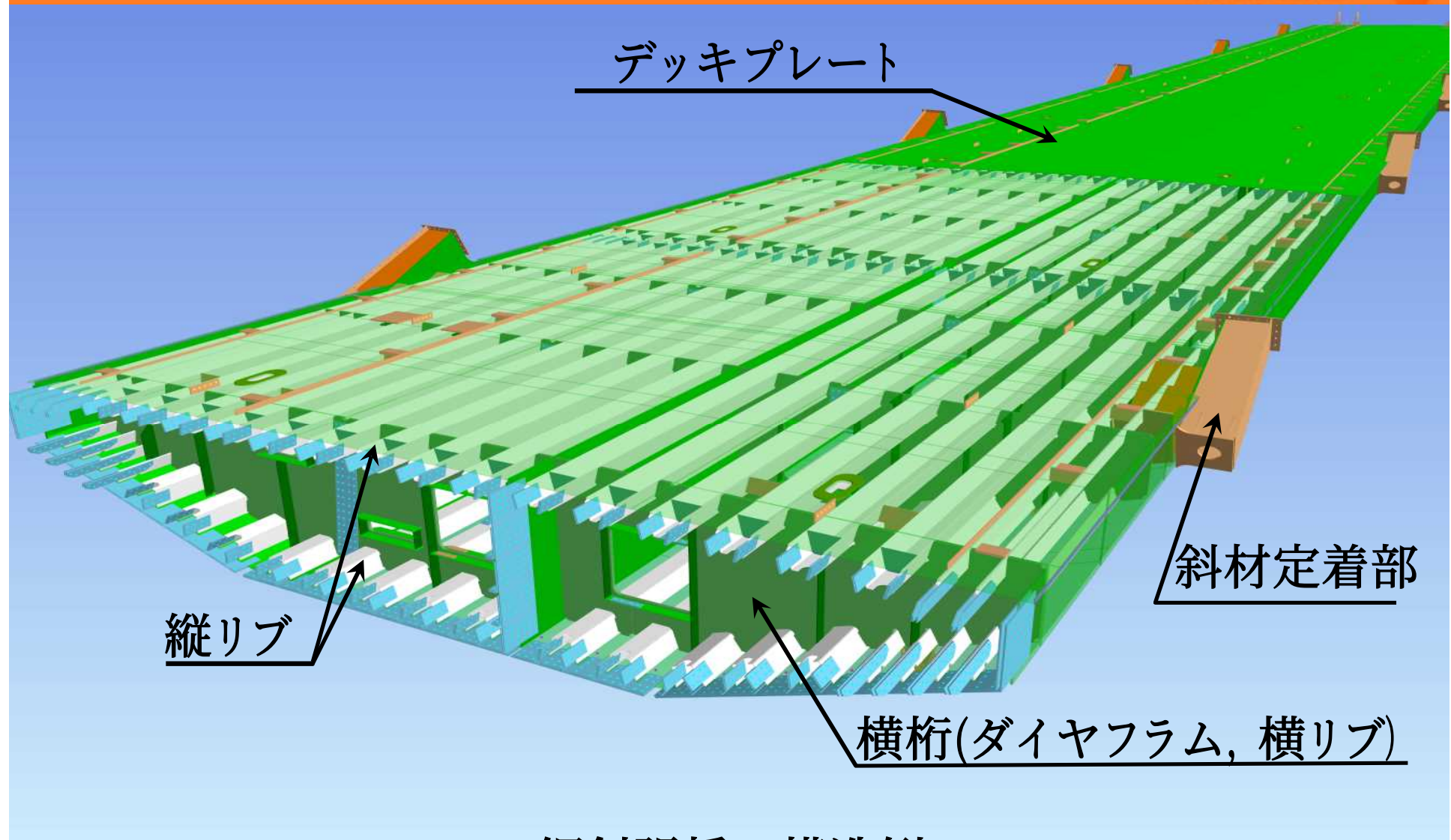
初期欠陥であり、施工管理の不備によるものである。主部材の溶接部などに溶接欠陥に起因する亀裂が発生した場合は、主部材の破断に至ることも想定されるため、注意が必要である。

④想定外の事象

活荷重による振動や、風荷重による振動等により発生する亀裂である。活荷重による振動は、トラス橋の横構などの剛性の低い部材で発生する可能性がある。風荷重による振動は、ランガー橋の吊材などで発生する可能性がある。

鋼床版箱桁構造

NEXCO



鋼斜張橋の構造例

疲労亀裂事例(鋼床版)

NEXCO

輪荷重の繰り返し ⇒ 鋼床版の亀裂

疲労亀裂



トラフリブ デッキプレート 横リブ

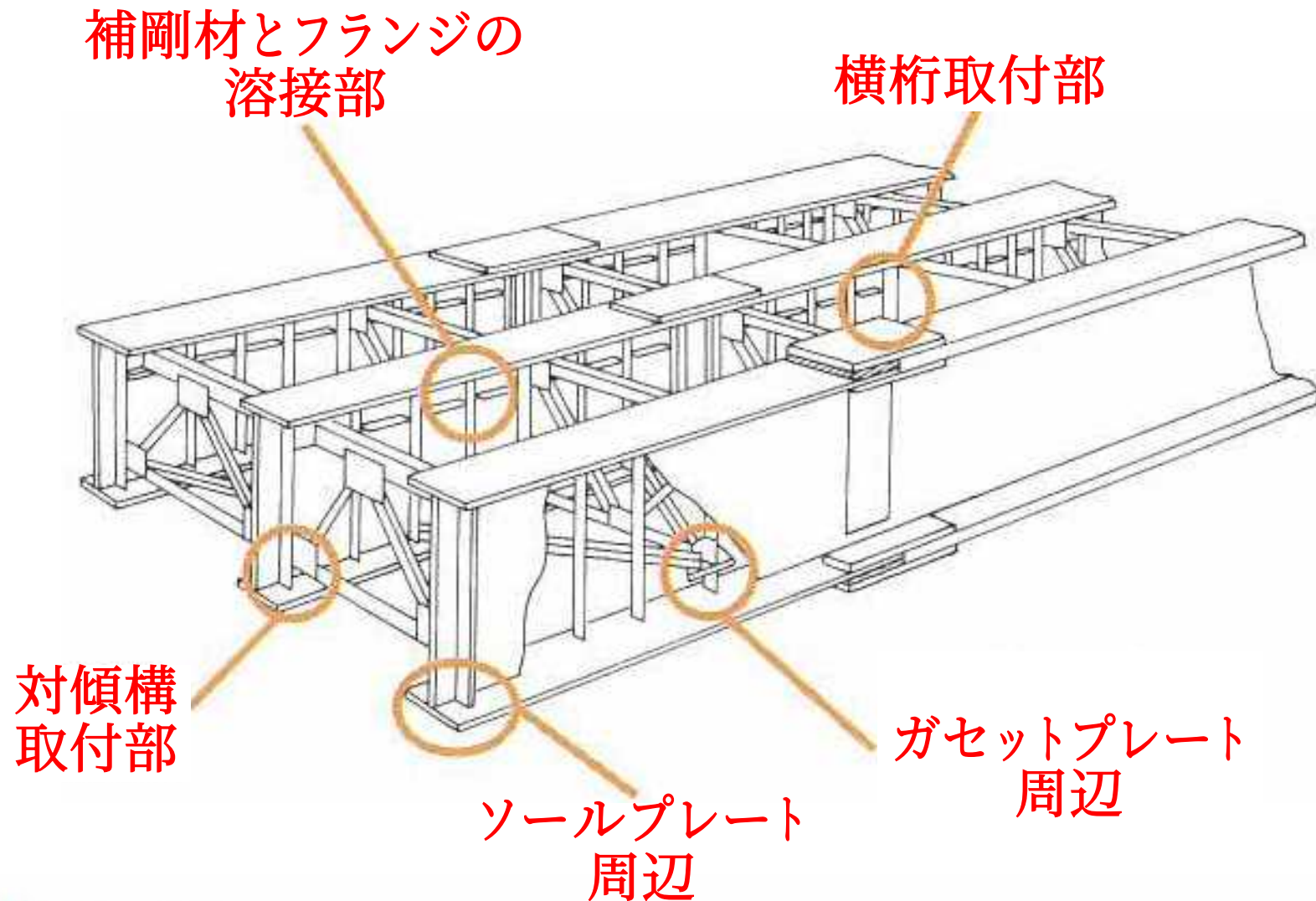
疲労亀裂
の進展



疲労亀裂

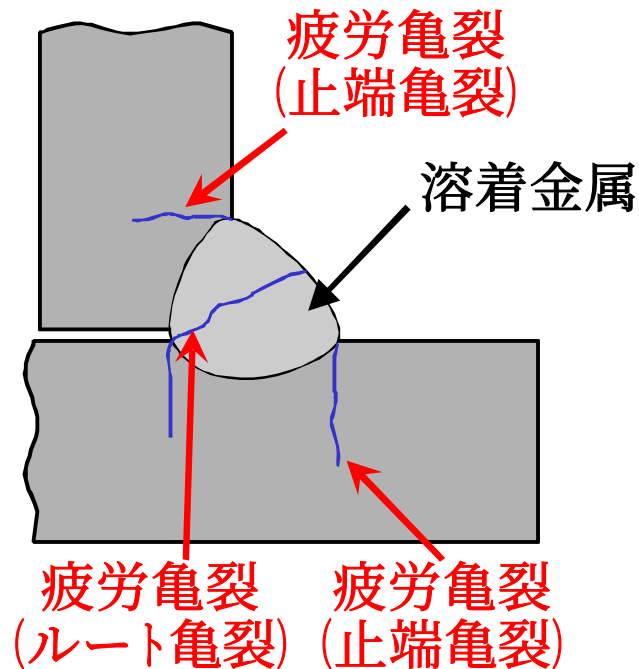


疲労亀裂が発生しやすい箇所 (鋼鈑桁)

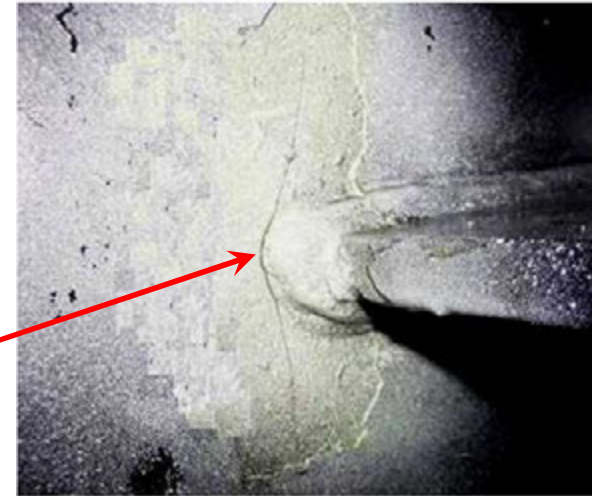


疲労亀裂発生形態(すみ肉溶接部)

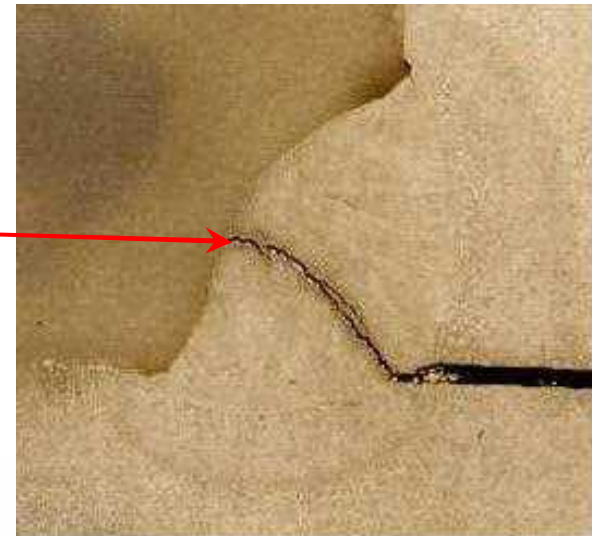
自動車荷重による応力振幅 ⇒ 溶接の亀裂
(すみ肉溶接部への応力集中)



疲労亀裂
(止端亀裂)



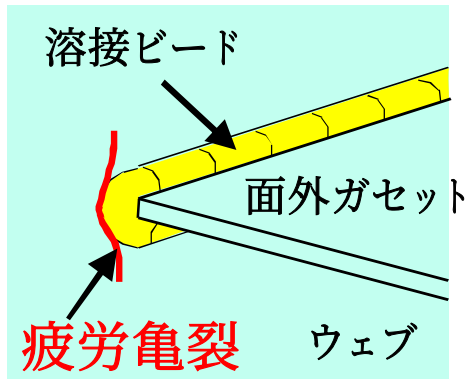
疲労亀裂
(ルート亀裂)



疲労亀裂の発生箇所(鋼鈑桁)

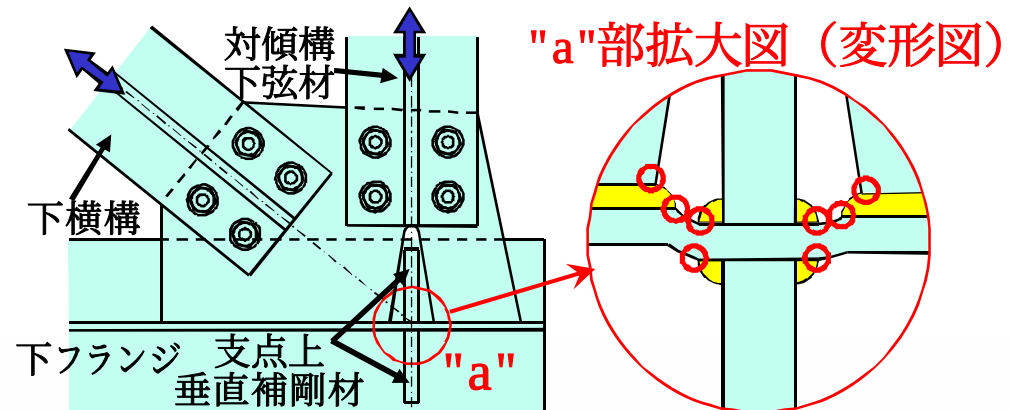
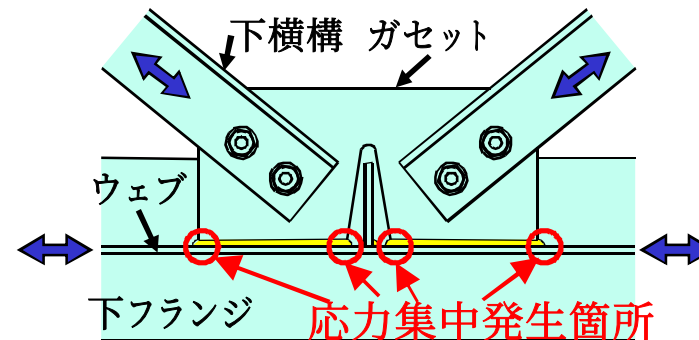
NEXCO

主桁面外ガセット取付部(G型亀裂)

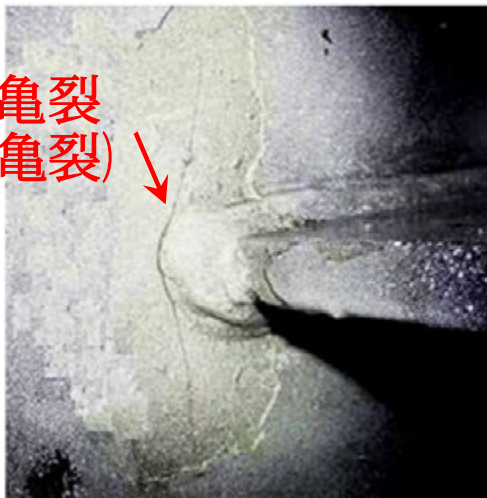


発生原因

- 横構の軸力変動や主桁の曲げ応力により生じる横構ガセット取付部の応力集中による。
- 端横構のガセット取付部では、支点上補剛材の溶接止端部にも応力集中が生じる。



疲労亀裂
(止端亀裂)



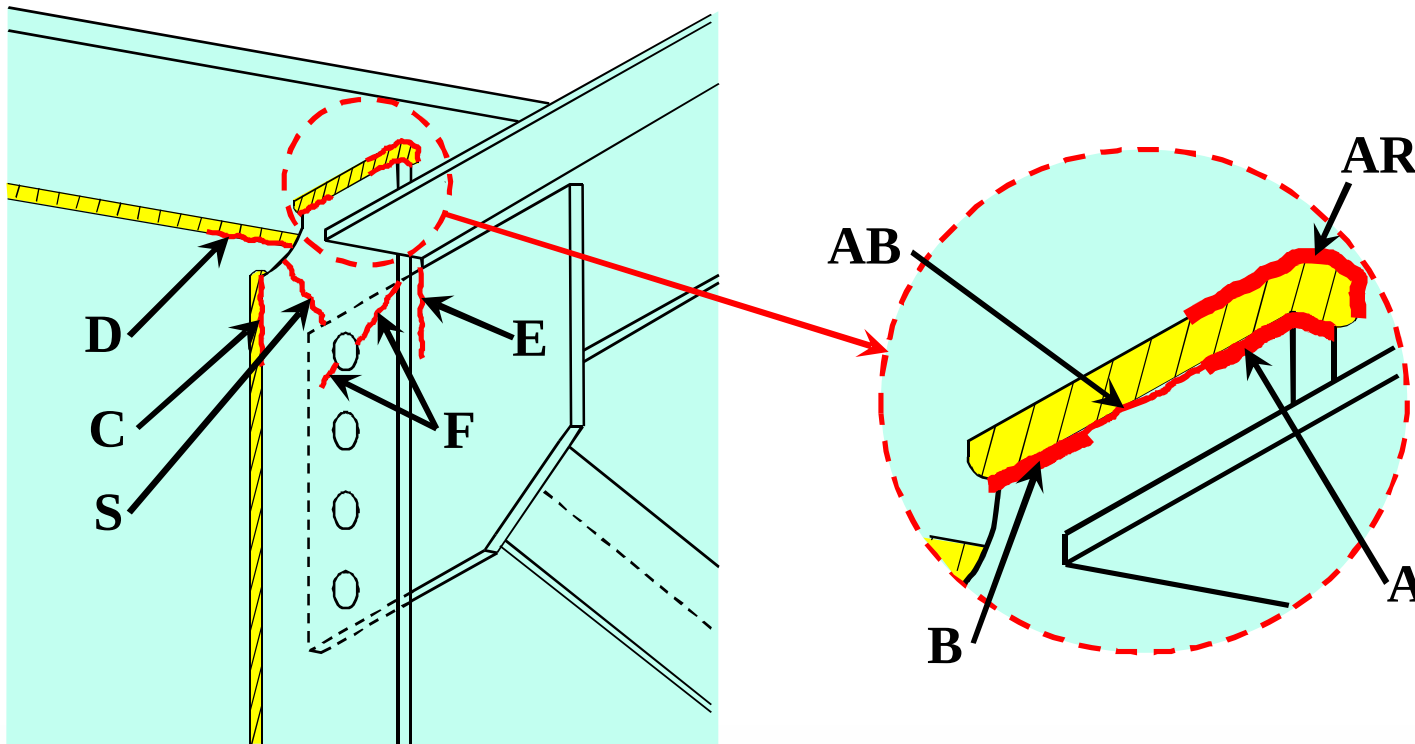
疲労亀裂の発生箇所(鋼鈑桁)

NEXCO

対傾構取付部(A,AR,B,AB,C,D,E,F,S型亀裂)

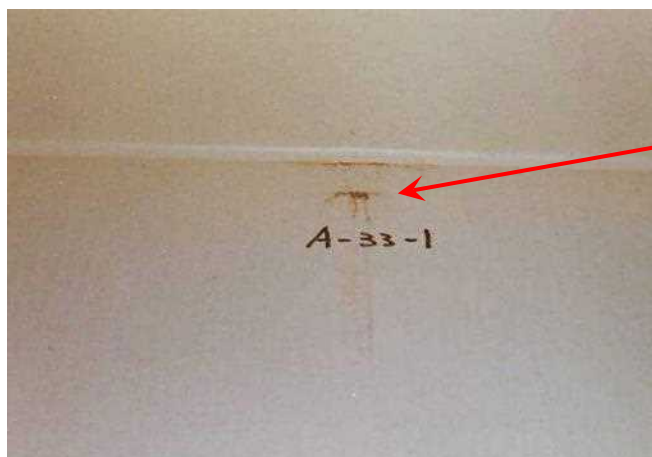
発生原因

- 対傾構や横桁取付け部には、主桁に作用する応力が分配されるため数に示すような溶接止端部やガセットプレート端部、スカラップ等に応力集中が生じる。



疲労亀裂事例(対傾構取付部)

NEXCO

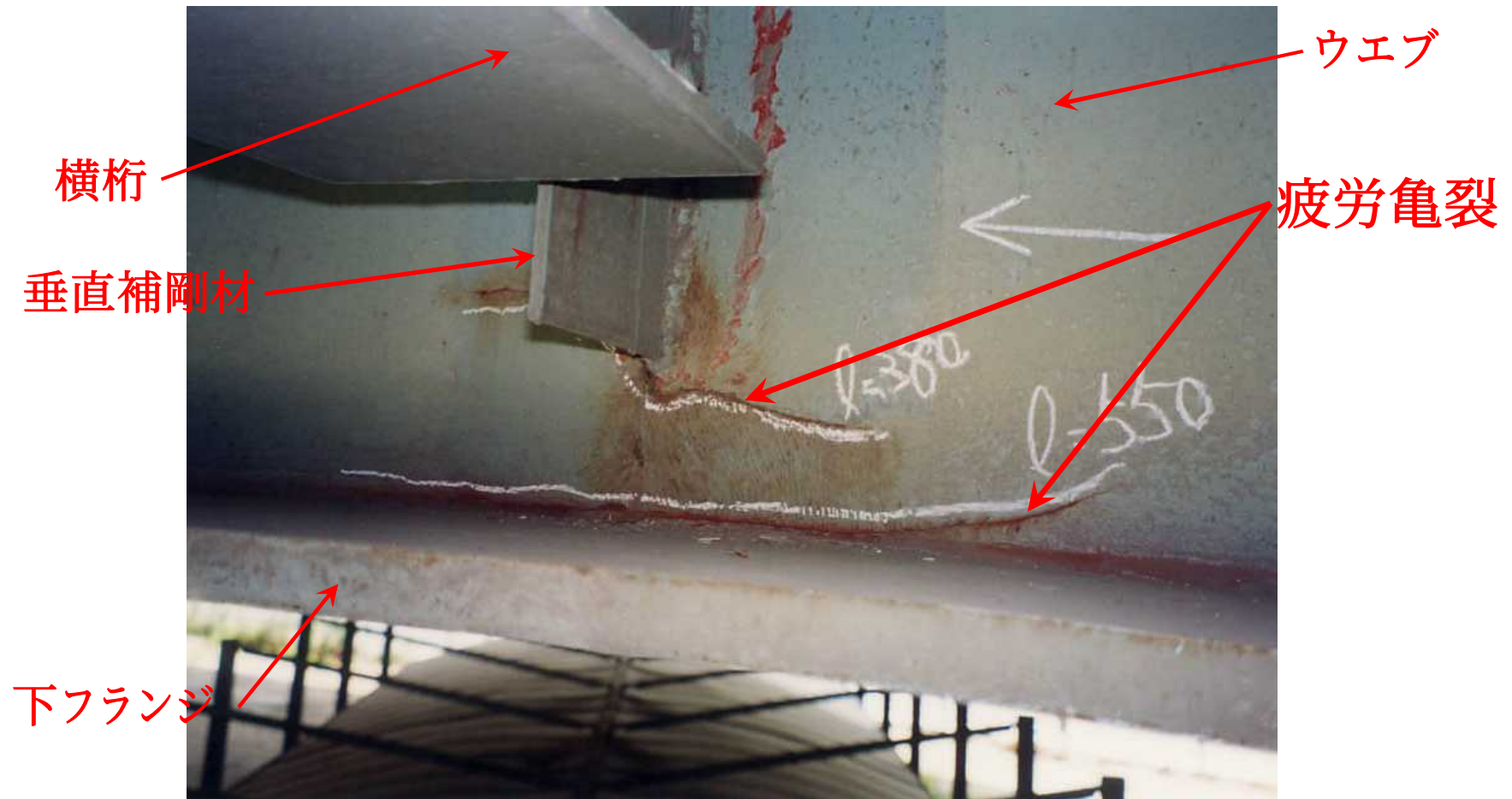


疲労亀裂
(ウェブ裏面に進展)



疲労亀裂事例(横桁取付部ウェブ)

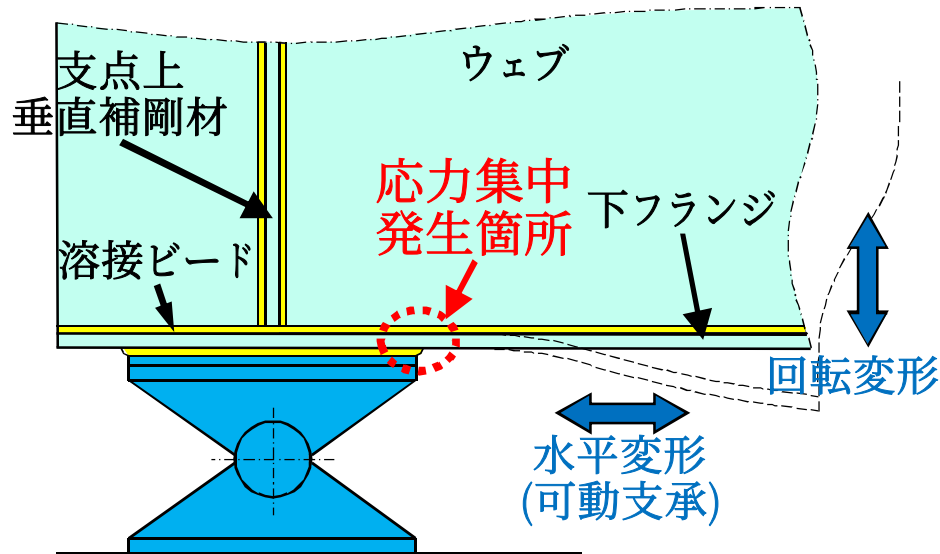
横桁取付け部鉛直補剛材とウェブの溶接部亀裂



疲労亀裂の発生箇所(鋼鈑桁)

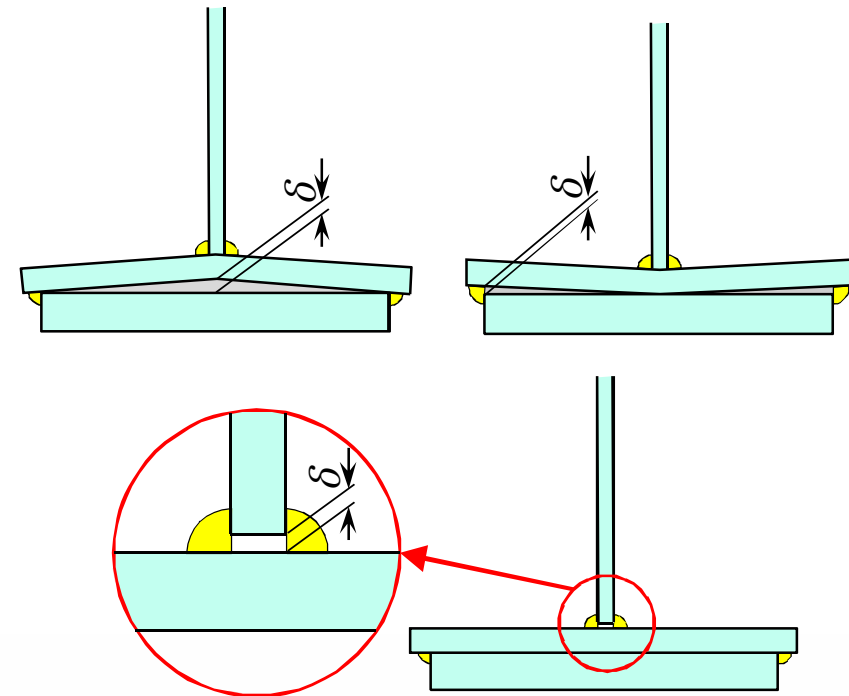
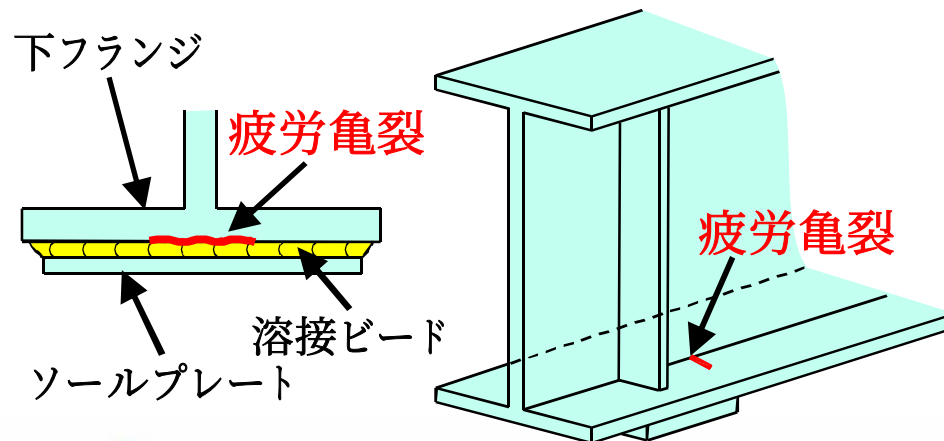
NEXCO

ソールプレート前面溶接部の亀裂 (SP型亀裂)



発生原因

- 支承の機能不全 (回転・水平)
- 剛性急変
- フランジ形状による密着不良
- 主桁フランジ・腹板間の密着不良



疲労亀裂事例(ソールプレート)

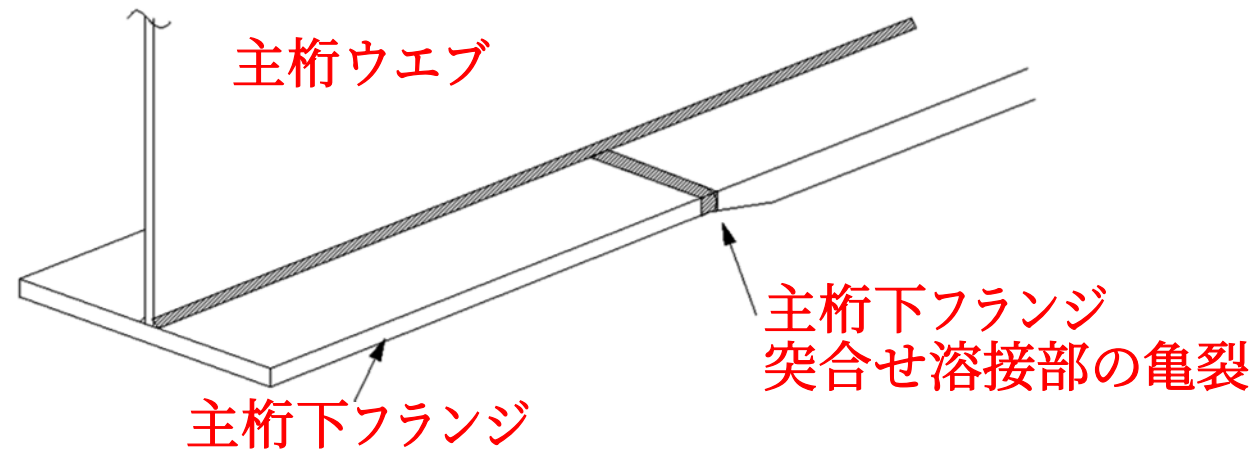
NEXCO

桁拘束による応力振幅 ⇒ 溶接部の亀裂
(支承機能の低下)



疲労亀裂事例(主桁フランジ突合せ溶接部)

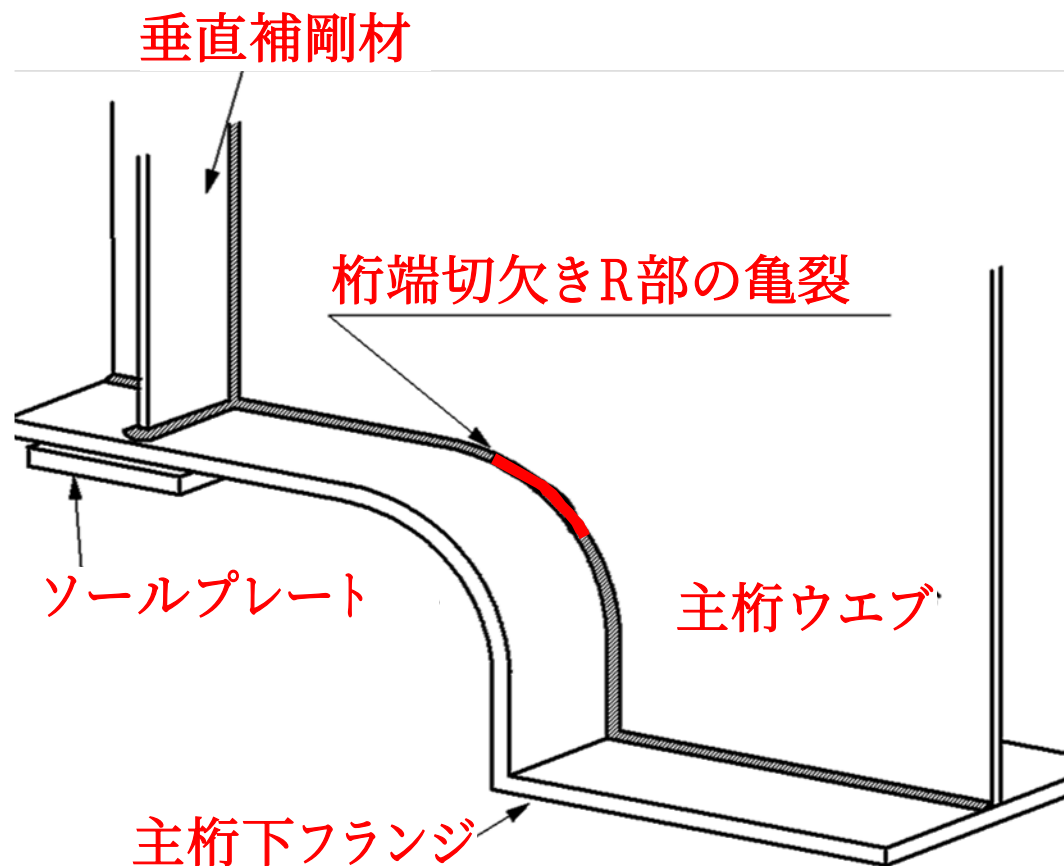
主桁下フランジの突合せ溶接部の疲労亀裂



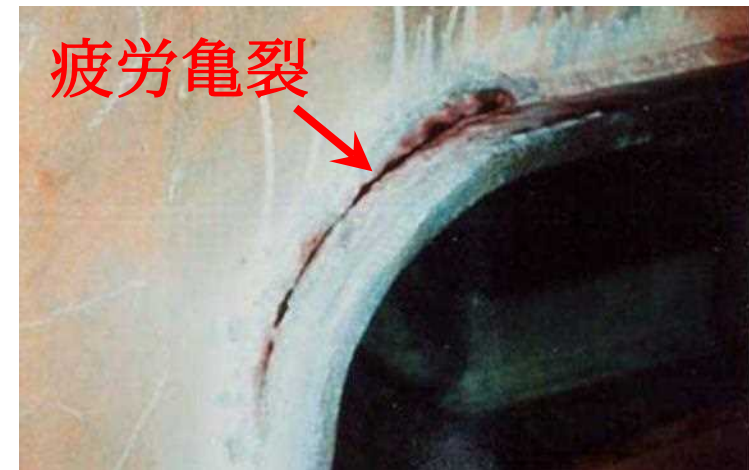
疲労亀裂事例(桁端切欠き部)

NEXCO

桁端切欠きR部の疲労亀裂

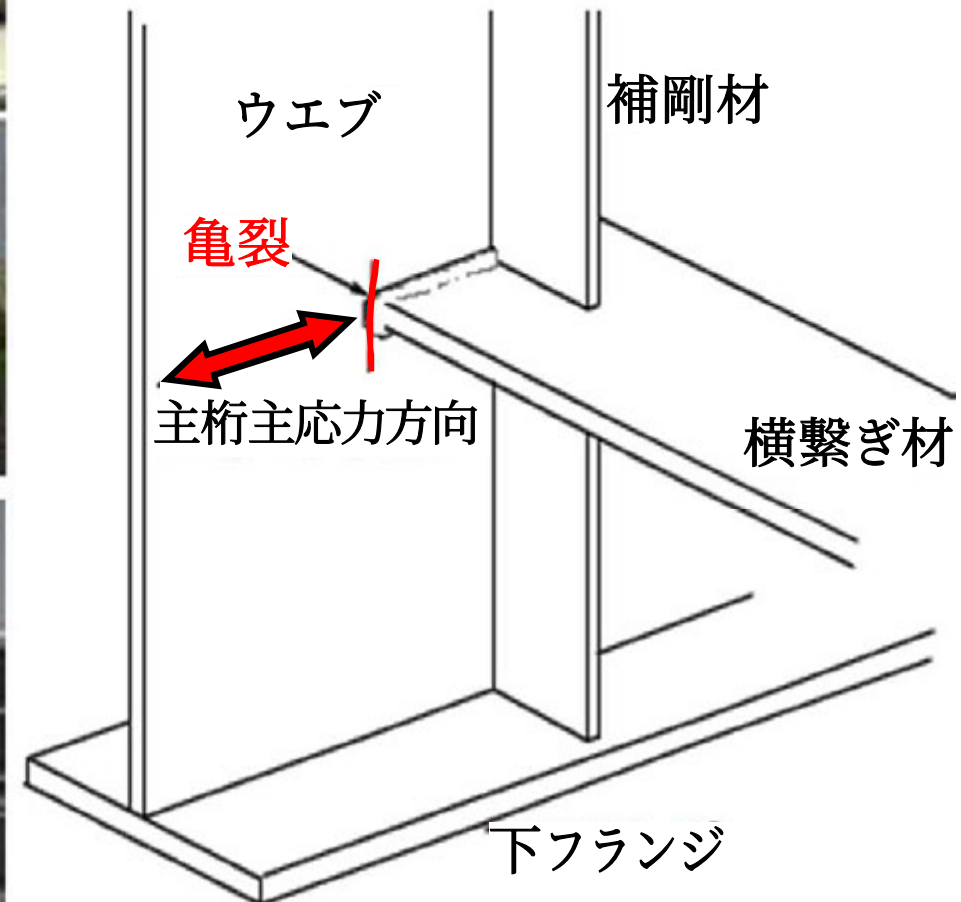
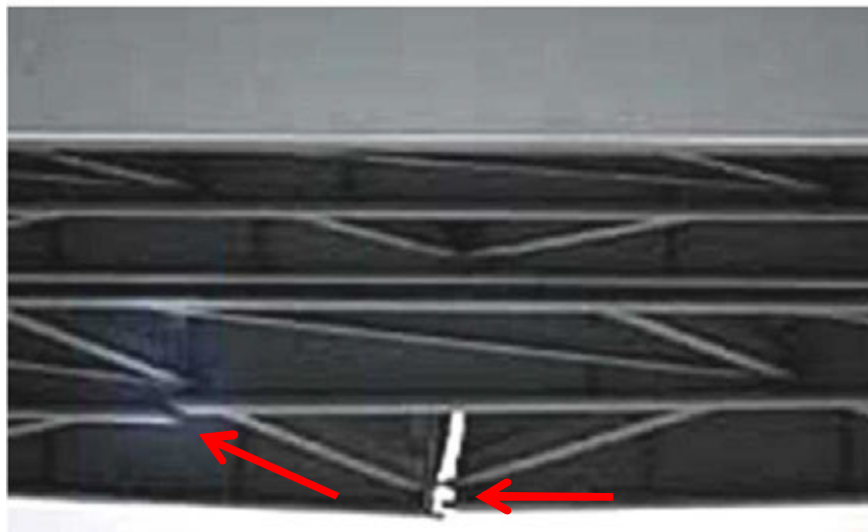


鋼桁切欠き部の疲労亀裂



箱桁切欠き部の疲労亀裂

疲労亀裂を要因として脆性破壊した事例



主桁取合部の疲労亀裂

疲労亀裂を要因として脆性破壊した事例



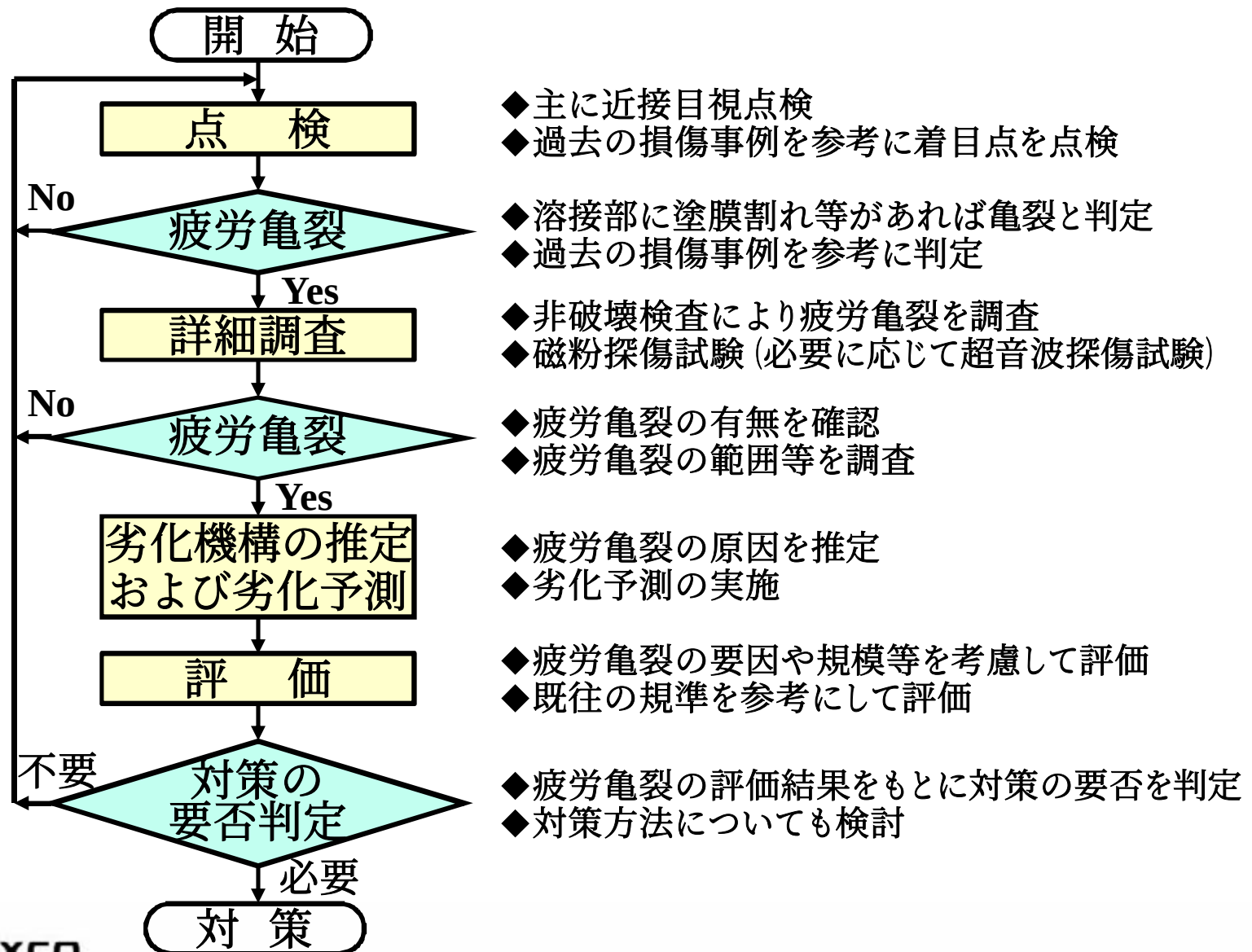
全 景



斜材溶接部を起点とする脆性破壊

疲労亀裂の診断の手順

NEXCO



疲労亀裂の評価基準例

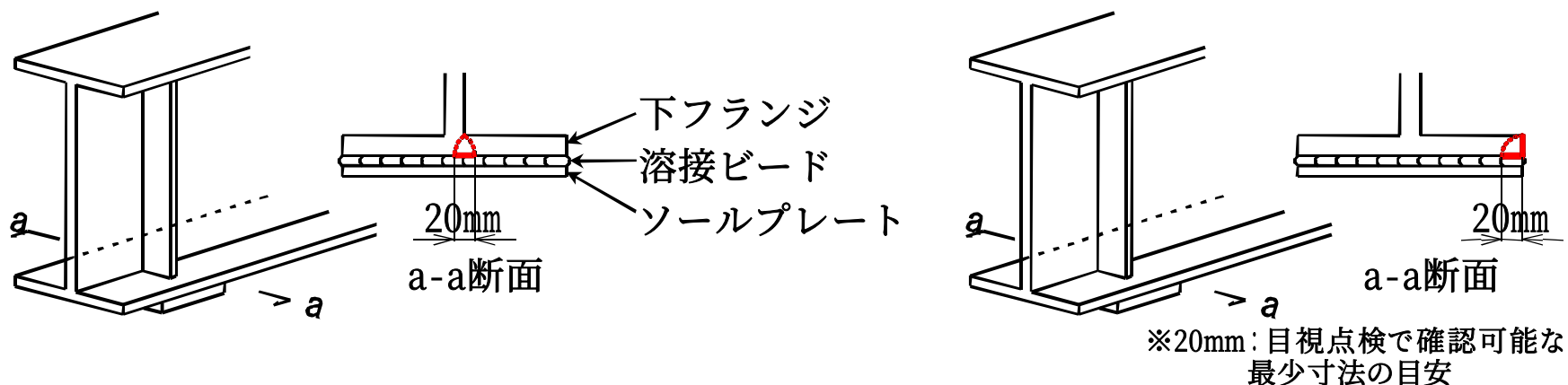
NEXCO

評価区分		一般的状況	鋼部材の疲労亀裂を対象とした状況
変状個所別の評価	AA	変状が著しく、機能面への影響が非常に高いと判断され、速やかな対策が必要な場合	- 主桁や縦桁等が破断に至るおそれがある大きな亀裂もしくは亀裂の疑いがある塗膜割れで、1次応力や溶接欠陥を要因とした損傷。 - 即時の損傷状況把握と、応急対策（緊急対応）を含めた対策手法検討が必要となるものを対象とする。 - また、損傷進展に伴い大規模補修が必要となる亀裂も含む。
	A1	変状があり、機能低下への影響が高いと判断される場合	- 主桁や縦桁に発生した亀裂もしくは亀裂の疑いがある塗膜割れで、1次応力や溶接欠陥を要因とした損傷。 - 即時に損傷状況を把握した上で、対策手法を検討する必要があるものを対象とする。 - 対傾構等が破断に至るおそれがある明らかな亀裂で、2次応力を要因としたもの。
	A2	変状があり、機能低下への影響が低いと判断される場合	2次応力により対傾構に発生した明らかな亀裂を対象とする。機能低下への影響は低いと判断されるが、損傷状況は即時に把握することと位置づける。
	B	変状はあるが、機能低下への影響は無く、損傷・変状の進行状態を継続的に観察する必要がある場合	2次応力等が原因で対傾構等に発生した、亀裂の疑いがある塗膜割れを対象とする。観察継続が対応方針となる。
	C	変状の状態（機能面への影響度合いなど）に関する判定を行うために、調査を実施する必要がある場合	—
	OK	変状がないか、もしくは軽微な場合	

SP型亀裂の評価事例

NEXCO

①溶接止端部を起点として下フランジに進展する場合



判定	判定の標準
AA	ソールプレート前面溶接部に亀裂の疑いがある塗膜割れが発生している場合。
A1	—
A2	—
B	—

※ソールプレート前面溶接部の亀裂は、進展すれば主桁の破断に至るため特に注意が必要である。また、点検時には、ソールプレート前面溶接部のみでなく、主桁下フランジや同一支承線上の他の主桁に関しても着目する必要がある。

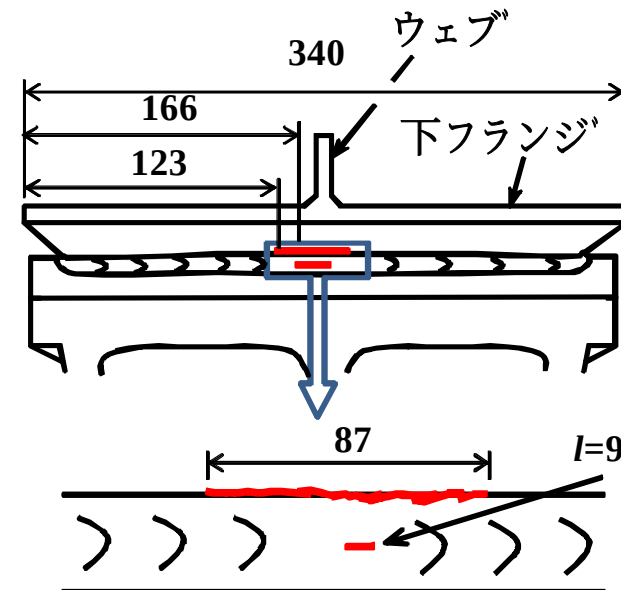
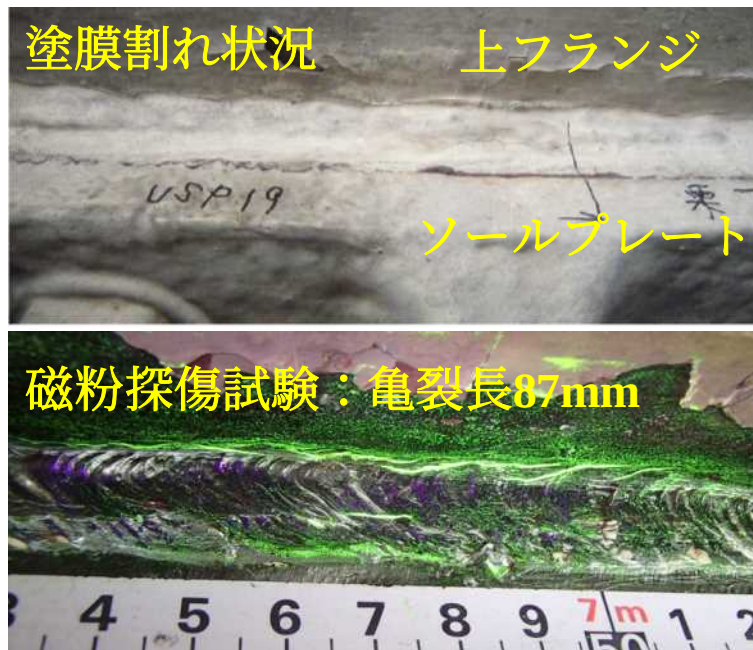
S P型亀裂の評価事例

NEXCO

①溶接止端部を起点として下フランジに進展する場合

損傷判定: AA

詳細調査における磁粉探傷試験により、主桁下フランジとソールプレート前面溶接部、下フランジ側の溶接止端部に亀裂を検出したもの。主桁下フランジの上面とウェブの溶接部付近に亀裂は表出していない。削り込みによるアンダーカットの除去(亀裂残存有無)や亀裂進展方向の確認、超音波探傷試験による下フランジ板厚方向への進展状況確認などの更なる詳細調査の実施が必要であると考えられる事例。



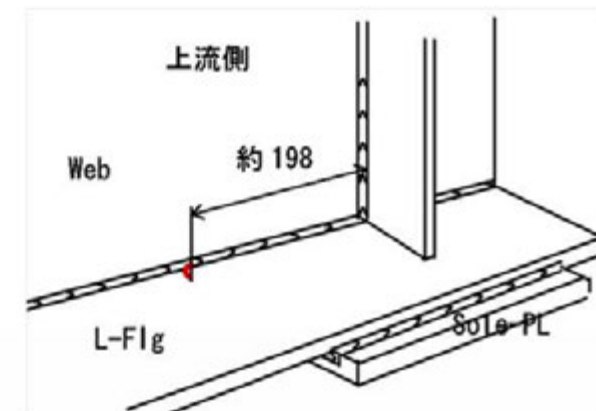
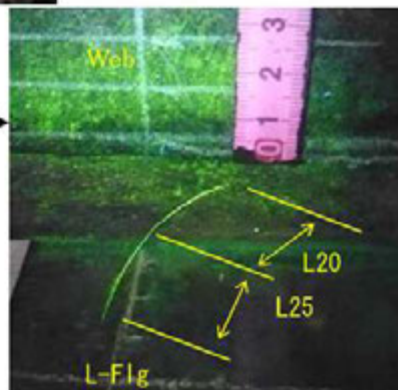
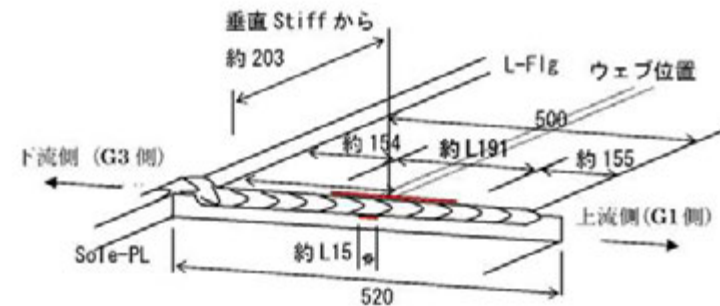
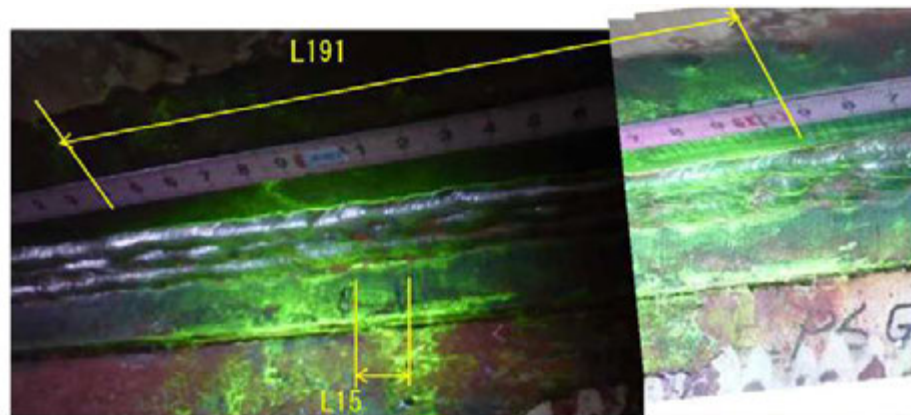
S P型亀裂の評価事例

NEXCO

①溶接止端部を起点として下フランジに進展する場合

損傷判定: AA

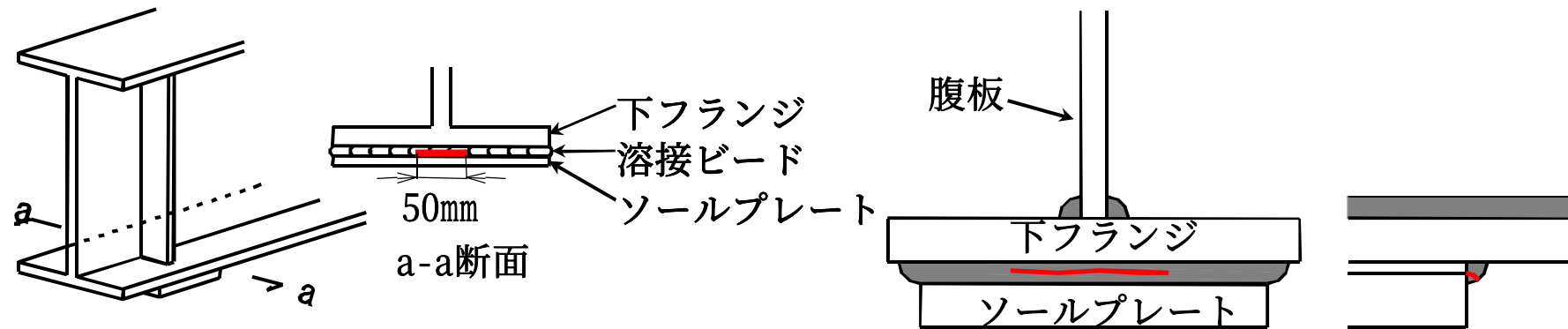
1次詳細調査における磁粉探傷試験により亀裂発生が確認された。ソールプレート前面溶接部から主桁下フランジの板厚方向へ亀裂が進展し、下フランジを貫通、上面に亀裂が表出している。亀裂進展の遅延を目的としたストップホールを設置した後、ソールプレートの取替えおよび主桁ウェブ・下フランジへの当て板補強を実施した事例。



SP型亀裂の評価事例

NEXCO

②溶接ルート部を起点として溶接ビードののど断面に進展する場合



判 定	判 定 の 標 準
AA	ソールプレート前面溶接部ビードに50mm以上の亀裂の疑いがある塗膜割れが発生している場合
A1	ソールプレート前面溶接部ビードに50mm未満の亀裂の疑いがある塗膜割れが発生している場合。
A2	—
B	—

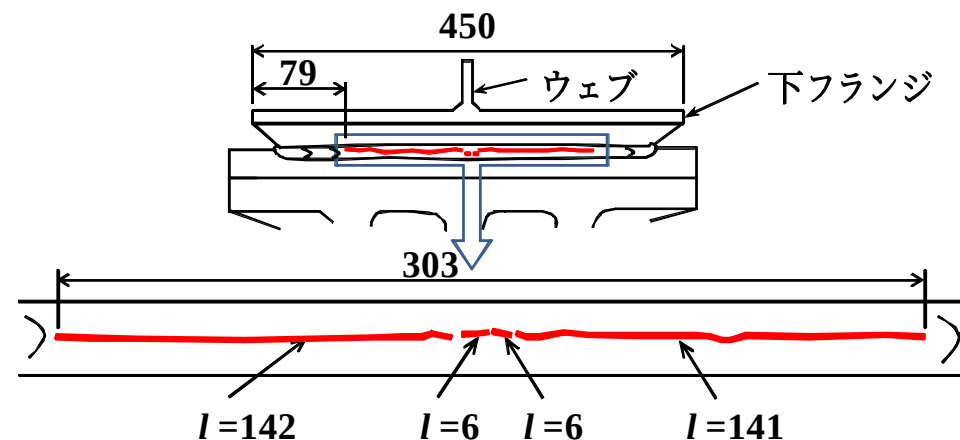
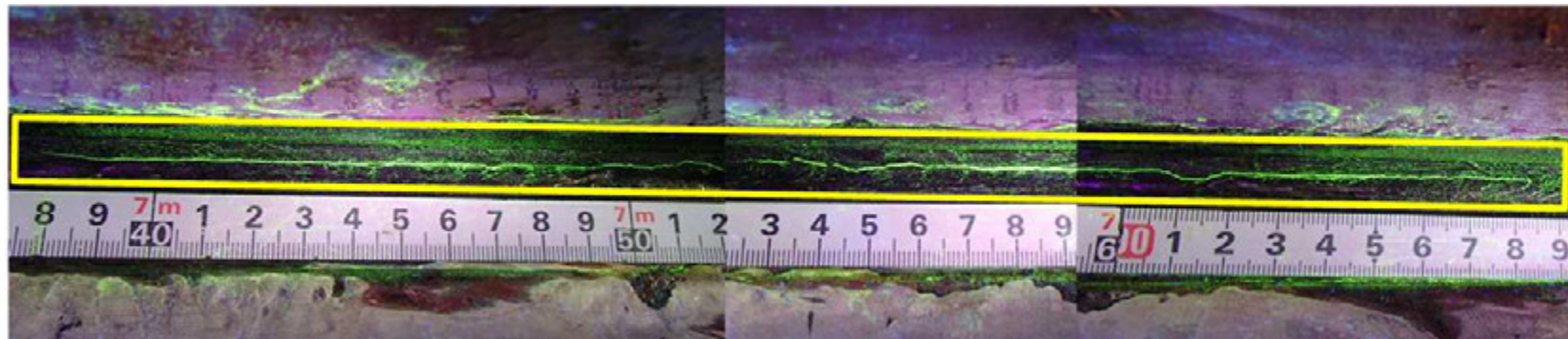
※溶接ルート部を起点とした亀裂は、溶接ビードののど断面のみに進展するケースが多いが、下フランジへ進展している場合も想定される。ソールプレート前面溶接部に50mm程度の亀裂が発生すれば、下フランジを貫通している恐れがあるので、それをAA判定とA1判定の判断基準とした。

S P型亀裂の評価事例

NEXCO

②溶接ルート部を起点として溶接ビードののど断面に進展する場合 損傷判定: AA

詳細調査における磁粉探傷試験により、主桁下フランジとソールプレートの溶接部前面、溶接ビード上に亀裂を検出した事例。亀裂が溶接ビードの表面的なものである場合、削り込みにより消滅する可能性がある。

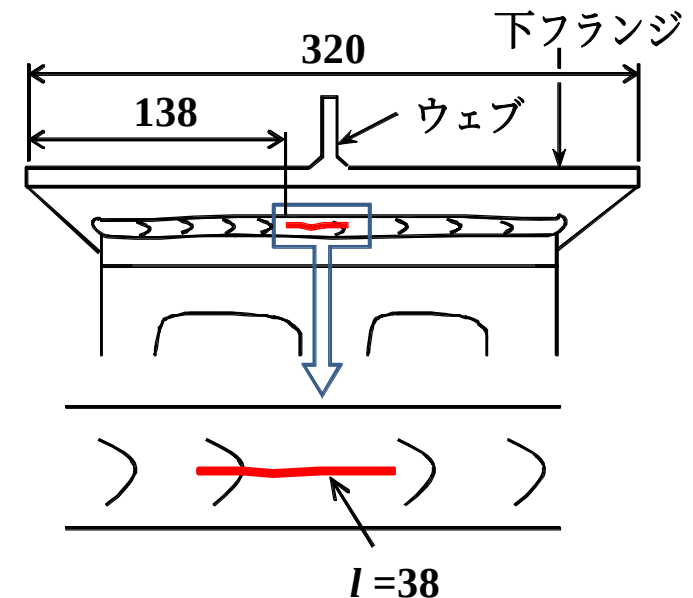
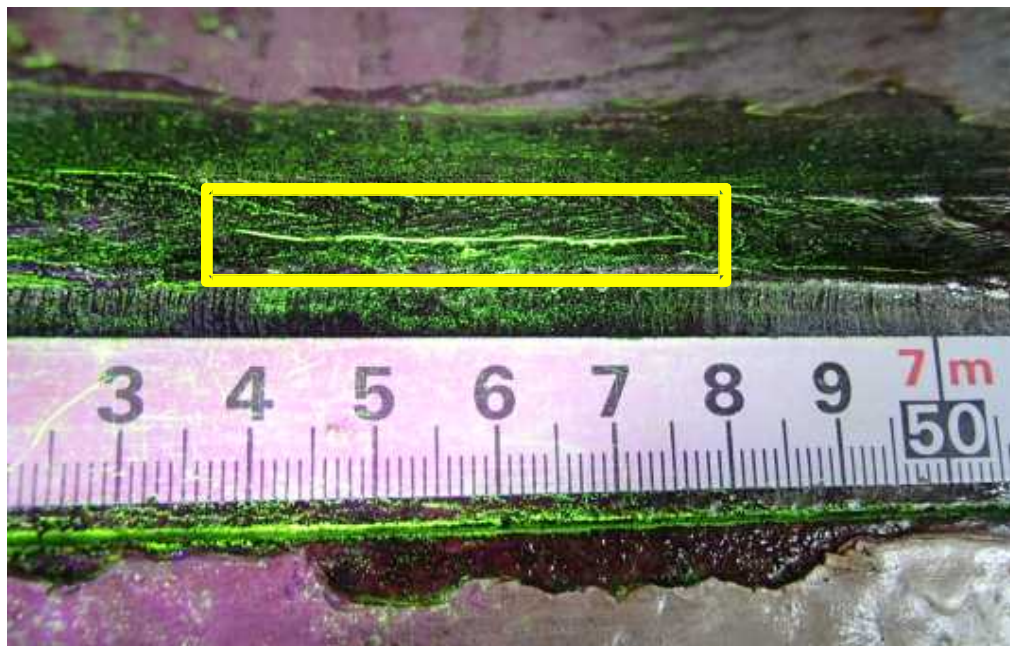


S P型亀裂の評価事例

NEXCO

②溶接ルート部を起点として溶接ビードののど断面に進展する場合 損傷判定:A1

詳細調査における磁粉探傷試験により、主桁下フランジとソールプレートの溶接部前面、溶接ビード上に亀裂を検出した事例。亀裂が溶接ビードの表面的なものである場合、削り込みにより消滅する可能性がある。

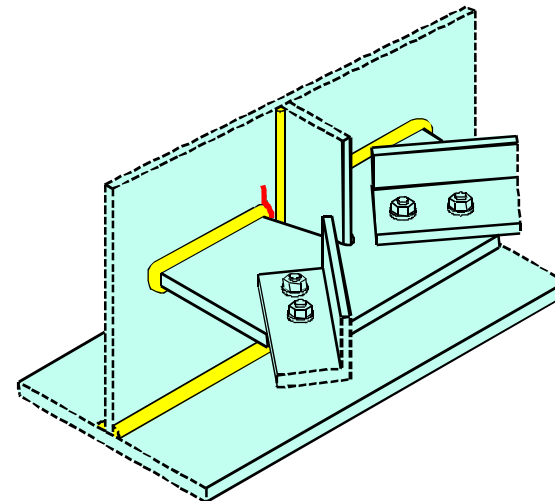
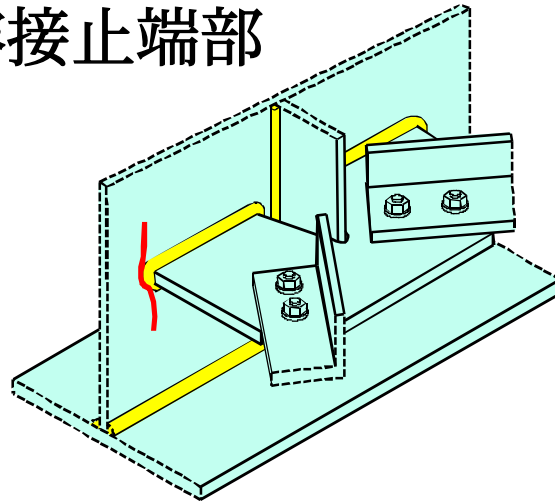


G型亀裂の進展①

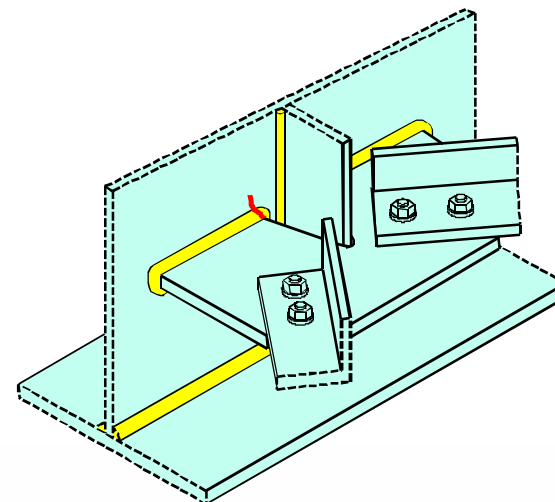
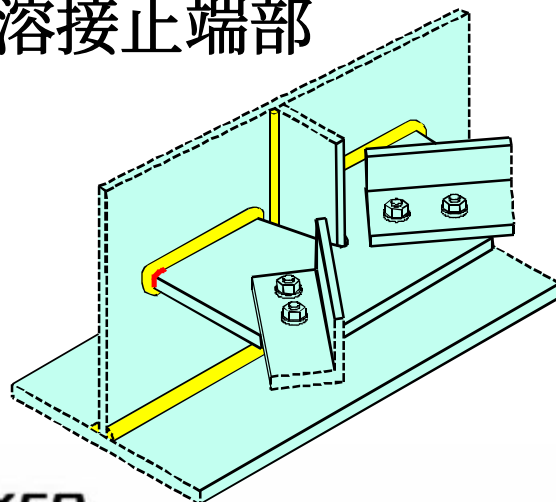
NEXCO

a. 中間横構ガセットの亀裂

ウェブ側溶接止端部



ガセット側溶接止端部

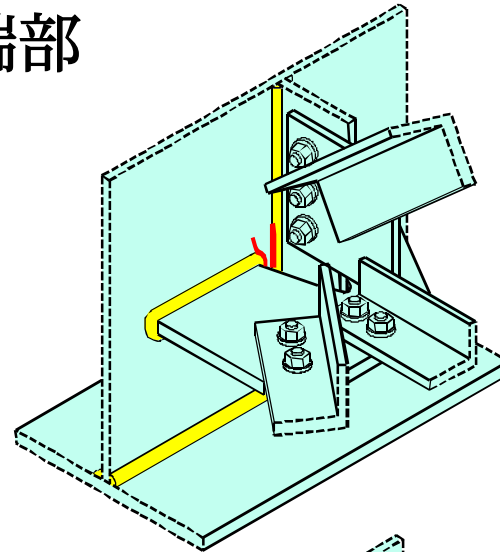


G型亀裂の進展②

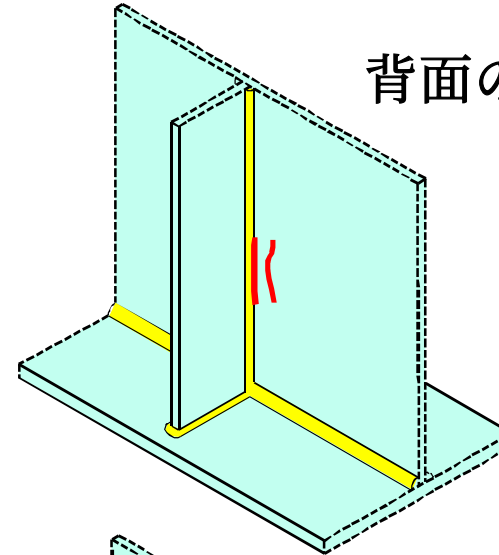
NEXCO

b. 端横構ガセットの亀裂

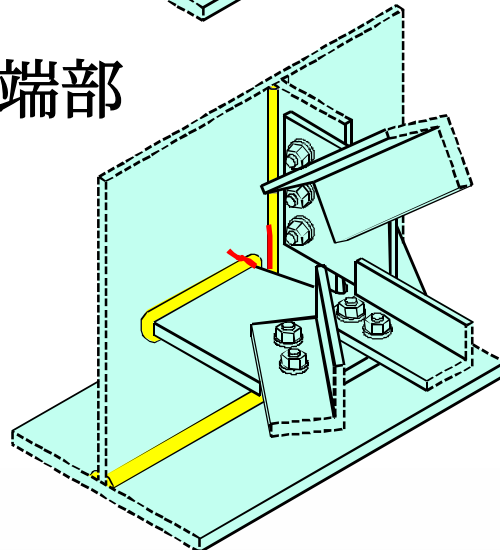
ウェブ側溶接止端部



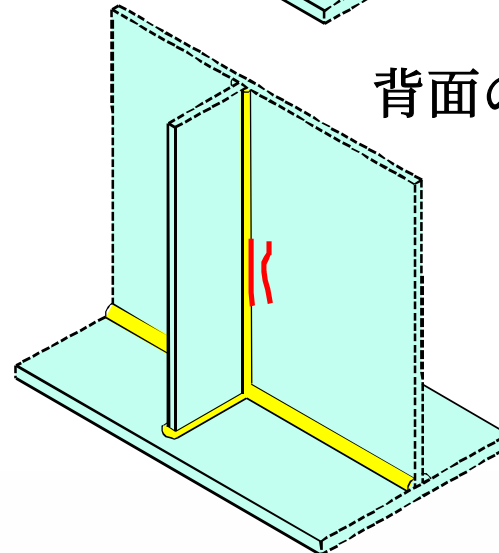
背面の状態



ガセット側溶接止端部



背面の状態



鋼部材の疲労亀裂の特徴

NEXCO

疲労亀裂は、点検が可能か？

疲労亀裂の発生箇所の予測

- 平成14年の道路橋示方書から疲労設計が導入されたので、それ以前に設計された重交通路線は亀裂発生の可能性がある。
- 桁端部で支承が機能不全となったソールプレート溶接部は、亀裂発生の可能性が増大する。
- 対傾構や横桁および下横構の主桁取付箇所の溶接部は、亀裂発生の可能性が増大する。

点検方法

- 前述の箇所を重点的に点検することにより、効率的な点検が可能となる。
- 亀裂の予測箇所で塗膜割れを発見した場合は、磁粉探傷試験などで、亀裂の有無及び程度を速やかに調査する。

鋼部材の疲労亀裂の特徴

NEXCO

疲労亀裂は、速やかな対策が必要か？

速やかな対策が必要な疲労亀裂

- 1次部材 (主桁等) を破断する方向に発生する亀裂は、速やかな対策が必要となる。

SP型亀裂: ソールプレート溶接部から発生する亀裂で主桁を破断する。

G型亀裂: 下横構主桁ガセットおよび横桁溶接部から発生する亀裂で、主桁を破断する。

その他: アーチ橋垂直材取付け部などに発生する亀裂で、アーチリブや補剛桁等の1次部材を破断する。

- 鋼床版のデッキプレートを破断する方向に発生する亀裂は、走行安全性の確保のため速やかな対策が必要となる。

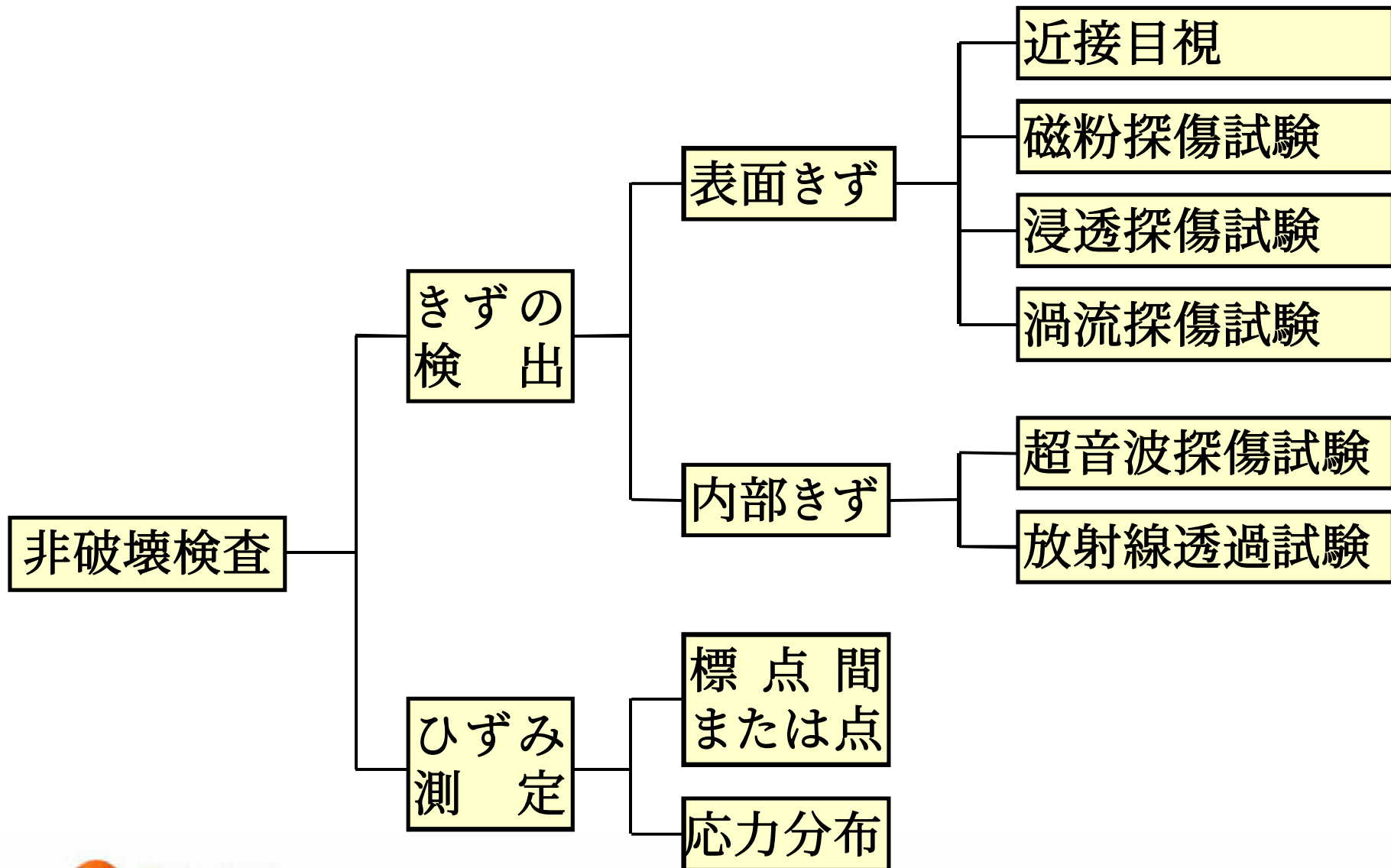
その他の疲労亀裂

- 対傾構取付箇所の溶接部から発生する亀裂などは、緊急性はないが計画的に補修することが望ましい。

3.4 鋼構造の非破壊検査方法

非破壊検査の分類

NEXCO



きずの非破壊検査方法

NEXCO

一般に下表の4種類の試験が実施されている。

種 類	長 所	短 所
磁粉探傷試験 (MT : Magnetic Particle Testing) JIS G 0565	①表面きずの形状および寸法の測定精度に優れる。 ②微細なきずの長さを測定するのに有効である。	①内部きずは検出できない。 ②塗膜を除去する必要がある。 ③表面の凹凸が著しい場合には結果の判定を誤りやすい(アンダーカット、ビード波目)。
浸透探傷試験 (PT : Penetrant Testing) JIS Z 2343	①表面に現れたきずの検出に適している。 ②電源の供給を必要とせず、他の探傷試験と比べて用意する機器が少なく、簡便な方法である。	①塗膜を除去する必要がある。 ②内部きずは検出できない。 ③小さなきずの検出は、浸透液が十分浸込むことができないため、困難。 ④表面の凹凸が著しい場合には結果の判定を誤りやすい(アンダーカット、ビード波目)。
渦流探傷試験 (ET : Eddy Current Testing) JIS G 0568	①表面に現れたきずの検出に適している。 ②塗膜上からの検査が可能。 ③検査時間が短い。	①内部きずは検出できない。 ②正確な寸法測定はできない。 ③検査精度が探傷技術者の経験や能力に左右される。
超音波探傷試験 (UT: Ultrasonic Testing) JIS Z 3060	①溶接部の内部きずの検査が可能である。	①きずの位置、大きさによって検出精度のばらつきが大きい。 ②検査精度が探傷技術者の経験や能力に左右される。

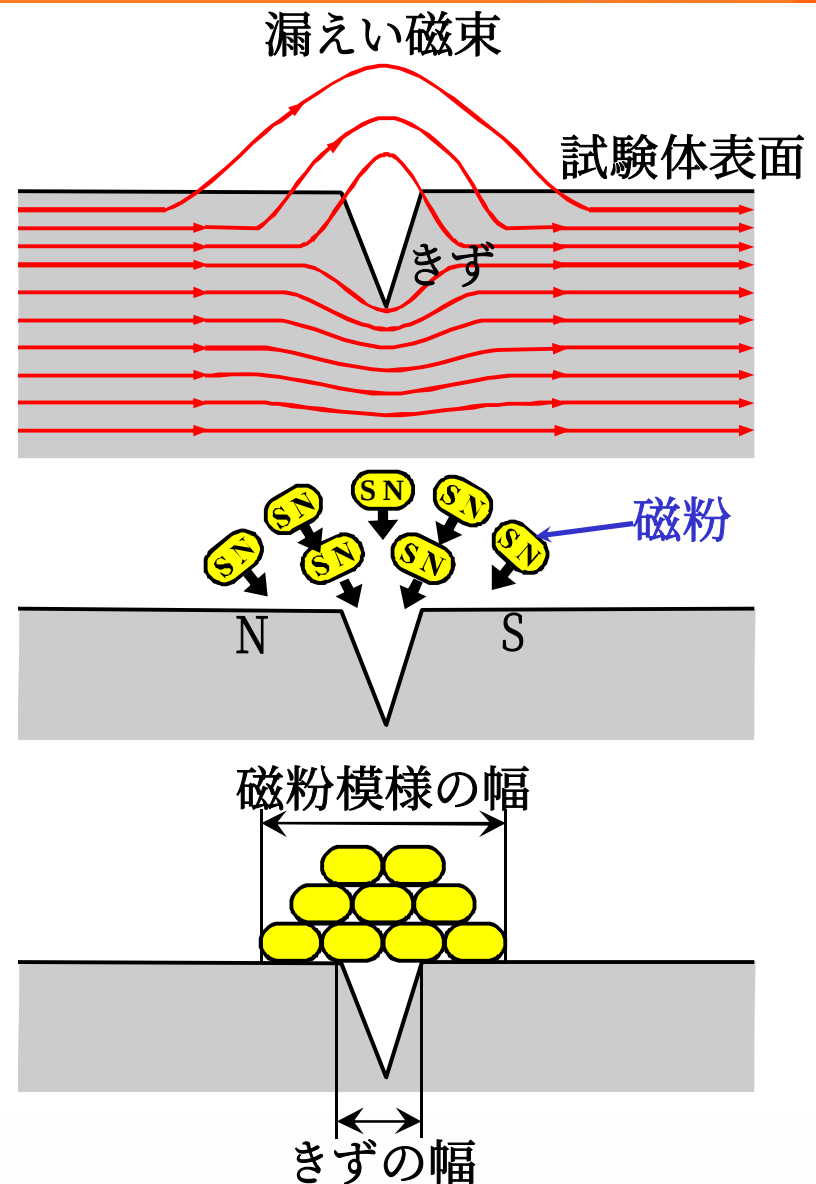
磁粉探傷試験

原理

強磁性体が磁化されると、材料内部には磁束が発生する。きずが存在すると、磁束の流れが遮られることになり、多くの磁束がきず部を迂回し、強磁性体の表層部の磁束はきずの近傍で空間に漏洩する。

きずがある強磁性体中を左から右方向に磁束が流れるときずの漏洩磁束が生じる。磁束が空間に出るところにはN極が、磁束が強磁性体中に入るところにはS極が形成され、この磁石の強さはきずの漏洩磁束が多いほど強くなる。

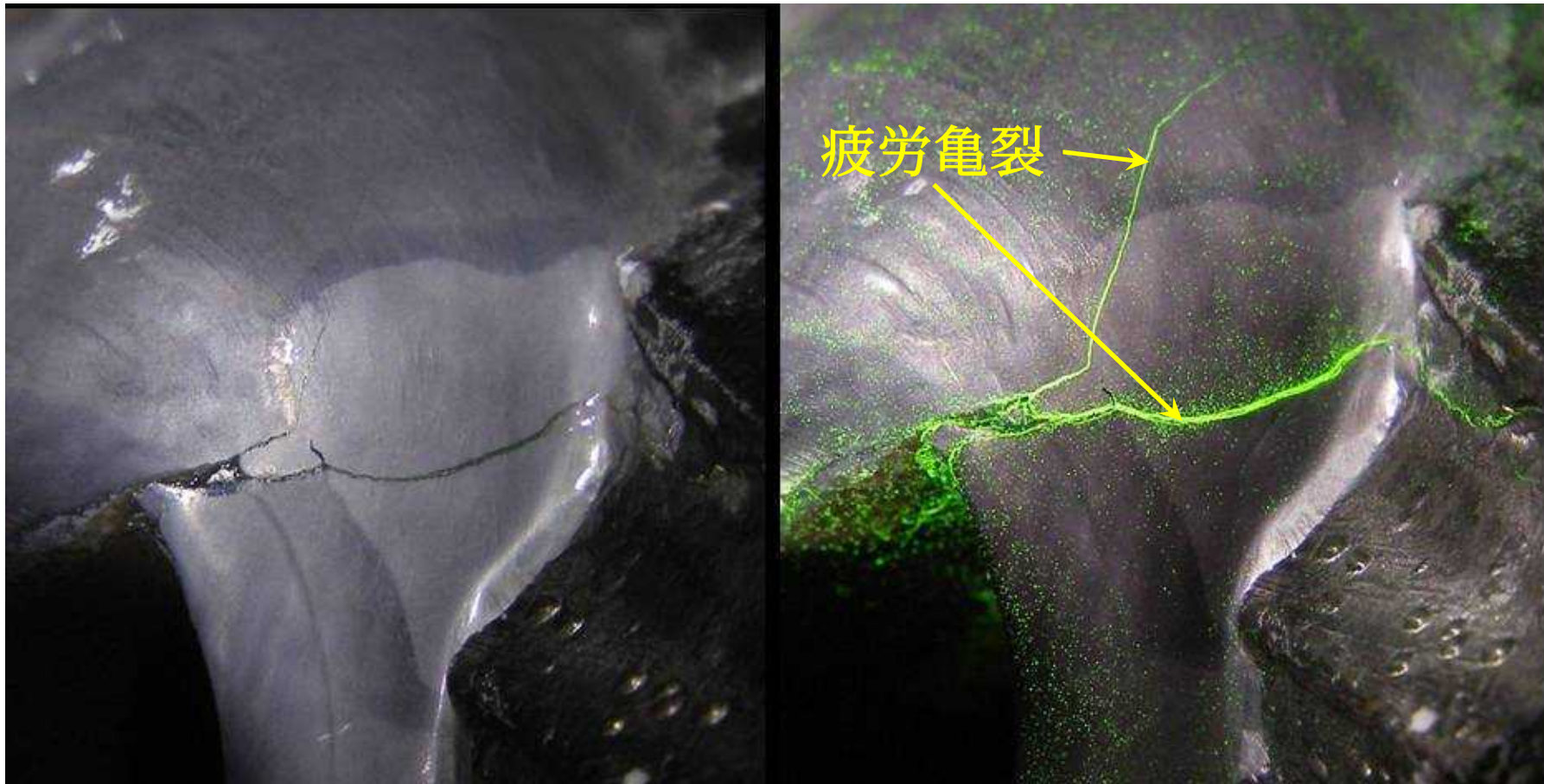
このようなところに磁粉を散布すると、磁粉は磁化されて両端に磁極をもった小さな磁石となり、磁粉同士が繋がってきず部に凝集・吸着し、磁粉模様ができる。



磁粉探傷試験

NEXCO

蛍光磁粉を用いた試験例



トラフリブ溶接部のルートから溶接部外面と
デッキプレート上面の両方向に進展する疲労亀裂例

浸透探傷試験

NEXCO

①試験前

きずの中には、ゴミ、油脂類などが詰まっている。

②前処理

きずの中のごみ等を洗浄剤で除去する。

③浸透処理

浸透液をきずの中に浸透させる。

④除去処理

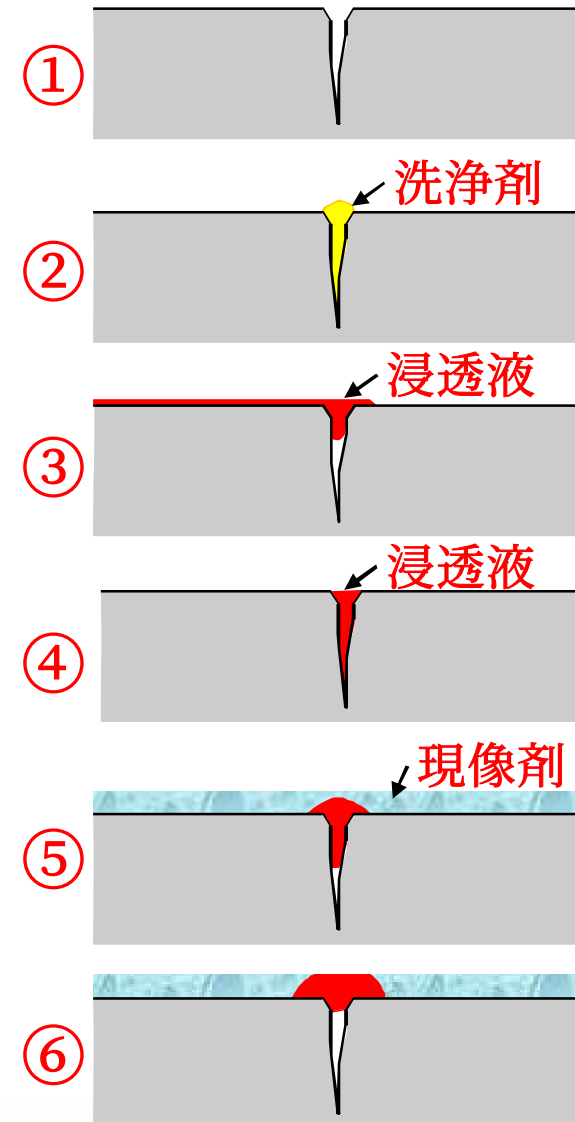
鋼材表面の余剰な浸透液を除去する。

⑤現像処理

現像剤により表面に指示模様を形成させる。

⑥観察

指示模様の有無及び形状を観察する。

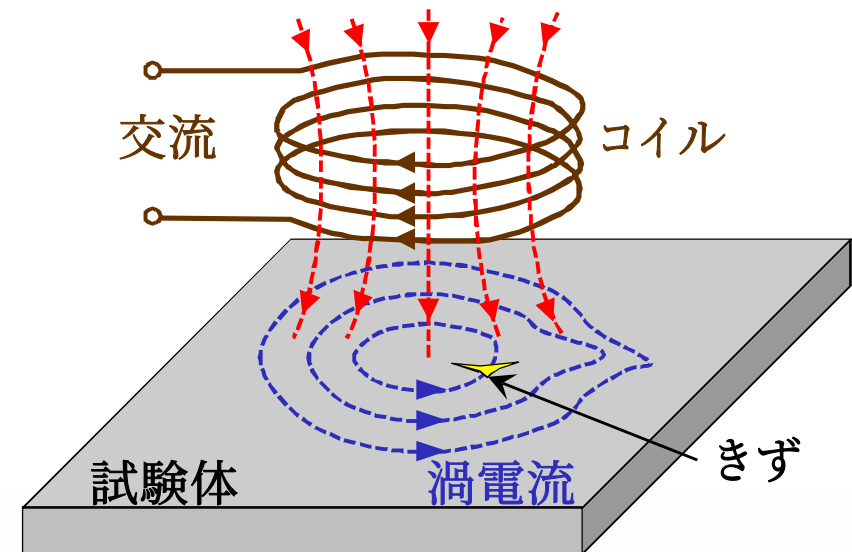
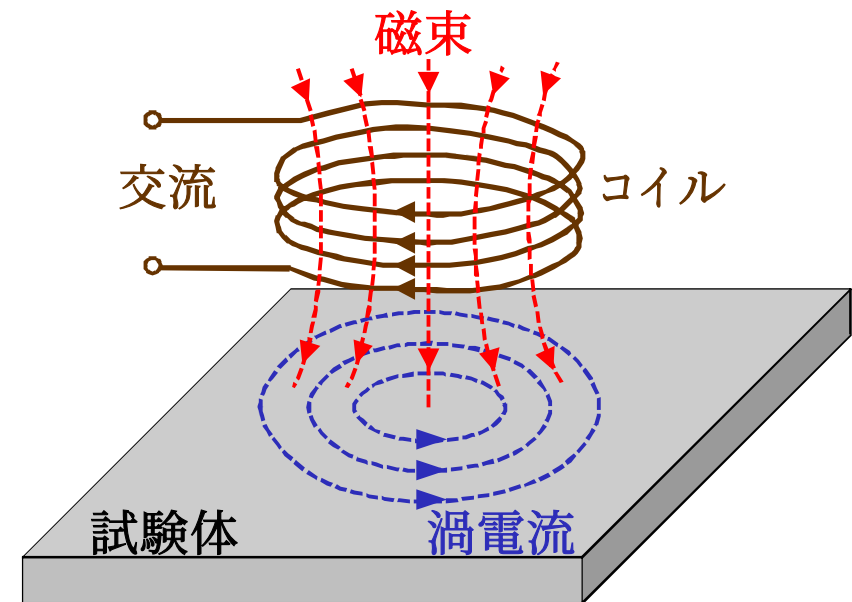


渦流探傷試験

NEXCO

①交流を流したコイルを導体に近づけると、電磁誘導による起電力のために、導体内には円形電流が誘導される。この誘導電流を渦電流という。渦電流はコイルの交流磁束を打ち消すような磁束を発生する性質があるため、渦電流が流れると、コイルが発生した交流磁束は打ち消されて小さくなる。

②導体の表面に割れなどの不連続があると、渦電流の流れが変わるため、コイルにおける磁束が変わり、コイルのインピーダンスが変わることになる。したがって、コイルの起電力の変化から、金属の表面におけるきずを検出できる。



携帯式渦流探傷装置

NEXCO

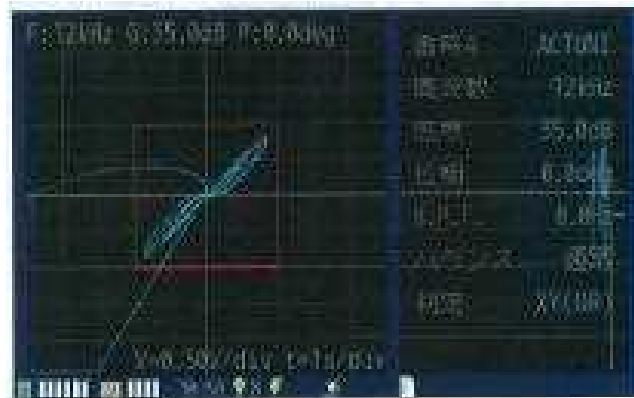
鋼橋において、母材や溶接部表面の亀裂は、その疲労強度に大きな影響を及ぼすため、できるだけ速やかに検出することが必要である。

携帯式渦流探傷装置

携帯式渦流探傷装置は、塗料や錆除去などの前処理の必要がなく亀裂の検出ができる。(表面および表面付近の欠陥の検出用)

特徴

- ・ 損傷 (亀裂) を波形とアラーム信号で認識
- ・ 亀裂が塗膜割れor溶接部割れか判定可
- ・ 小型軽量 (1～1.5kg)
- ・ 一人で操作可能



渦流探傷検査結果の表示例



携帯式渦流探傷装置

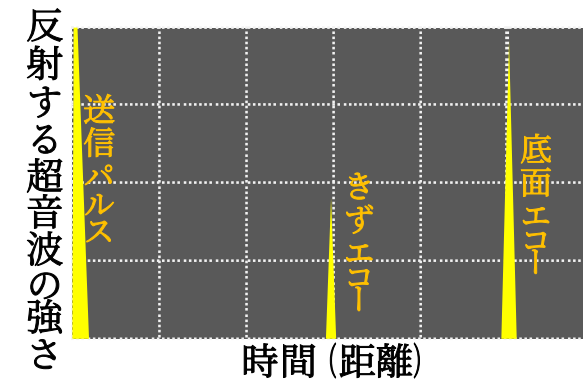
超音波探傷試験

NEXCO

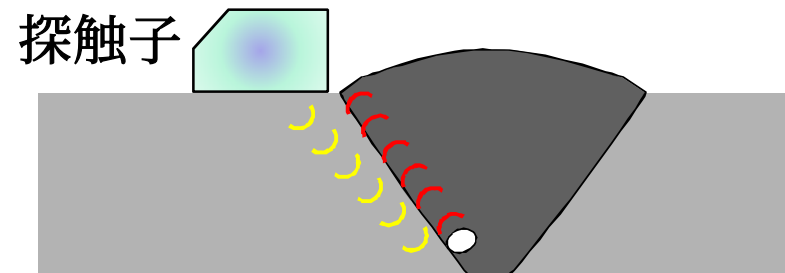
①試験体の表面に超音波を発信したり受信したりすることのできる探触子をあてて内部に超音波を伝搬させ、内部で反射されて戻ってきた超音波（エコーという）が受信されると、試験体の内部にきずがあると判断する。きずの位置は、送信された超音波が受信されるまでの時間から測定する。きずの大きさは、受信されたエコーの高さあるいはきずエコーの出現する範囲から測定する。

②探触子には、試験体表面に垂直に超音波を伝搬させる垂直探触子と試験体表面から斜めに超音波を伝搬させる斜角探触子がある。

探触子 (垂直探傷)



(斜角探傷)



フェイズドアレイ超音波探傷器



フェイズドアレイ超音波探傷器

フェイズドアレイ超音波探傷器は、目に見えない鋼部材の溶接部や鋼部材のクラックなどの損傷を高精度に検出ができる。

(詳細調査に適用)

特徴

- ・原子力分野や航空宇宙産業などで適用
- ・断面を映像化できる
- ・従来の超音波探傷試験に比べ
検査時間の短縮, 検出精度の向上
- ・データのデジタル保存が可能
- ・小型軽量 (3.5~4.5kg)
- ・一人で操作可能



フェイズドアレイ超音波探傷器



フェイズドアレイ超音波探傷器による損傷部の表示例

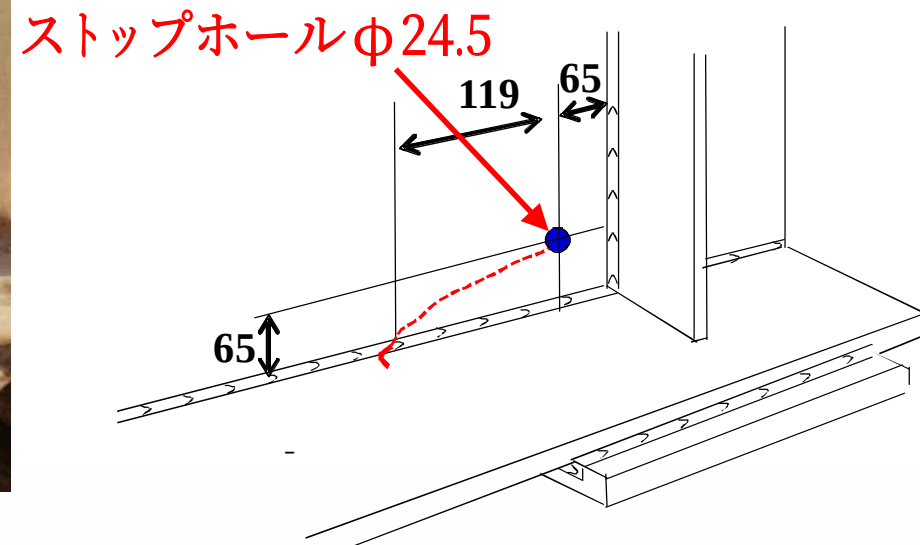
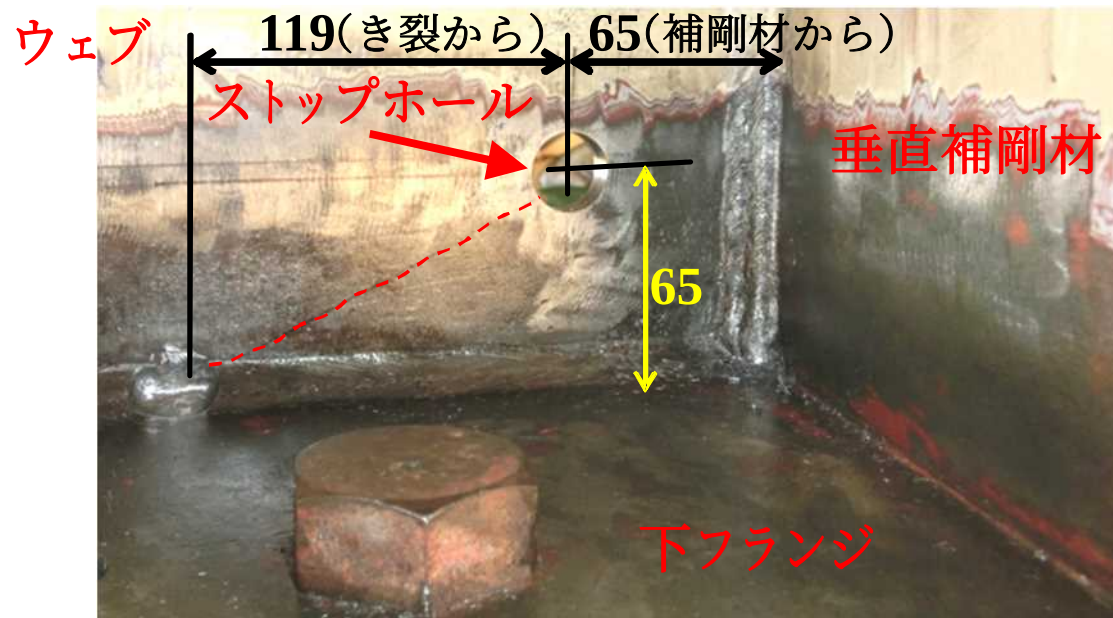
3.5 疲労亀裂の 補修・補強工法の概要

疲労亀裂の補修補強工法



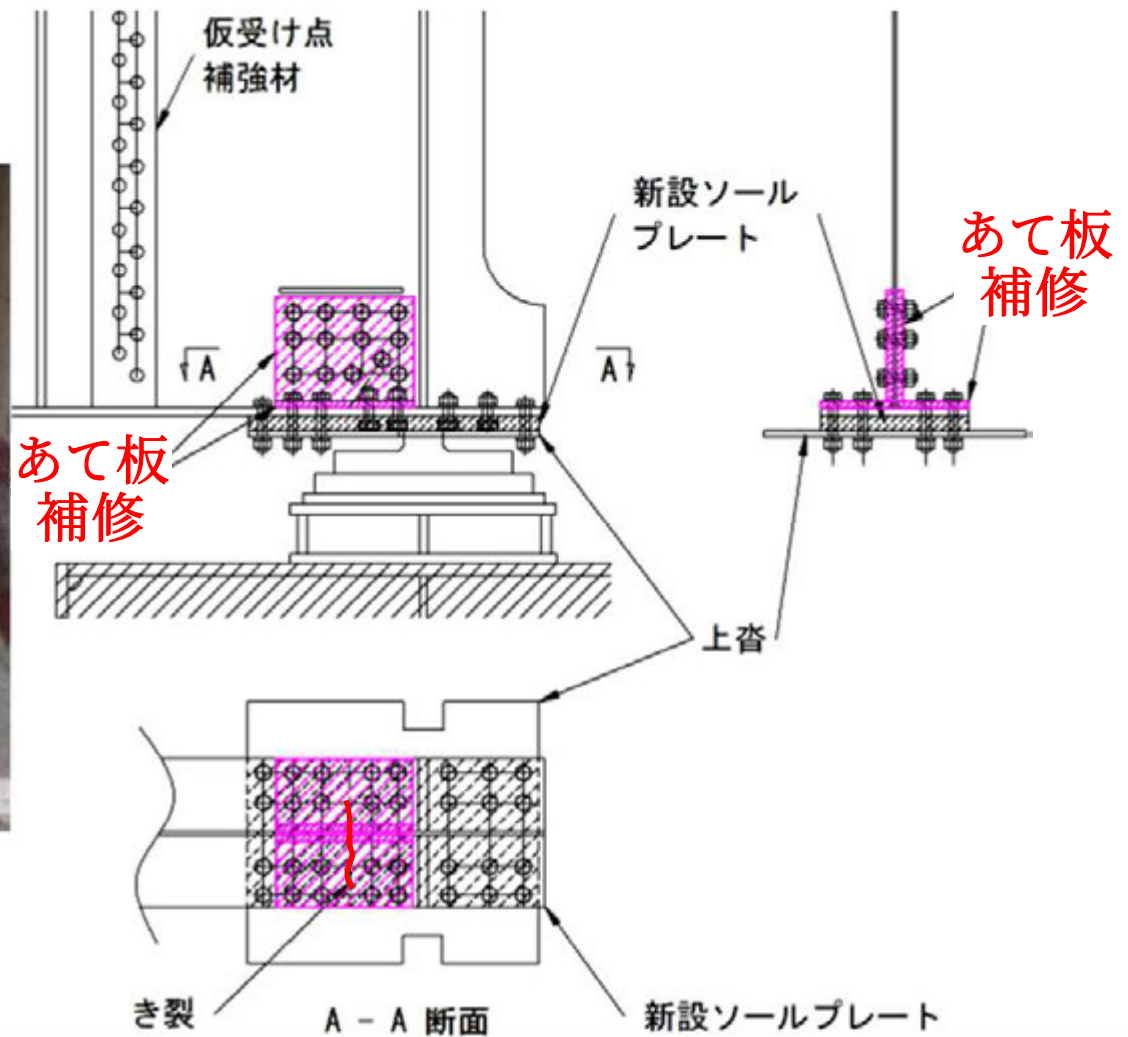
工法・対策	得られる効果
ストップホール	亀裂部位に作用する応力の低減
高力ボルトによるあて板補強	
溶接による補修	
高周波ピーニング	継手部の疲労強度の向上
グラインダー仕上げ	
ハンマーピーニング	
TIG処理	
ICR処理	
損傷部の取替え	機能復旧・向上

SP型亀裂のストップホールの事例

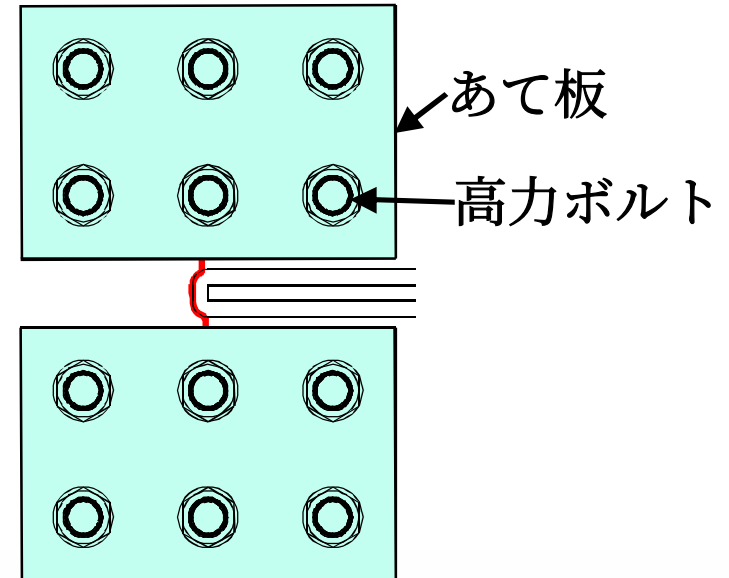
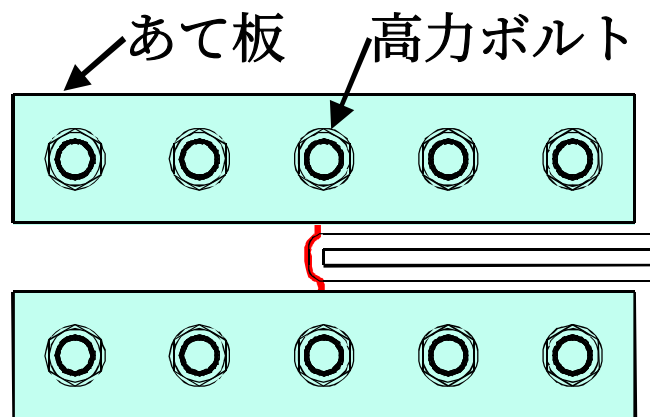
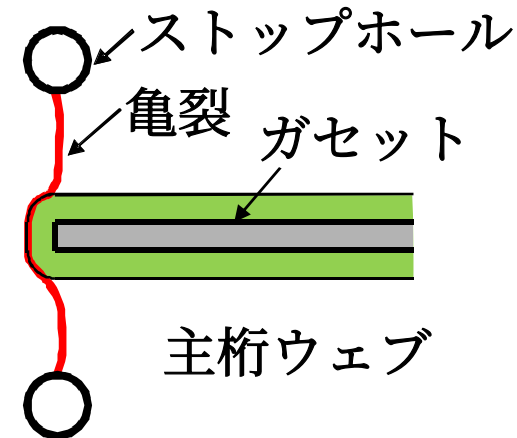
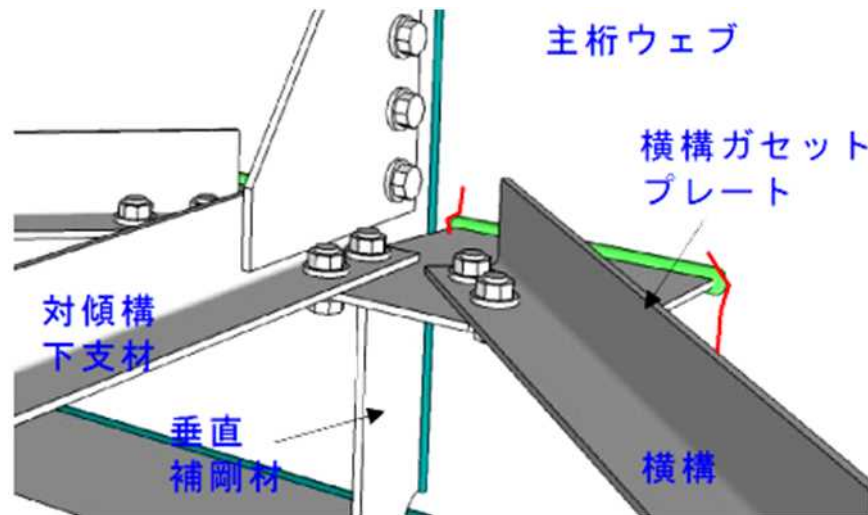


SP型亀裂のあて板補修の事例

NEXCO



G型亀裂のあて板補修(ガセット端部)

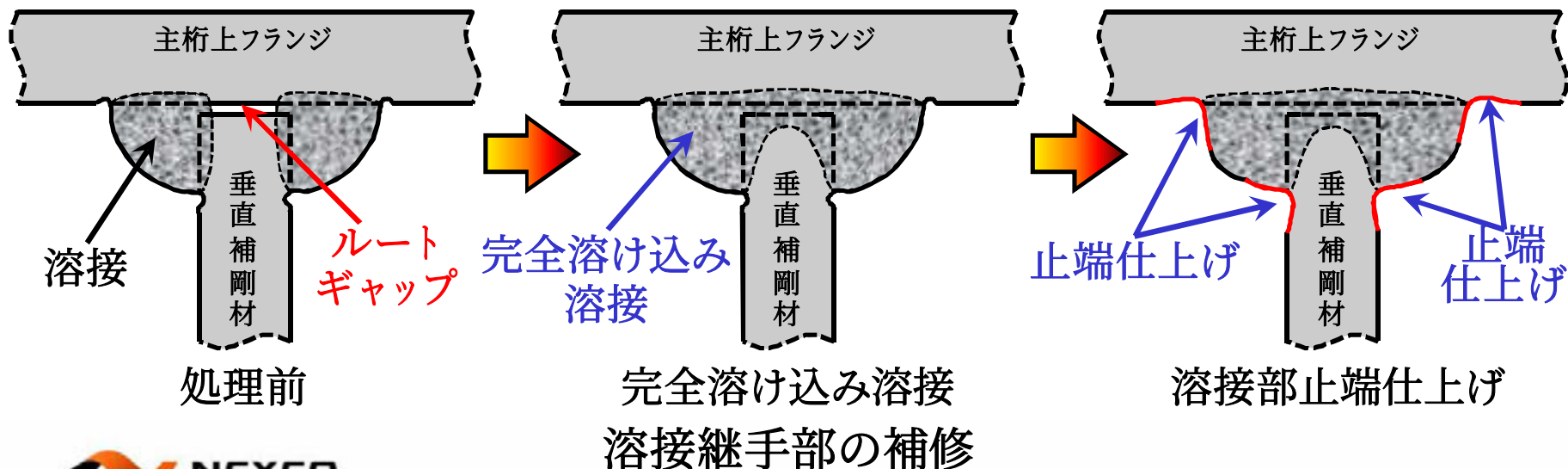


溶接による補修の事例

NEXCO

既設溶接を除去し、完全溶け込み溶接を施工

- 垂直補剛材上端部の溶接は上下フランジを溶接した後に施工されるため、ルートギャップが発生する。
- のど厚が小さい場合やルートギャップが大きい場合、ルート部から亀裂が発生し溶接部の破断に至るケースがある。
- 亀裂補修には、既設の溶接をガウジング等により除去し、完全溶け込み溶接を行う。溶接止端部はグラインダー仕上げや高周波ピーニングなどにより止端部を仕上げ、疲労強度の向上を図る。

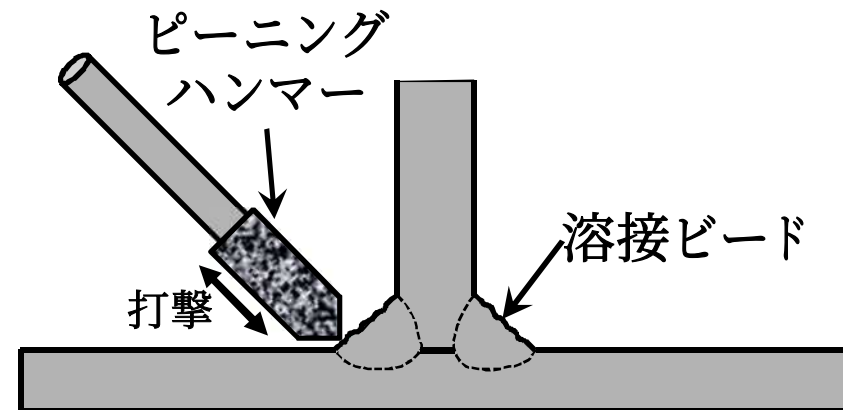


溶接継手部の疲労強度の向上

NEXCO

①高周波ピーニング

溶接止端部に施工し、疲労強度を向上させる予防対策である。溶接部に超音波振動による打撃を加えることによって表面の金属組織が微細化し、ち密化され、溶接残留応力を引張から圧縮に変化させて、疲労強度を向上させる工法である。溶接止端部の形状が丸くなり、応力集中を緩和することができる。



処理前



高周波ピーニング処理後

高周波ピーニングの事例



写真提供：(株) Beよんど

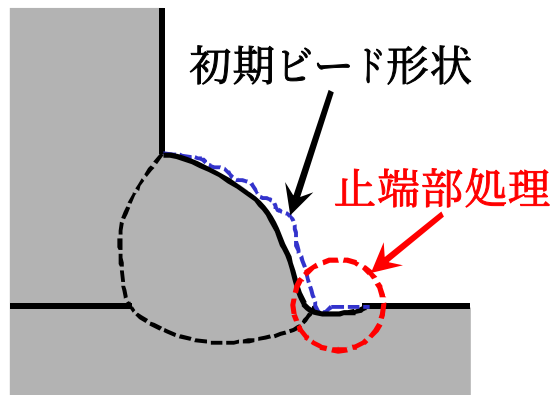
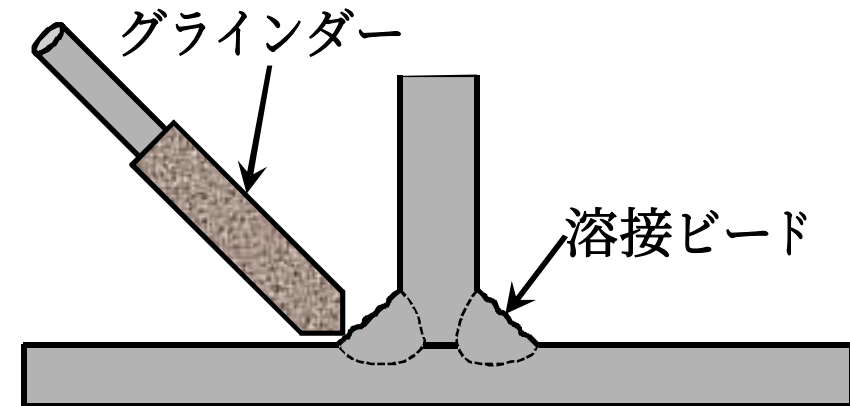
溶接継手部の疲労強度の向上

NEXCO

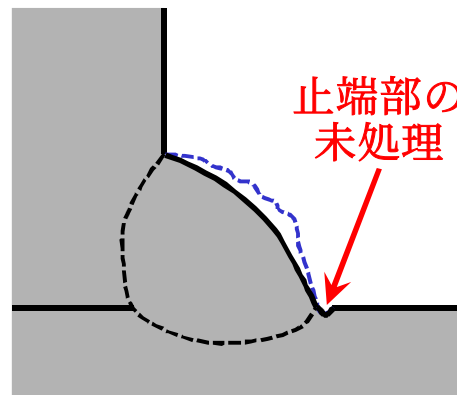
② グラインダー仕上げ

亀裂が発生していない溶接止端部に施工し、疲労強度を向上させる予防対策と溶接止端部に発生した軽微な疲労亀裂を除去する恒久対策の効果がある。

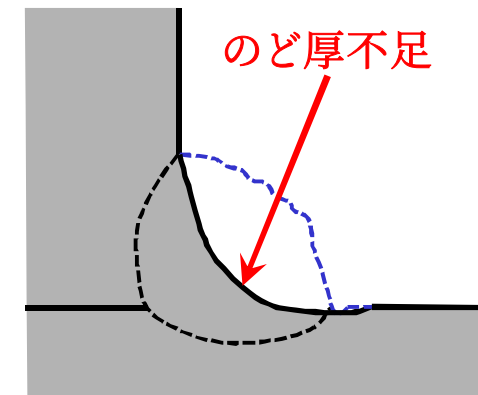
亀裂を除去し、滑らかに仕上げることで応力集中を低減させ、疲労強度を向上させる工法である。



適切な処理事例



表面のみ仕上げた
悪い事例



極端な仕上げによる
悪い事例

3.6 鋼橋の鋼部材の高耐久化の方策

鋼橋の高耐久化のための方策は何か？

腐食対策

- 腐食箇所は、速やかな補修が必要である。
 - ・ 腐食を放置した場合は、劣化が進行し性能が低下する。
 - ・ 劣化の進行は、海岸付近および凍結防止材散布地域で早くなる。
 - ・ 劣化が進行した場合は、補修費が著しく増加する。
- 適切な腐食対策を行うことにより、100年以上供用できる。

疲労亀裂対策

- 疲労亀裂の発生要因を理解して、効率的な点検を実施する。
- 疲労亀裂発生箇所の亀裂発生原因を理解して、効率的な補修・補強を実施する。

4. コンクリート橋の変状と 評価方法

4.1 コンクリート構造の劣化要因

劣化機構と要因, 指標, 現象

NEXCO

劣化機構	劣化要因	劣化現象	劣化指標の例
中性化	二酸化炭素	二酸化炭素がセメント水和物と炭酸化反応によりpHが低下し, 鋼材の腐食が促進され, コンクリートのひび割れや剥離, 鋼材断面の減少を起こす。	中性化深さ 鋼材腐食量
塩害	塩化物イオン	コンクリート中の鋼材の腐食が塩化物イオンにより促進され, コンクリートのひび割れや剥離, 鋼材断面の減少を起こす。	亀裂
アルカリシリカ反応	反応性骨材	アルカリシリカ反応性鉱物を有する骨材がアルカリ性水溶液と反応し, 異常膨張することによりひび割れが発生する。	膨張量 (ひび割れ)
凍害	凍結融解	コンクリート中の水分が凍結融解により, スケーリング, ひび割れなどで劣化する。	凍結深さ 鋼材腐食量

劣化機構と要因, 指標, 現象

NEXCO

劣化機構	劣化要因	劣化現象	劣化指標の例
化学的 侵食	酸性物質 硫酸イオン	酸性物質や硫酸イオンによりコンクリートが分解したり, 化学物質生成時の膨張圧によりコンクリートが劣化する。	劣化因子の浸透深さ 中性化深さ 鋼材腐食量
疲労	繰返し载荷	道路橋の床版などで輪荷重の繰返し载荷によりひび割れし, 鋼材腐食, 陥没が発生する。	ひび割れ密度 たわみ
すり減り	磨耗	流水や車輪などの磨耗作用によって, コンクリートの断面が時間とともに徐々に失われていく。	すり減り量 すり減り速度

コンクリートの劣化要因に対する課題

劣化に対する適切な対策の実施が高耐久化を推進

中性化

- すべてのコンクリートは中性化が進行する。
- コンクリートの圧縮強度が小さく、鉄筋かぶりが小さい構造物（RC上部工、RC床板、etc.）は、進行が速く、鉄筋腐食の可能性が増大する。
- 速やかな対策（表面保護工、etc.）により影響を排除できるが、対策を実施しているケースは極めて少ない。

塩害

- 塩害の原因としては、海からの飛来塩分、凍結防止材（食塩）、内在塩分（海砂等）があり、原因の除去が困難である。
- 塩害を放置すれば、橋梁に致命的な変状が発生する。
- 設計時および早期の対策が重要となる。

コンクリートの劣化要因に対する課題

劣化に対する適切な対策の実施が高耐久化を推進

アルカリシリカ反応 (ASR)

- 反応性骨材の有無が重要となる。
- 劣化が進行すれば、耐荷力や耐久性が低下する。
- 早期に対策する必要がある。

疲労 (床版)

- 道路橋示方書で想定した輪荷重よりも大きな輪荷重の車両が走行している。
- 床板厚が薄い橋梁 (東名高速道路等) に劣化が進行する。
- 床板防水工がない場合は、劣化が早く進行する。
- 塩害の影響がある場合は、劣化が早く進行する。
- 走行安全性に著しい影響を与えるおそれがある。

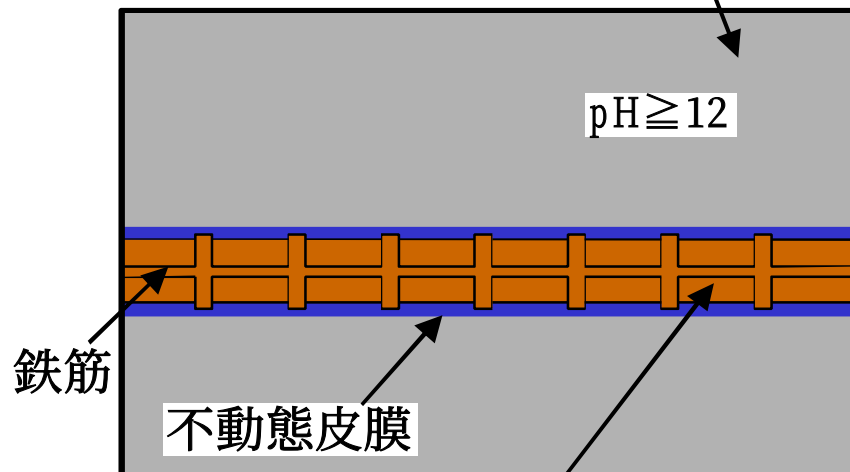
4.2 コンクリート構造の劣化

主な劣化原因(中性化)

コンクリートの炭酸化によりpHが低下し鉄筋が腐食

健全な状態

コンクリート中に水酸化カルシウムが多量に存在し、pH12以上の高いアルカリ性を保っている



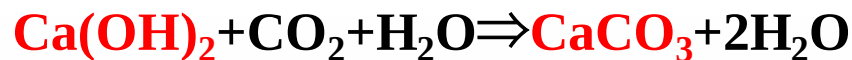
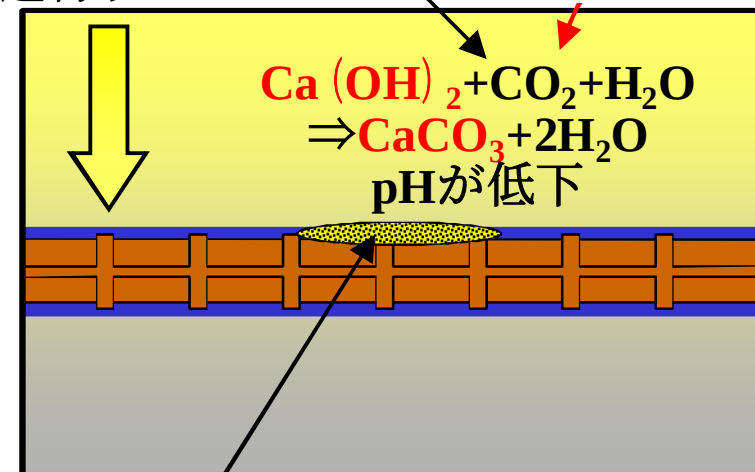
鉄筋は不動態皮膜に保護されて、さびない

中性化

コンクリート中の水酸化カルシウム (Ca(OH)_2) が二酸化炭素と反応して炭酸カルシウム (CaCO_3) となり、pHが低下していく

表面から中性化が進行する

空気中の二酸化炭素 CO_2



主な劣化原因(塩害)

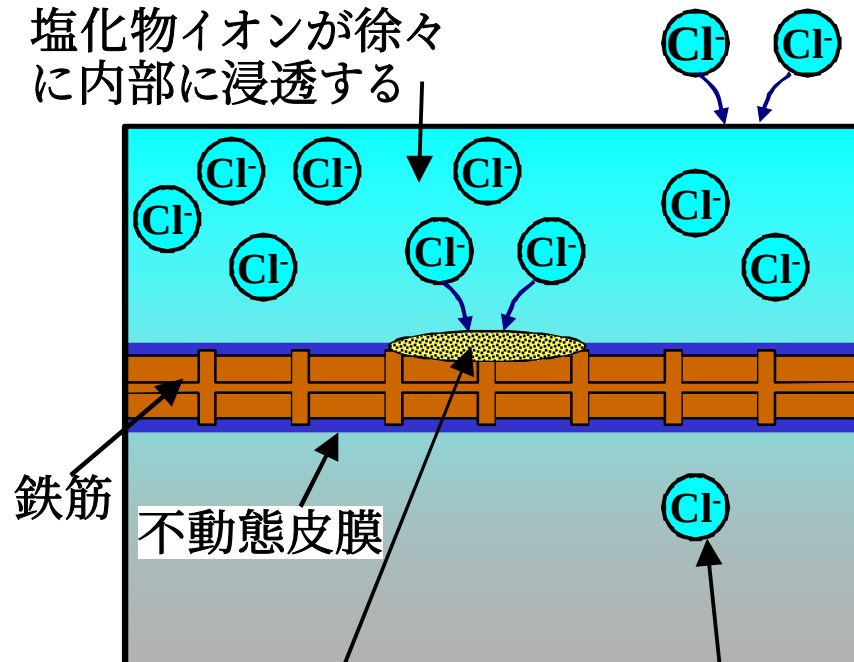
NEXCO

塩化物イオンが不動態皮膜を破壊し鉄筋が腐食

進展期

凍結防止剤や潮風などによって外部から供給される塩化物イオン

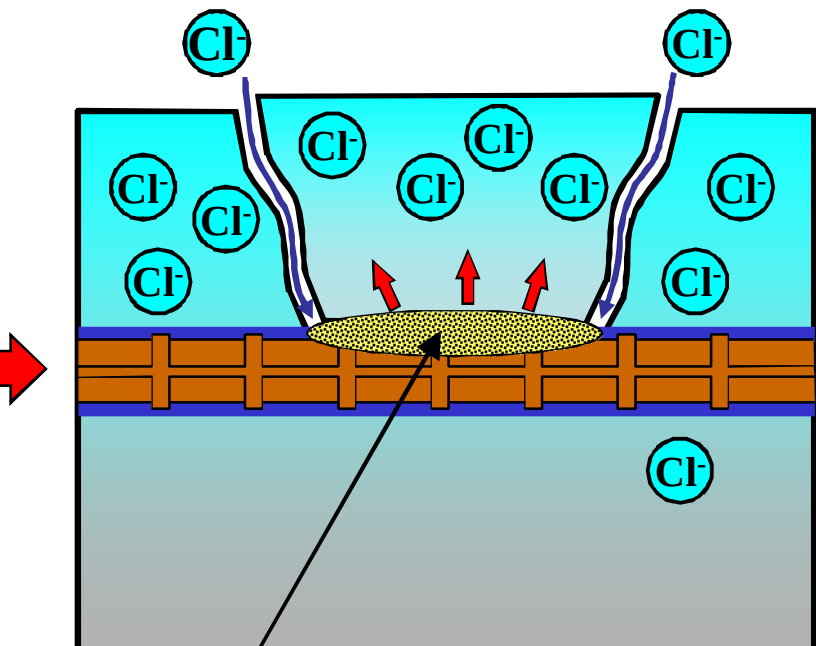
塩化物イオンが徐々に内部に浸透する



塩化物イオンが不動態皮膜を破壊し、鉄筋がさびる

海砂などと一緒に混入した塩化物イオン

加速期



さびの膨張圧力によって、コンクリートにひび割れが生じる

さらに鉄筋がさびやすくなる

塩害による劣化事例

NEXCO

塩化物イオンの浸透 ⇒ 鉄筋の腐食・剥落



塩害による劣化事例

NEXCO

塩化物イオンの浸透 ⇒ 鉄筋の腐食・剥落

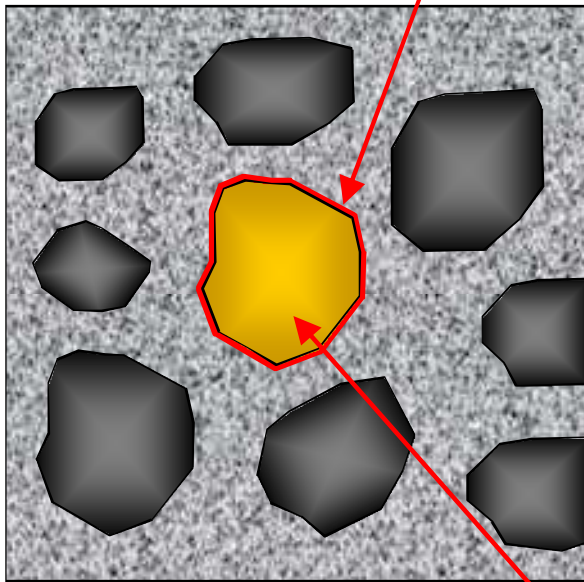


主な劣化原因(アルカリシリカ反応)

反応性骨材が吸水・膨張しコンクリートにひび割れ

潜 伏 期

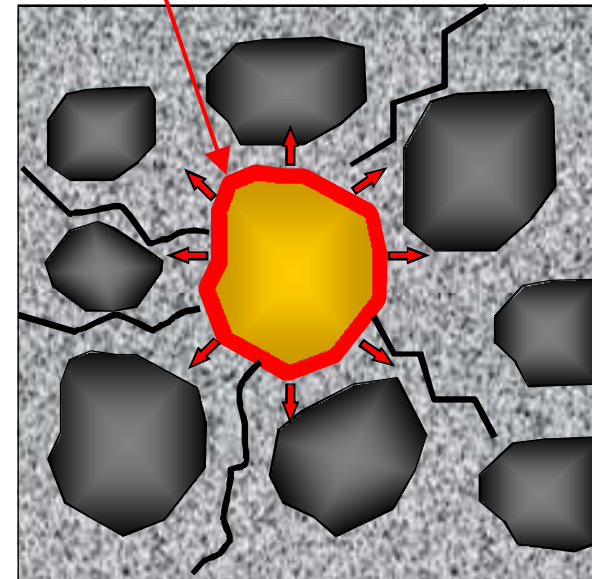
反応性骨材がセメント中のアルカリ成分と反応して、ゲル(吸水膨張性のある物質)を生成する



反応性骨材

加 速 期

ゲルが吸水, 膨張して, コンクリートにひび割れが生じる



※一般に、アルカリシリカ反応は、**ASR (Alkali Silica Reaction)** と略記している。

ASRによる損傷事例

NEXCO



橋脚掛け違い部



帯鉄筋曲げ加工部の破断

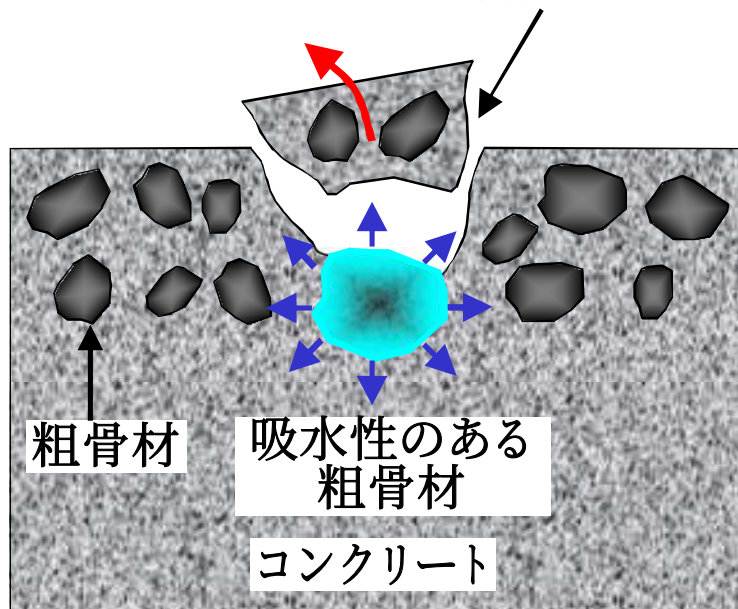
主な劣化原因(凍害)

NEXCO

骨材・モルタルの凍結によりコンクリート表面が劣化

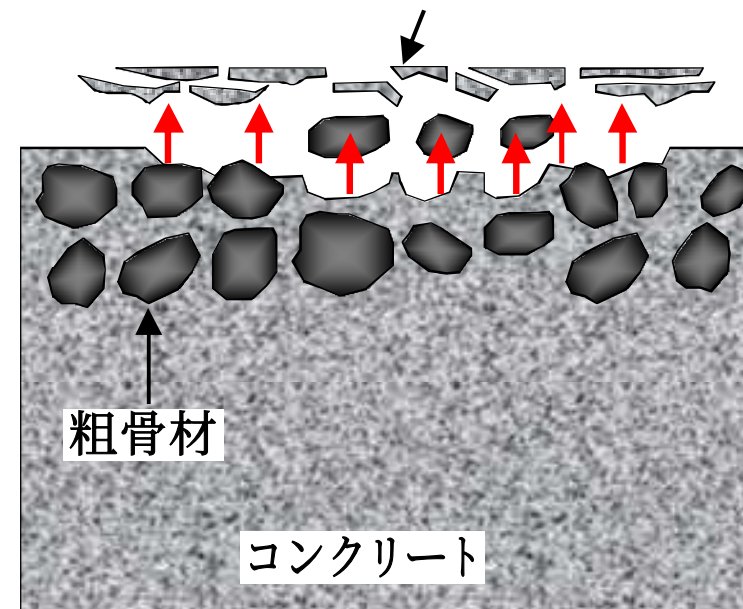
ポップアウト

吸水性のある骨材が表層部にある場合は、凍結時の膨張圧によって、コンクリート表層部が円錐状に破壊し剥落する



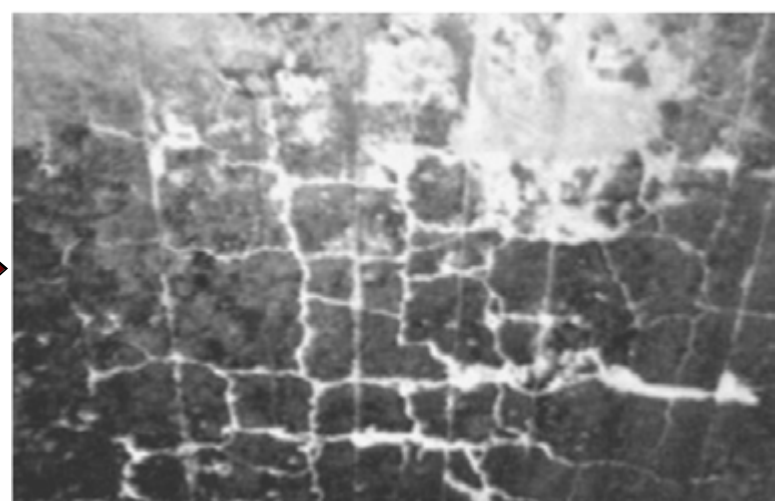
スケーリング

凍結と融解の繰返しにより、表面のモルタル分が薄片状に剥離・剥落し、進行すると粗骨材も剥離する



疲労による劣化事例(鋼橋RC床版)

輪荷重の繰り返し ⇒ 床版のひび割れ

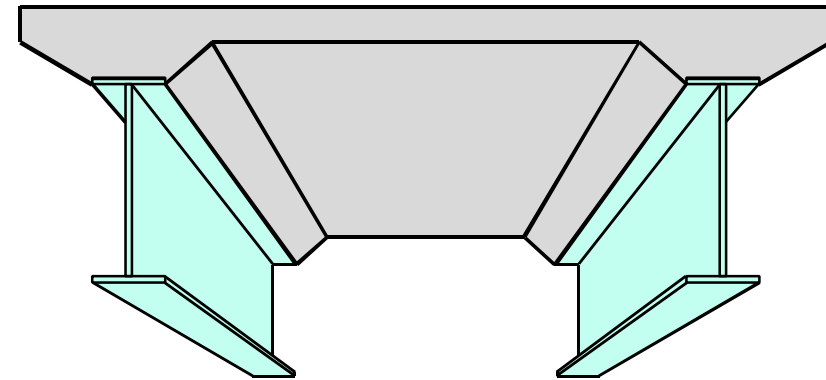


疲労による劣化メカニズム

NEXCO

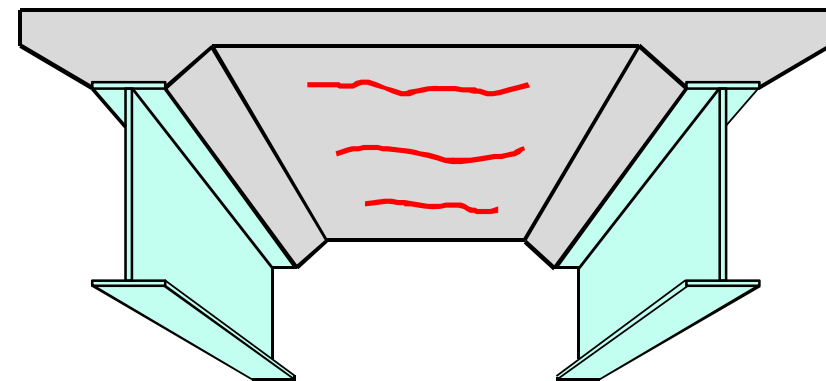
①供用初期

供用初期で、有害なひび割れが発生していない状態。



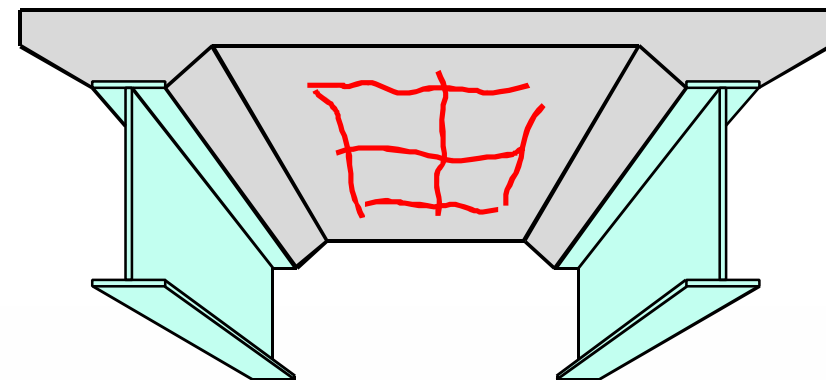
②一方向のひび割れ発生

乾燥収縮等の影響により、床版に一方向のひび割れが発生した状態。床版の収縮は鋼桁等により拘束されるため、橋軸直角方向にひび割れが発生しやすい。



③格子状のひび割れが進展

縦横のひび割れが交互に発生し、格子状のひび割れが増加する状態。活荷重の作用により、縦横のひび割れが徐々に進行し、せん断、ねじりせん断剛性が徐々に低下する。

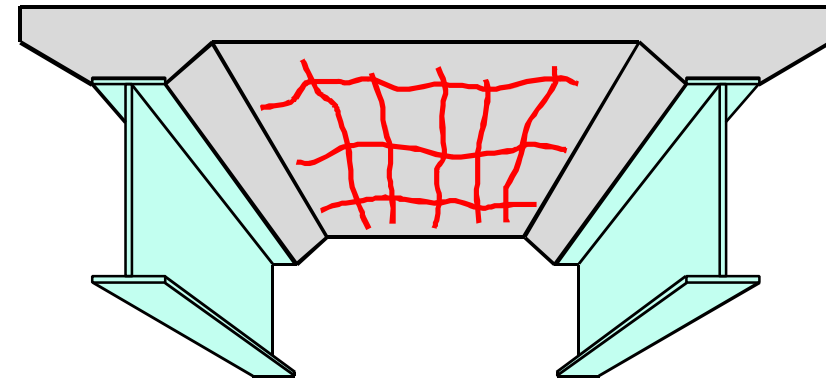


疲労による劣化メカニズム

NEXCO

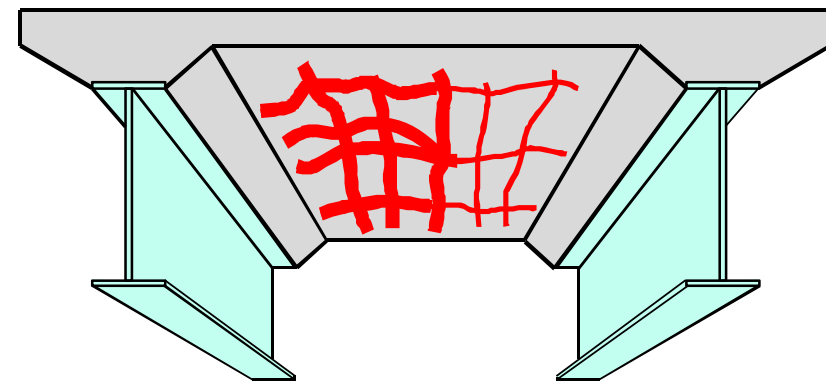
④ ひび割れが上面まで貫通

2方向のひび割れが進行する間に、さらに新しいひび割れが発生し、ひび割れは亀甲状となる。また、交通荷重の繰返しにより、床版の曲げひび割れは貫通する。



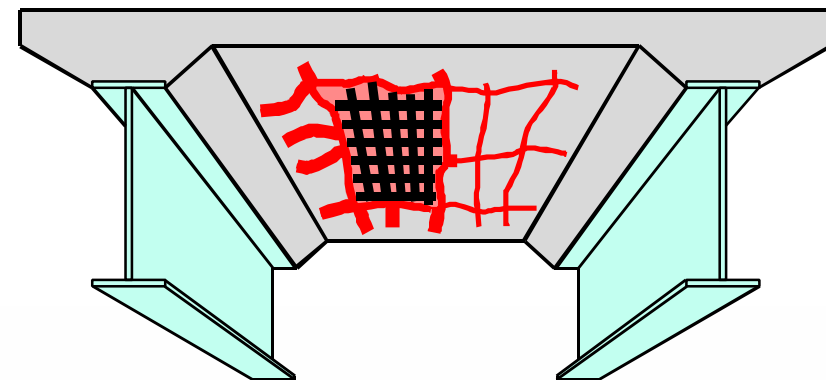
⑤ ひび割れ破面せん断抵抗力低下

ひび割れ破面ですり磨き現象が生じ、せん断抵抗力が低下。水が存在する場合に特に著しい。貫通ひび割れから浸透した雨水によりエフロッセンスが床版下面に沈着するようになる。また、鉄筋の錆汁も付着するようになる。



⑥ コンクリートの抜け落ちが発生

亀甲状ひび割れが20～30cm角程度にまで進行すると、ひび割れ密度の増加は停止するが、押抜きせん断強度は著しく低下し、これを超える輪荷重により、抜け落ちが生じる。



4.3 PC鋼材の劣化要因

PC鋼材の劣化機構と要因, 指標, 現象

劣化機構	劣化要因	劣化現象	劣化指標の例
腐食	塩化物イオン 酸性物質・酸素 雨水(結露)など	防錆機能が損なわれ浸透雨水と酸素によりPC鋼材の腐食が進行し, 破断に至る。	防食機能の健全性 PC鋼材の破断
疲労	繰返し载荷 風・振動	車両等の荷重の繰返し载荷や風あるいは交通振動による繰返し応力によりPC鋼材が破断する。	張力 PC鋼材の破断

PC鋼材の劣化要因に対する課題

劣化に対する適切な対策の実施が高耐久化を推進

腐食

- PC鋼材は、適切な防錆処理を実施しなければ腐食が進行する。
- 既設構造物においては、材料分離するPCグラウトやシースの空隙率が小さいため、充填不良が発生している箇所がある。
- 内ケーブル構造においては、点検が極めて困難である。
- 遅れ破壊のおそれがある。

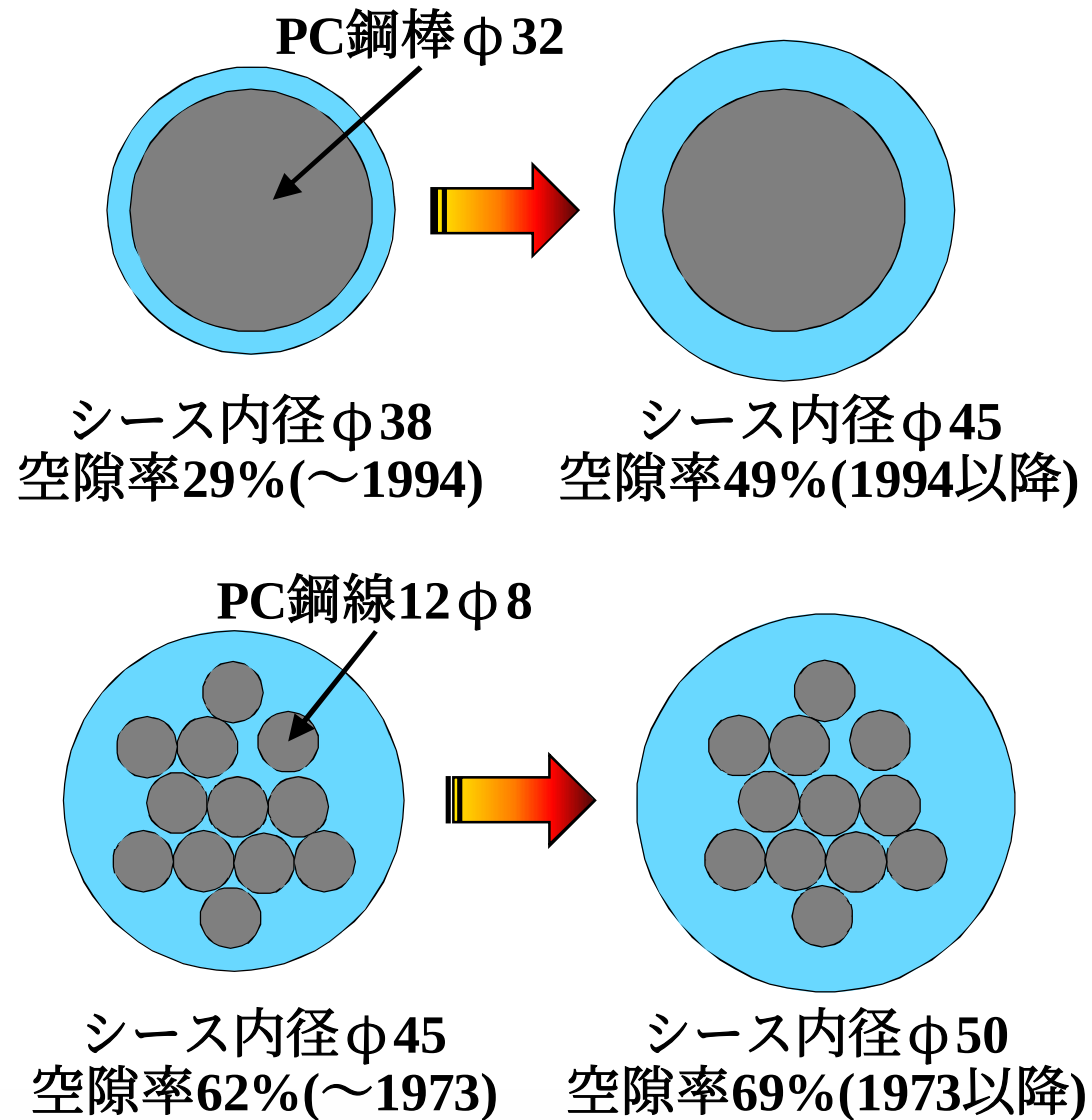
疲労

- 内ケーブル構造は、疲労による劣化はほとんど生じない。
- 外ケーブル構造や斜張橋等の斜材においては、疲労により劣化するおそれがある。

PC鋼材とシースの変遷(鋼棒・鋼線)

グラウトは充填困難

- PC鋼棒においては、鋼棒を配置した場合のシース内の空隙が極めて少なく、PCグラウトの充填が困難で、グラウト充填不良発生しやすい。
- PC鋼線においては、PC鋼棒よりは空隙が多いが、1973年以前の橋梁はPCグラウトの充填が困難となっている。
- 使用PC鋼材や建設年に着目して点検することも極めて重要である。



4.4 PC鋼材の劣化

PC鋼材の劣化事例



グラウトおよびコンクリートの充填不良
⇒ PC鋼材および鉄筋の腐食



PC鋼材の劣化事例

NEXCO

グラウトの充填不良および水の浸入

⇒ PC鋼材および鉄筋の腐食・破断



PC鋼材の防錆不良

NEXCO

PC鋼材の配置不良 (かぶり不足)

⇒ PC鋼材・シースおよび鉄筋の腐食



PC鋼材の防錆不良



PCグラウトの充填不良

⇒ PC鋼材の腐食および破断



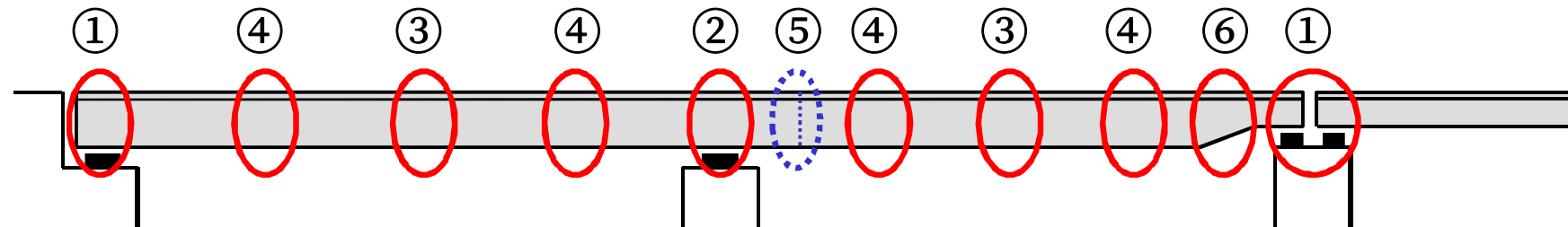
ファイバースコープによるグラウト充填調査

4.5 PC橋の点検の着目点

変状発生個所の着目点 (主桁)



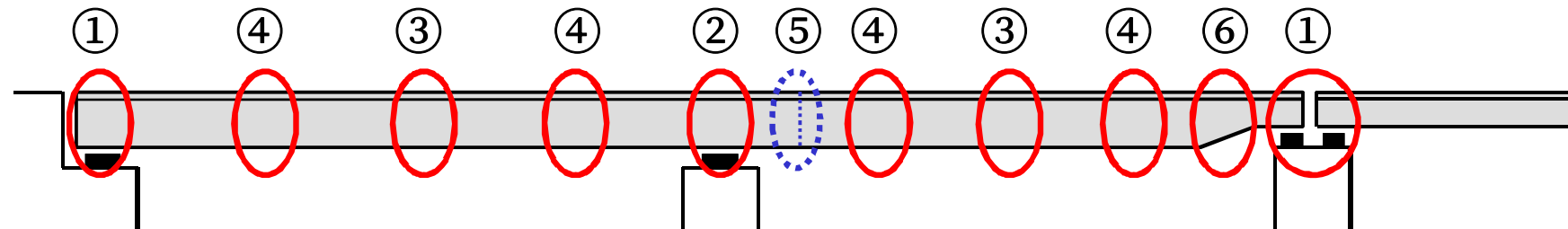
着目点	着目のポイント
①端支点部	支承や伸縮装置の機能が十分でない場合、支承反力、地震、温度変化、クリープ乾燥収縮などによる水平力によって損傷を受けることがある。端支点部にはPC鋼材が集中して定着されることが多いことから、支圧応力によるひび割れが生じる可能性がある。また、伸縮装置部や橋面からの漏水によって、PC鋼材定着部の後埋めコンクリート部に水が浸入していることもある。
②中間支点部	負の曲げモーメントおよびせん断力が最大となり、また集中的な支点反力を受けることから、複雑な応力状態になり、ひび割れが生じやすい。
③支間中央部	曲げモーメントが最大となる部分であり、曲げひび割れが発生しやすい。
④支間1/4部	一般に斜め引張応力度が大きく、斜めひび割れが生じやすい。また、PC鋼材が曲げ上げ配置されていることが多い箇所であり、グラウト不良などによりPC鋼材に沿ったひび割れが生じる場合がある。



変状発生個所の着目点 (主桁)



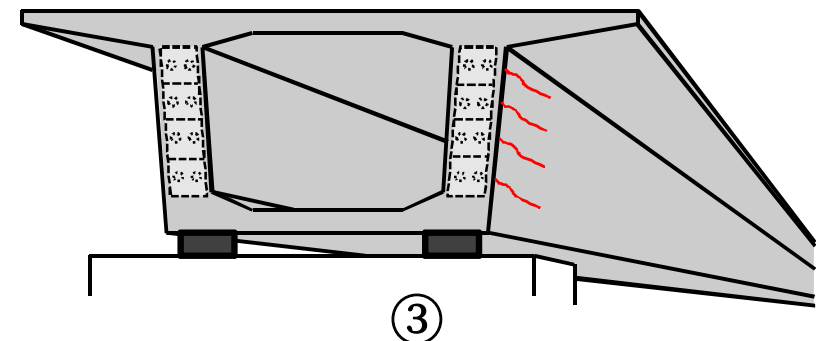
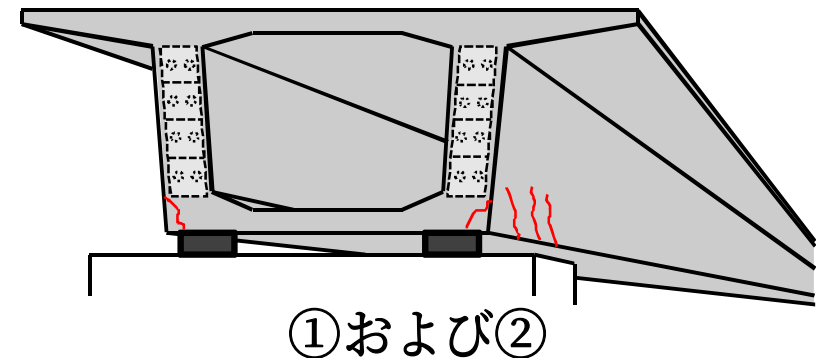
着目点	着目のポイント
⑤打継目部	乾燥収縮や施工不良によるひび割れ, はく離 (浮き), 漏水等が生じやすい。
⑥断面変化部	急激に断面が変化する部分では, 応力集中によりひび割れが生じることがある。
PC鋼材定着部	主桁のウェブやフランジに突起などを設けたPC鋼材の定着部は, 応力集中によるひび割れが生じやすい。また, 定着部は後打ちコンクリートで覆う場合が多く, 打継ぎ目地からの雨水の浸入により定着装置が腐食することがある。
コンクリートと鋼部材の接合部	例えば, 波形鋼板ウェブ橋の場合, コンクリート下床版と鋼ウェブとの接合部は, 雨水や結露などによりさびが生じる可能性がある。また, コンクリートと鋼の界面のシール材に劣化が生じることもある。



点検時着目点 (端支点)

NEXCO

ひび割れ発生状況	主な原因
① 支承上の桁下面および側面に発生する鉛直方向ひび割れ	支点上の過大局部応力, 支承機能の消失, 地震
② 支承付近ウェブに発生する斜め方向ひび割れ	過大せん断力やせん断補強鋼材の不足
③ PC鋼材に沿ったひび割れ	定着部からのシース内への水の浸透や, アルカリ骨材反応による膨張など
④ PC鋼材定着部の後埋め部等のひび割れ	後埋め材料の乾燥収縮によるひび割れ



端支点の変状事例

NEXCO

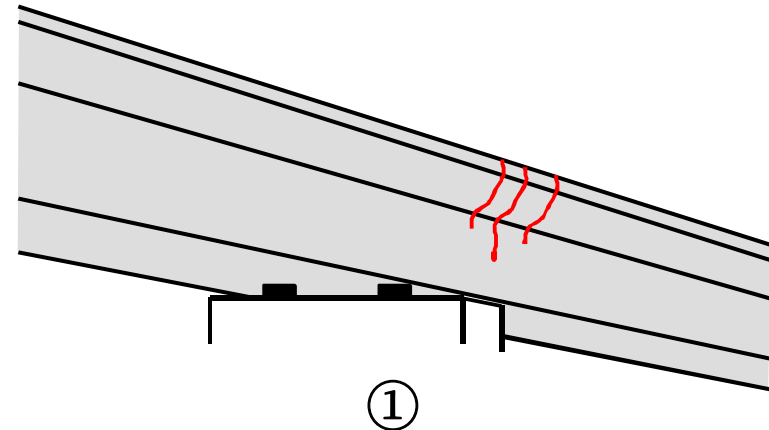
コンクリート橋の変状の判定事例

判定区分			変状判定・写真	
A	耐久性に影響を及ぼすひび割れが見られる。	A1		
			鉄筋位置まで到達している幅の大きなひび割れが桁の鉛直方向または斜め方向に全体的に発生しており，進行性がある。	
		A2		
			鉄筋位置まで到達している幅の大きなひび割れが桁の鉛直方向または斜め方向に全体的に発生している。	

点検時着目点 (中間支点・支間中央)

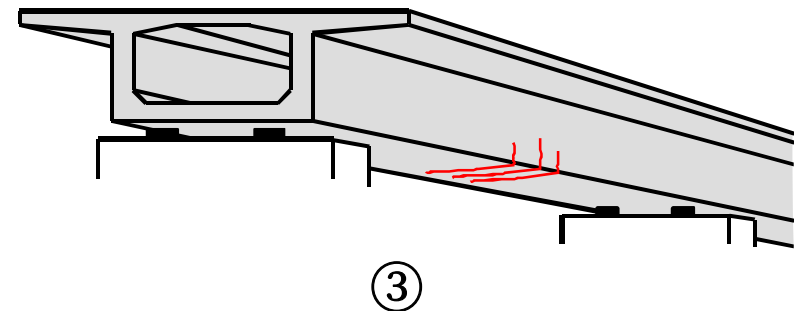
中間支点

ひび割れ発生状況	主な原因
①連続桁中間支点部の主桁上側に発生する鉛直方向ひび割れ	中間支点の上フランジにおける負の曲げモーメントに対する補強鋼材またはプレストレスの不足
②中間支点横桁などに生じるひび割れ	温度応力や乾燥収縮の影響



支間中央

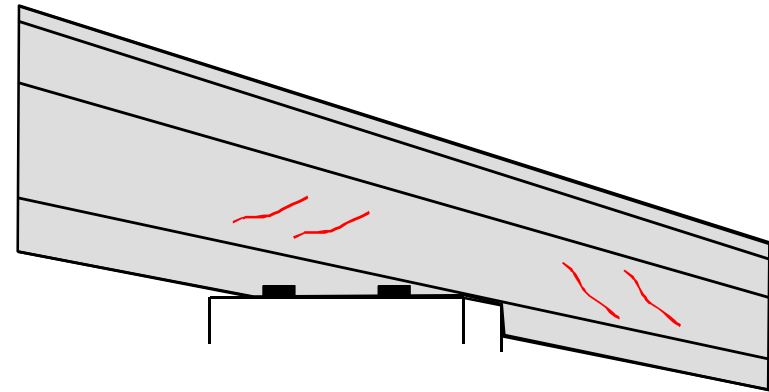
ひび割れ発生状況	主な原因
③下床版下面に発生する橋軸直角方向ひび割れおよびウェブの鉛直方向ひび割れ	支間中央部付近の正の曲げモーメントに対する補強鋼材またはプレストレスの不足



点検時着目点 (支間1/4部・打継目部)

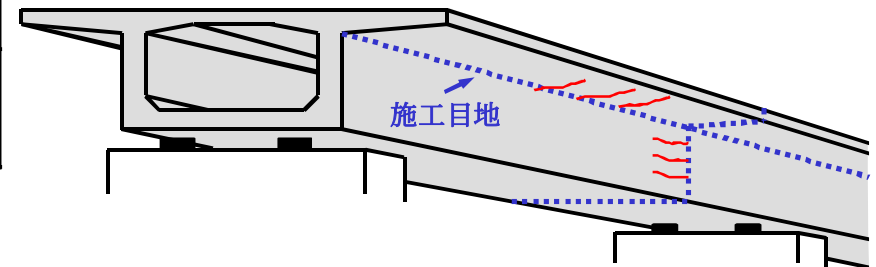
支間1/4部

ひび割れ発生状況	主な原因
ウェブに発生する斜め方向ひび割れ	部材厚不足や補強鋼材またはプレストレス不足



打継目部

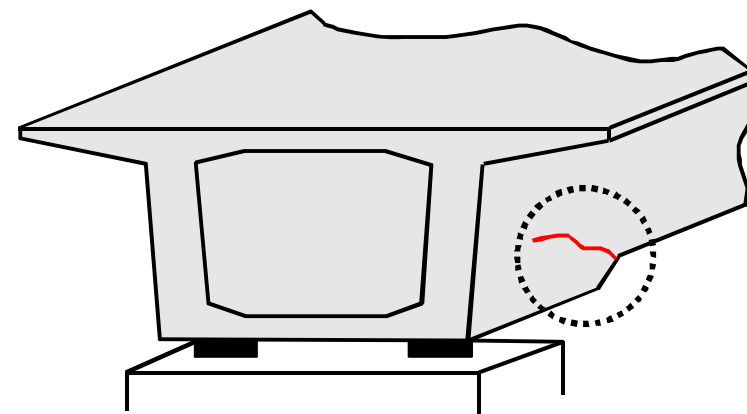
ひび割れ発生状況	主な原因
桁打継目部, 床版打継目部のひび割れ	打継目処理の不良 温度応力・乾燥収縮



点検時着目点 (断面変化部・定着部)

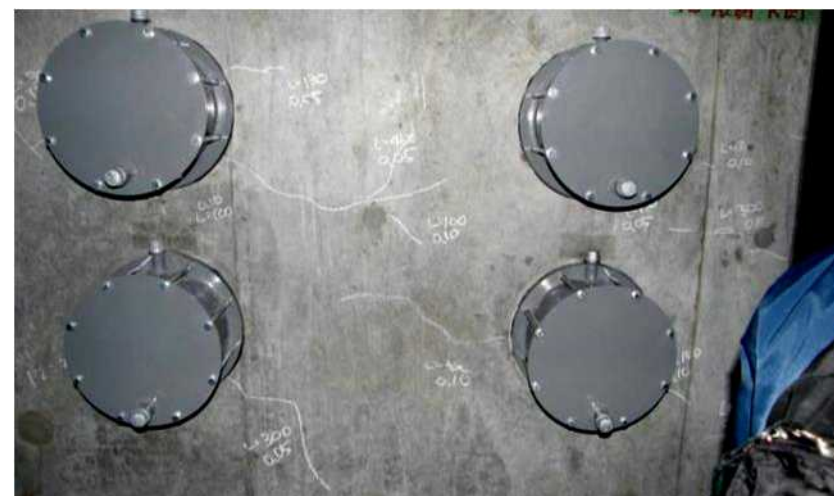
断面変化部

ひび割れ発生状況	主な原因
断面変化部に発生するひび割れ	急激な断面変化に伴う応力集中



P C鋼材定着部

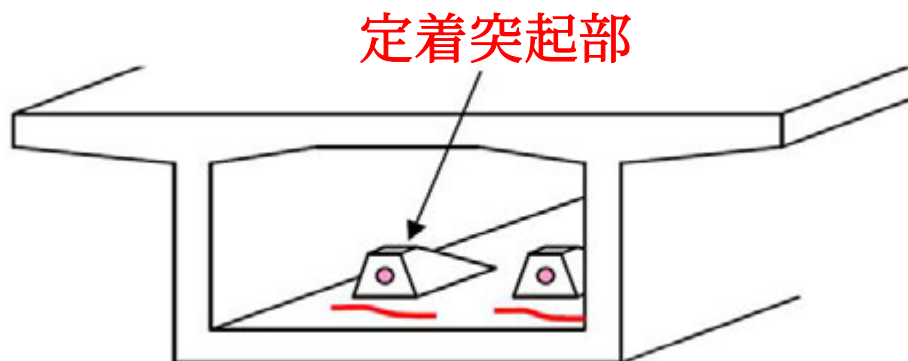
ひび割れ発生状況	主な原因
定着部および偏向部付近に発生するひび割れ	定着部および偏向部の応力集中に伴うひび割れ



横桁の外ケーブル定着部のひび割れ

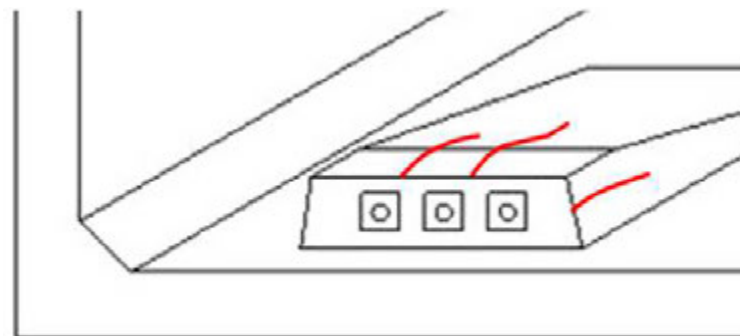
点検時着目点 (PC鋼材定着部)

NEXCO

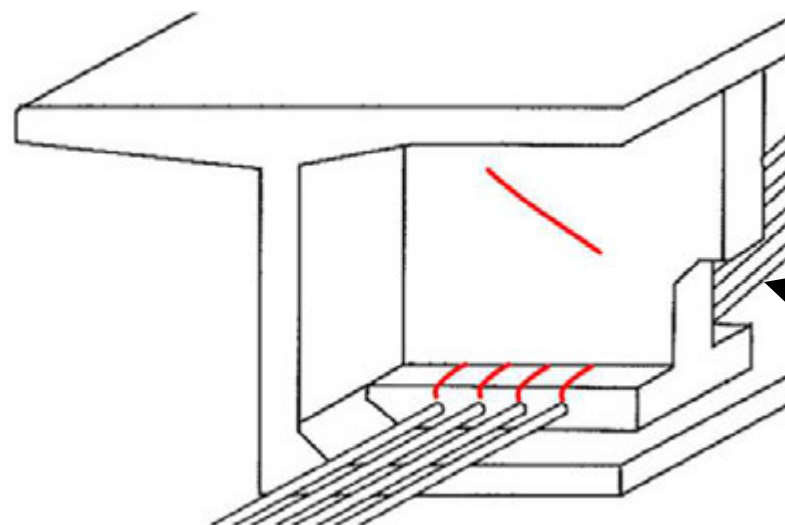


定着突起部

定着突起周辺に生じるひび割れ



複数定着する定着突起に生じるひび割れ



外ケーブル

外ケーブル偏向部に生じるひび割れ

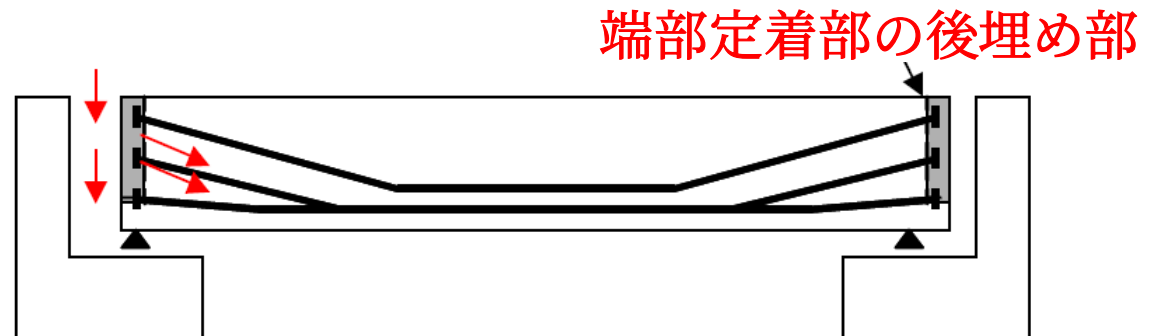
変状発生個所の着目点 (水の浸入)

着目点	変状の発生状況
①桁端部	桁端部の定着部の後埋め部からシース外周やシース内を経て水等が侵入し鋼材が腐食する。
②上縁定着部	PC鋼材定着部が主桁や床版の上縁にある場合に、上縁定着の切欠き部からシース外周やシース内を経て水等が侵入し鋼材が腐食する。
③地覆・壁高欄・横締め後打ち部	地覆や壁高欄等の打継ぎ目部およびPC鋼材横締め後打ち部から水等が侵入し鋼材が腐食する。
④プレキャスト桁床版間詰め部	プレキャスト桁と床版間詰め部との界面において、床版上面から水等が侵入し鋼材が腐食する。
⑤連続合成桁の一次・二次床版継目部	連続合成桁の一次床版と二次床版との界面において、床版上面から水等が侵入し鋼材が腐食する。
⑥箱桁橋等の施工用開口部等	箱桁橋などの床版上面に設けられる施工用開口部や箱抜き等から水等が侵入し鋼材が腐食したり、箱桁内に滞水する。

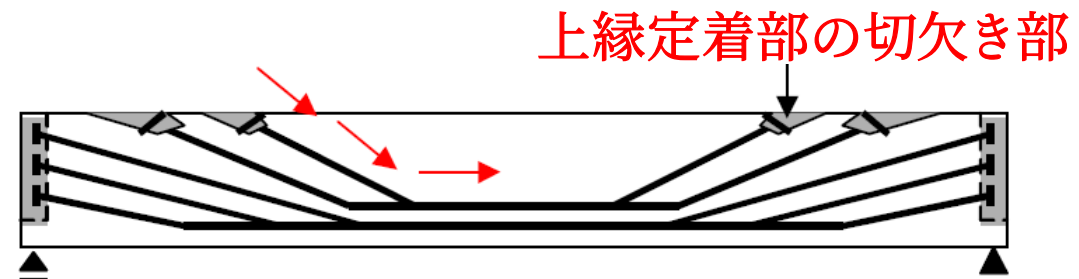
点検時着目点 (水等の浸入)

NEXCO

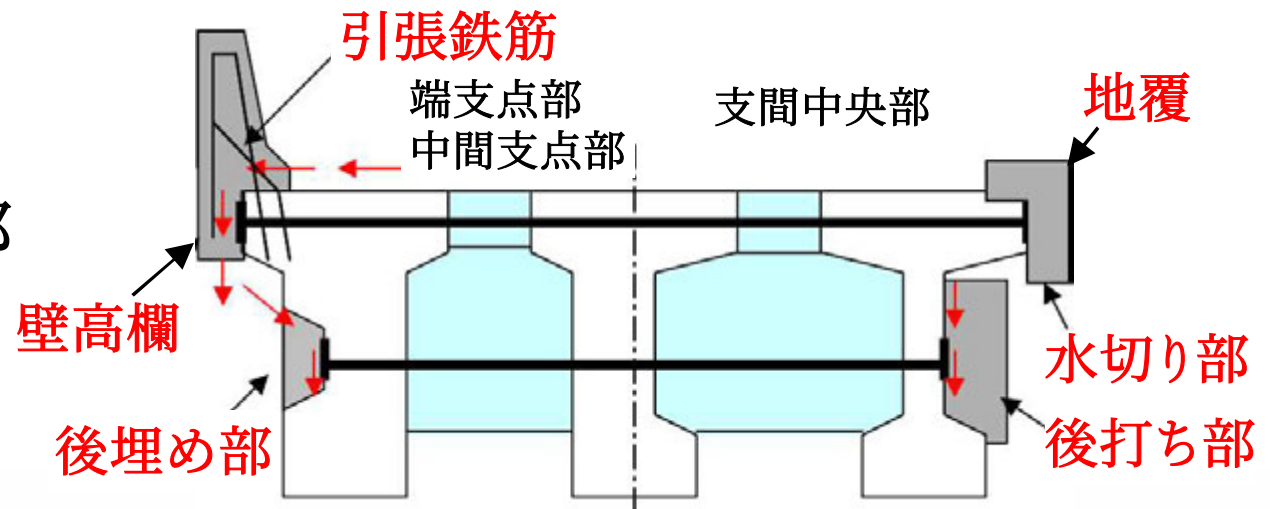
①桁端部



②上縁定着部



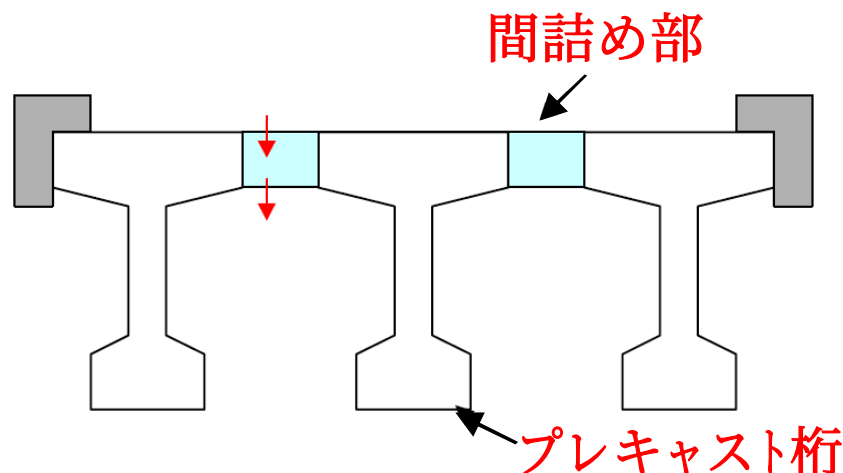
③地覆・壁高欄・横締め後打ち部



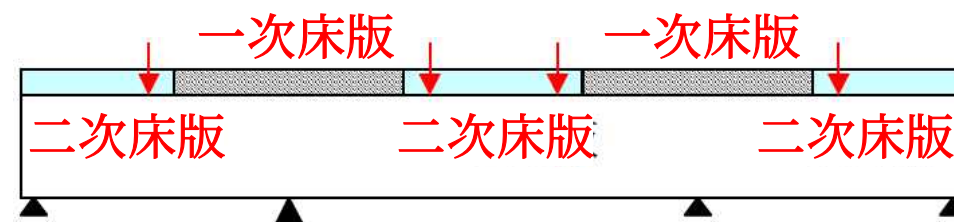
点検時着目点 (水等の浸入)

NEXCO

④プレキャスト桁床版間詰め部



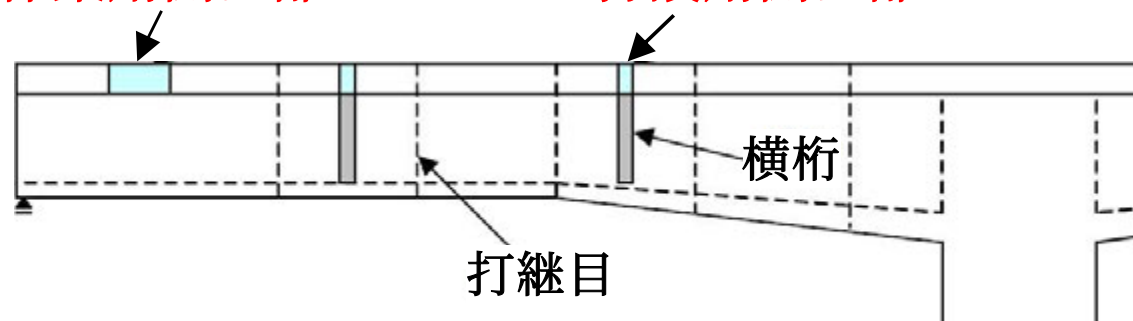
⑤連続合成桁の一次・二次床版継目部



⑥箱桁橋等の施工用開口部等

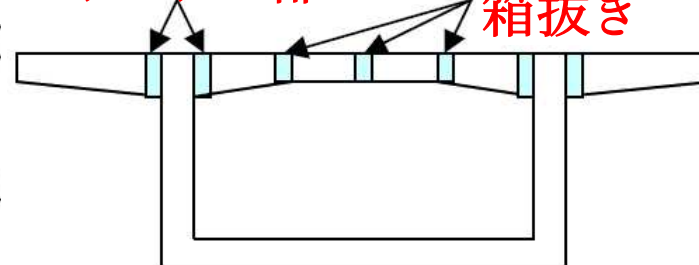
作業用開口部

打設用開口部



ワーゲン
アンカー部

型枠吊り
鋼棒用
箱抜き

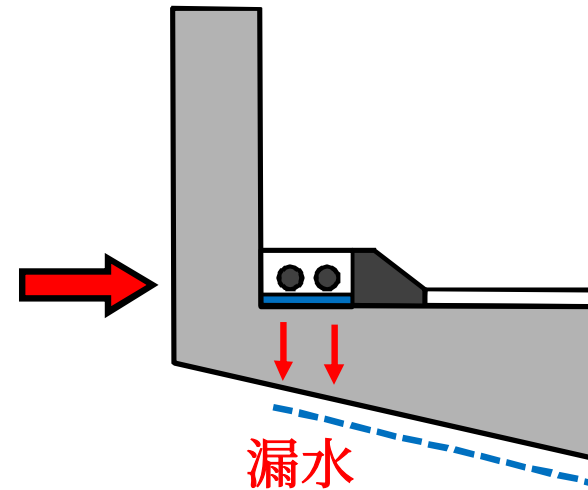


点検時着目点 (水等の浸入)

NEXCO



ハンドホールの滞水



漏水



排水マス取付部からの漏水



下フランジのPC鋼材に沿った漏水

PC橋の経年劣化事例

NEXCO

ポステン桁の床版間詰部

鉄筋のかぶり不足および水の浸入

⇒ 鉄筋の腐食・破断およびコンクリートの剥落



2000年



3年後



7年後

PC橋の経年劣化事例

NEXCO

ポステン桁の下フランジ下面

鉄筋のかぶり不足および水の浸入

⇒ コンクリートの剥落および鉄筋の腐食



コンクリートの剥落・
鉄筋腐食

断面修復
断面修復

断面修復個所にひび割れ

鉄筋の腐食による錆汁

1994年

10年後

13年後



© 2014 Central Nippon Expressway Co. Ltd. All rights reserved.

高速道路橋の維持管理の課題と高耐久化 140

PC橋の経年劣化事例

NEXCO

ポステン桁のウェブ

鉄筋のかぶり不足および水の浸入

⇒ 鉄筋の腐食およびコンクリートの剥落



1994年



10年後



13年後



コンクリート橋の点検について

NEXCO

コンクリート橋の効率的な点検方法？

対象橋梁の劣化要因の把握

- 対象橋梁の劣化要因 (塩害, 中性化, 疲労等) を想定する。
- 既往の点検結果から, 対象橋梁で影響が大きい劣化現象を想定する。
- 劣化が確認された場合は, その劣化の程度 (中性化深さ, 塩化物イオン濃度分布等) を調査する。

効率的な点検方法

- 想定された劣化要因に応じて, 点検箇所および方法を決定し効率的に実施する。
- 既往の点検結果から, 点検時の着目点を明確にして効率的に実施する。

4.6 コンクリート構造の 非破壊検査方法

強度・ひび割れ深さ

NEXCO

①コンクリートの強度

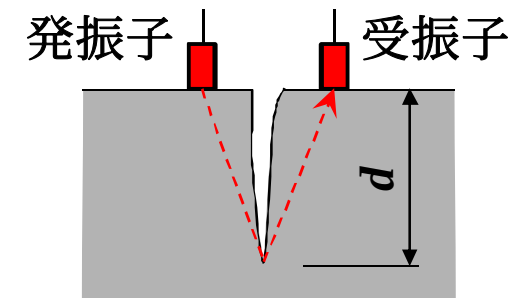
反発度法によるが、一般的にはシュミットハンマー (Schmidt Hammer) を使用している。比較的誤差が大きい。



②コンクリートのひび割れ深さ

一般的には超音波法による。特徴は以下のとおりである。

- ・コンクリート表面に設置した発振子から超音波を発振し、受振子に到達する時間からひび割れ深さを算定する。
- ・ひび割れを鉄筋等が通過している場合は、鉄筋に超音波が伝達するためひび割れ深さを過小評価する場合がある。
- ・当該コンクリートの弾性波速度を既知とする必要がある。



$$d = V_0 \times \frac{t}{2}$$

d = ひび割れの深さ(mm)

V_0 = コンクリートの弾性波速度(km/s)

t = 伝達時間(μ s)

コンクリート表面付近の変状

NEXCO

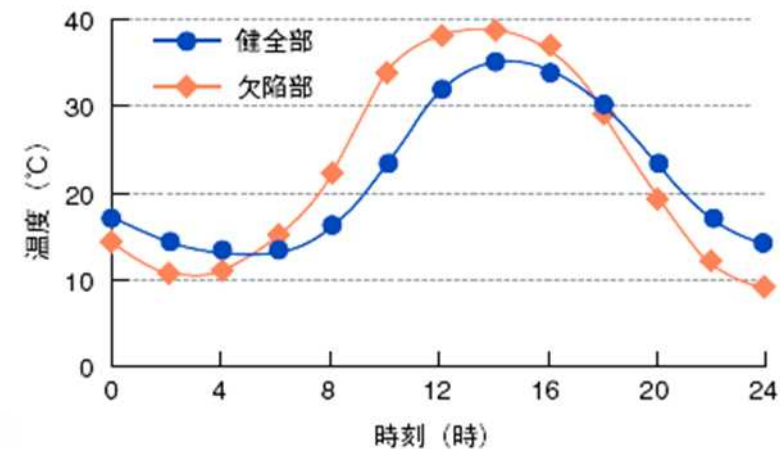
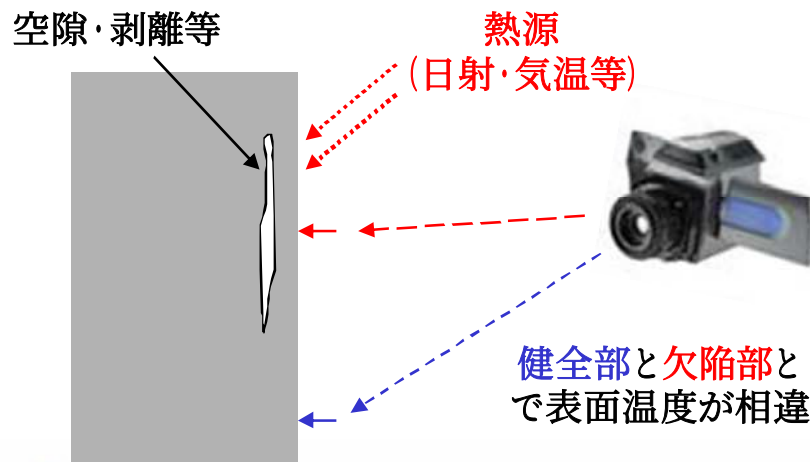
コンクリート表面から鉄筋位置付近までのコンクリートの変状 (剥離, 空洞等) には, **赤外線法 (赤外線サーモグラフィ)** が使用可能

原理

- ①すべての物体は赤外線を放射し, 温度が高い物体は強く赤外線を放射する。
- ②赤外線の放射エネルギーを計測することにより, 物体の温度が計測できる。
- ③健全部と欠陥部との温度差を計測することにより欠陥部を検知する。

特徴

- ①遠方から非接触で計測が可能。
- ②気温等による制約条件から計測可能日が制限される。

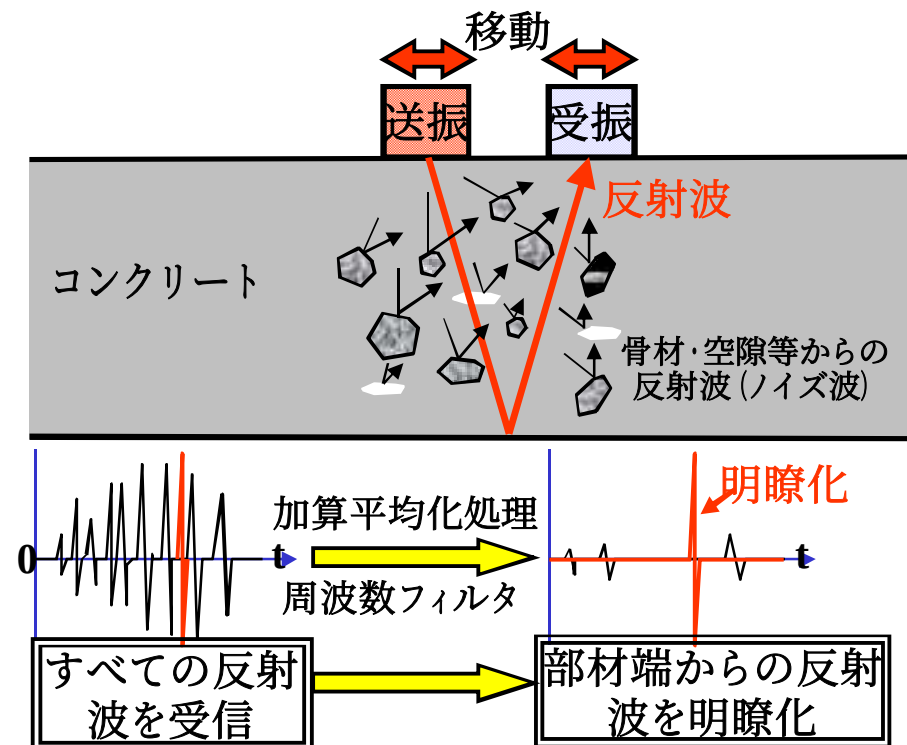


コンクリート内部の変状(広帯域超音波)

コンクリートの内部の変状(ひび割れ, 空洞等)には, 電磁波法や超音波法が使用可能であるが, 超音波法を改良した**広帯域超音波法**が比較的精度が高い。

原理

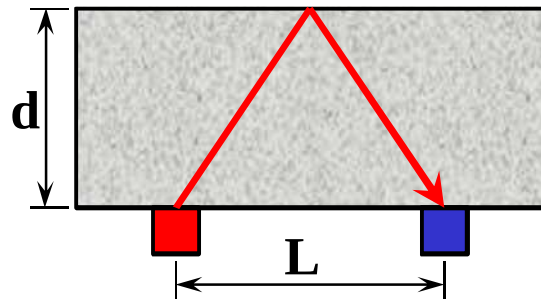
広帯域超音波法は, 超音波送振探触子を移動させながら, 広帯域の周波数の超音波をコンクリート内に透過させ, 反射波の加算平均処理を行うことにより, 骨材等による反射波の影響を受けずに探査を可能とするとともに, 受振した反射波に周波数フィルタ処理を行うことにより, 探査対象物以外からの反射波を除去して探査を可能としたもの。



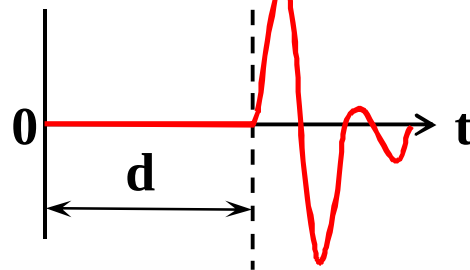
コンクリート内部の変状(広帯域超音波)

広帯域超音波法による変状の探査原理

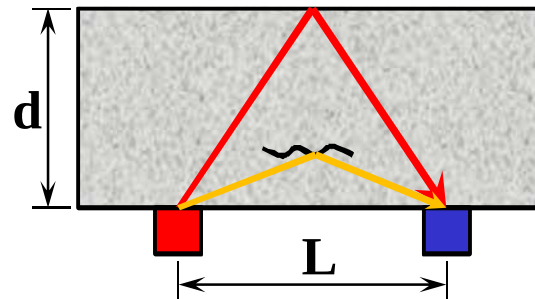
(a) 健全な場合



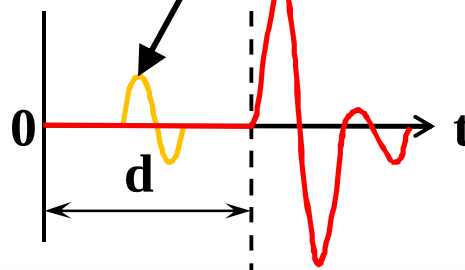
コンクリート端部からの
反射波



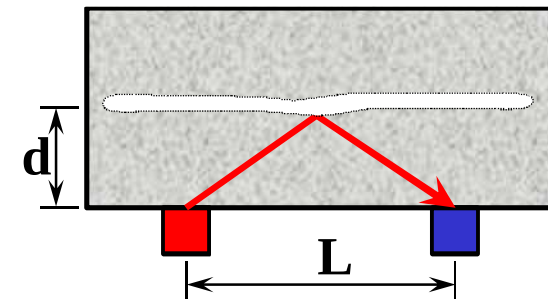
(b) 微細な空隙等がある
場合



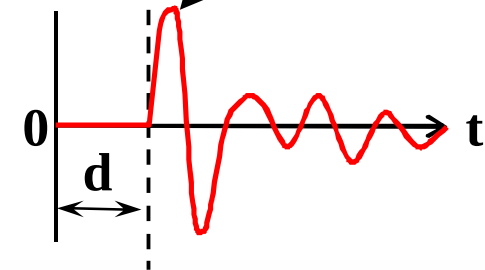
微細な割れ・空隙または鋼繊維の塊・鉄筋等からの反射波



(c) 空隙等が発生している
場合



空隙部 (充填不良・ひび割れ等)
からの反射波



鉄筋のかぶり・位置

NEXCO

コンクリート中の鉄筋のかぶりや位置の調査は、一般に**電磁誘導法**および**電磁波法**が広く用いられている。

①電磁誘導法

プローブ中のコイルから発生する磁束が、鉄筋との距離によって変化することを利用して鉄筋のかぶりと位置を計測する方法。コンクリート表面側の鉄筋のみが検出対象となる。



②電磁波法

電磁波をコンクリート表面に放射すると、コンクリート内部に浸透した電磁波はコンクリートと電気的性質が異なる鉄筋や空洞などから反射されるので、この原理を利用し電磁波が反射してくる時間から、鉄筋などの位置を計測する方法。コンクリートを伝搬する電磁波の速度（比誘電率）を把握する必要がある。



コンクリート中の鉄筋の腐食の有無

RFID方式による鉄筋腐食センサ

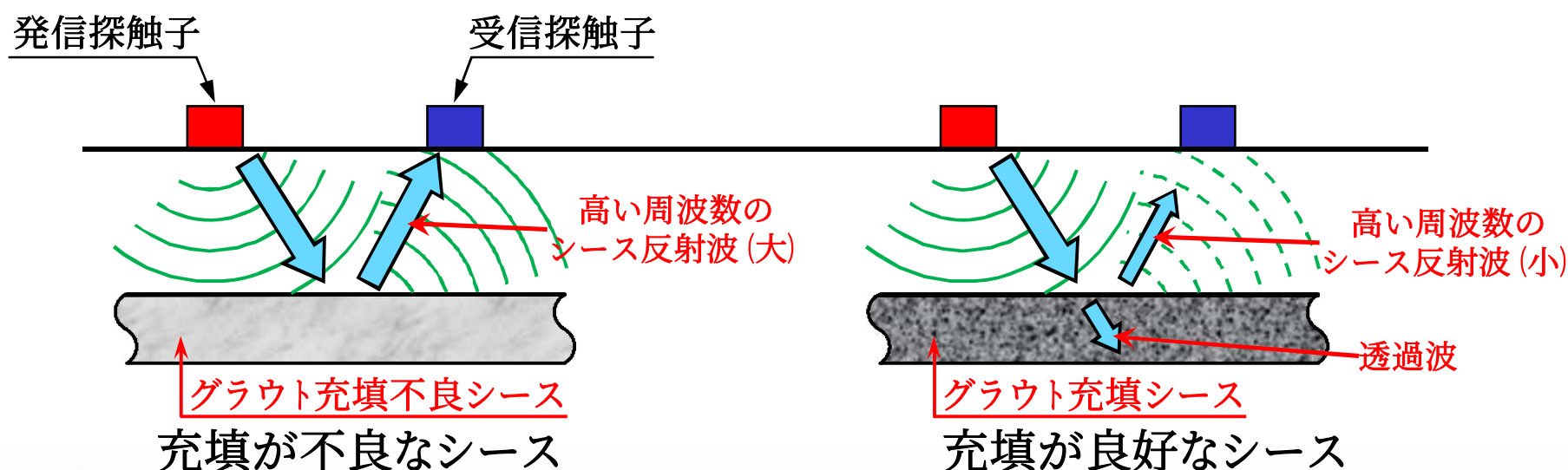
- コンクリート中の鉄筋の腐食調査は、従前までは一般に自然電位法等が広く用いられてきたが、計測値と腐食の有無との関係が水分等により変化し腐食の有無の特定が困難なケースがあった。
- **RFID (Radio Frequency Identification)** は、ID情報を埋め込んだRFタグから、電磁界や電波などを用いた近距離 (周波数帯によって数cm～数m) の無線通信によって情報をやりとりするもので、非接触IDカード (Suica等) もこれに含まれる。
- **RFID方式による鉄筋腐食センサ** は、鉄筋腐食センサおよびRFIDタグをコンクリート中に埋め込み、鉄筋の腐食の有無を無線 (非破壊) で計測するシステムである。
- ケーブル等がコンクリート表面に突出せず、電源の供給が不要 (パッシブ型) のため、従来の腐食センサと比較して極めて簡便に計測することが可能となる。

グラウト充填調査 (広帯域超音波法)

探査原理

超音波は異なる物質の界面で反射する特性があり、空洞があるとそこではほぼ全反射し大きな反射波を発生するが、密実であると反射率が低いため、反射波は小さくなる。

シーすからの反射波は高周波帯域の波が支配的であるため、グラウト充填不良シーすの場合は高周波帯域の波を受信し、充填シーすの場合は高周波帯域の波は小さくなる。グラウト充填調査は、探触子を配置し、シーすからの反射波を受信して、その特性値の差でグラウトの充填を判定する。

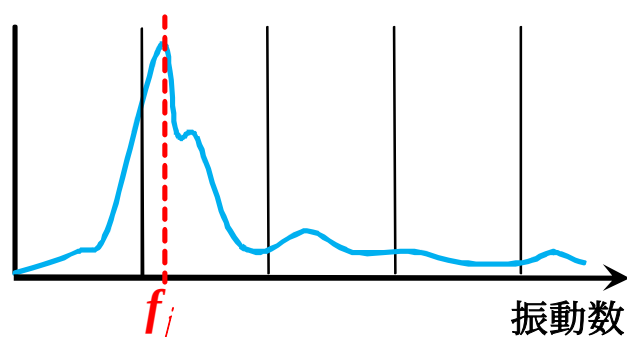


グラウト充填調査 (広帯域超音波法)

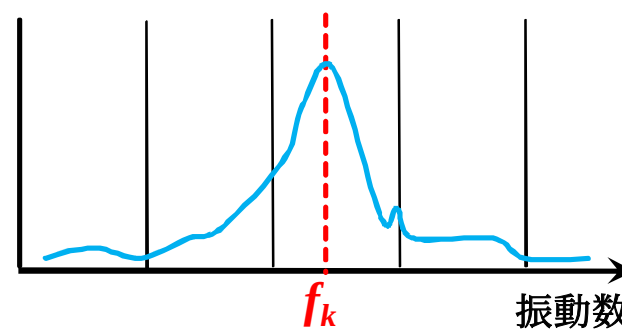
探査原理

グラウトが充填されている場合と充填不良の場合とでは、卓越スペクトルパターンが下図のように異なることが確認されている。グラウト充填不良の場合は、高い周波数帯域でピークが発生しやすい傾向があり、このパターンの差異によりグラウトの充填判定を行う。

充填判定の閾値 (振動数) はコンクリートの強度、かぶり厚、シース径などにより変動するため、探査結果のキャリブレーションを目的とした削孔調査を行い、探査精度の向上を図る。



充填良好シース卓越スペクトル



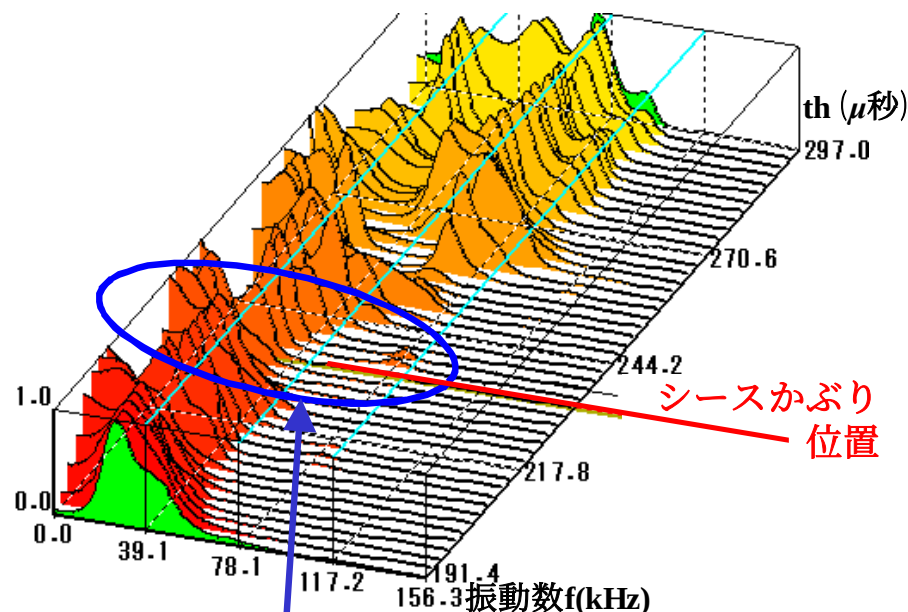
充填不良シース卓越スペクトル

スペクトルパターンの模式図

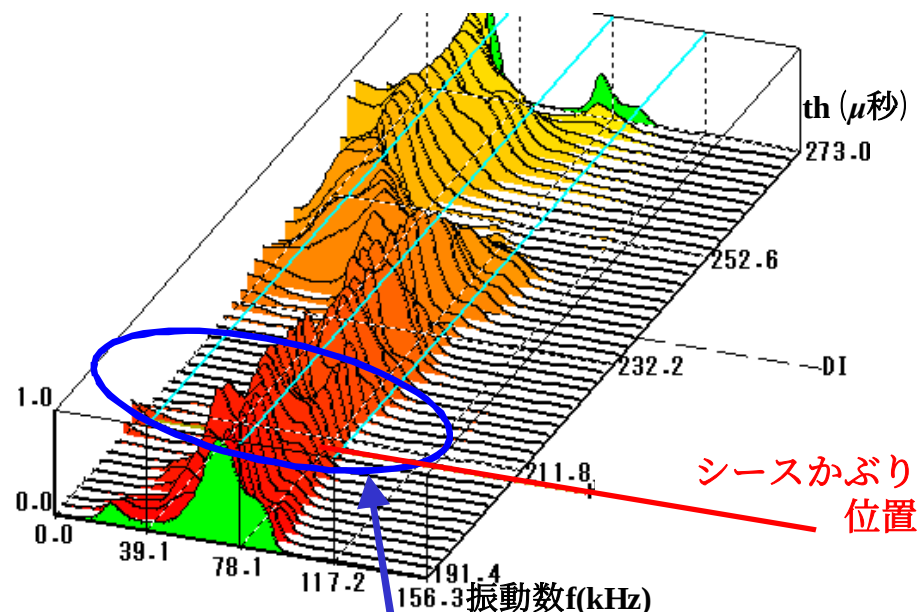
グラウト充填調査 (広帯域超音波法)

グラウト充填状況確認方法

グラウトの充填判定は、シースのかぶり位置の波形で判断する。左の波形は、周波数が低い帯域にシース反射波のピークが確認できるので充填が良好であり、右の波形は、充填判定の波形と比較して高い周波数帯域にピークが確認できるので充填が不良の可能性が高い。



グラウトの充填が良好なケース
シース反射波の卓越振動数が低い周波数領域



グラウトの充填が不良なケース
シース反射波の卓越振動数が高い周波数領域



NEXCO

中日本

© 2014 Central Nippon Expressway Co. Ltd. All rights reserved.

周波数分析による解析結果判定方法

高速道路橋の維持管理の課題と高耐久化 152

グラウト充填調査 (広帯域超音波法)

広帯域超音波装置 (事例)

項 目	仕 様
探傷周波数範囲	2.5kHz～1,000kHz
探触子印加電圧	1～500V
増幅度	20～60DB
時間軸サンプリング数	4000(最大16,000点)
サンプリング周波数	78kHz～10MHz
使用電圧	AC100V
探触子	Φ76探触子



広帯域超音波装置の事例

グラウト充填不良探查個所の処置

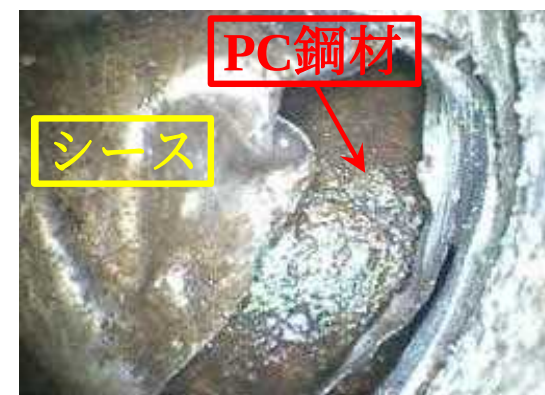
グラウト充填不良箇所は、必要に応じて削孔を行いファイバースコープで充填状況を調査する。



超音波ドリルによる削孔



ファイバースコープによる調査



シース内部の調査事例

グラウト充填調査 (削孔調査)

NEXCO

調査目的

広帯域超音波法や目視点検等により、グラウトの充填不良の可能性が高い箇所を対象として、必要に応じて削孔しシース内のグラウトの充填状況やPC鋼材の腐食状況を調査するためを行う。

調査方法

- 電磁波法等によりあらかじめ鉄筋位置やシースの位置を調査する。
- 超音波ドリル等でシース位置まで削孔する。超音波ドリルは、超音波振動をドリルの刃先に与え、切削抵抗低減効果の働きを利用して切削する構造になっており、その振動特性はコンクリートの削孔に適した周波数振動が加わるように設計されている。したがって、鋼材に対しては極端に切削能力が低下し、コンクリート内部の鉄筋やPC鋼材を傷つけることなく削孔が可能である。
- マイナスドライバー等で、PC鋼材を傷つけないように十分な注意を払ってシースを開削する。
- シース開削後、ファイバースコープにてグラウト充填状況やシースおよびPC鋼材の発錆状況を調査する。

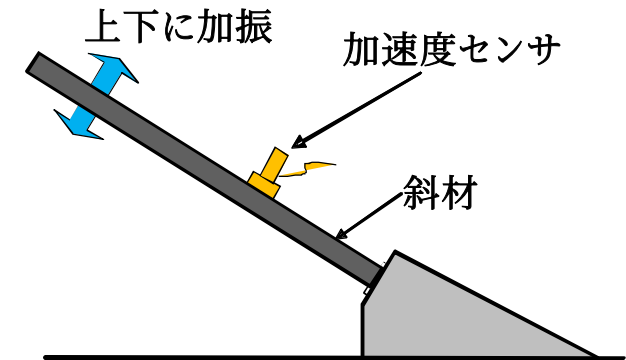
斜材・外ケーブルの張力

NEXCO

斜材・外ケーブルの張力の調査は、一般に**強制振動法**が広く用いられているが、**EMセンサ**による方法もある。

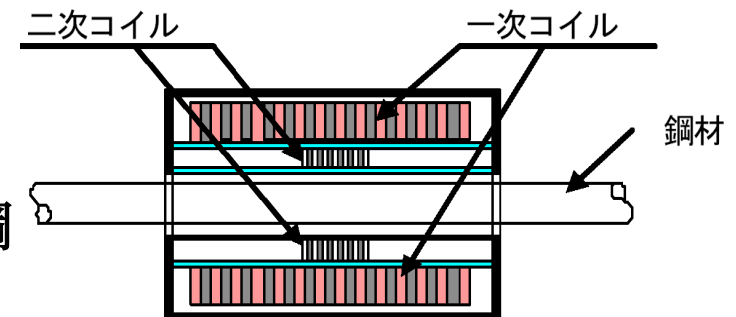
①強制振動法

強制振動法は、張力が固有振動数の関数であることを利用し、斜ケーブルの固有振動数を求めることによって、張力を間接的に求めることが方法。しかし、ケーブルダンパーなどの制振装置は固有振動数に影響を与えるため、制振装置を撤去し計測を行うことが望ましい。



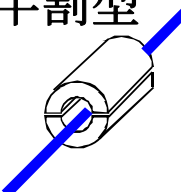
②EMセンサ (Elasto-Magnetic sensor)

張力を受ける磁性材の結晶変化と磁気特性変化が引張応力に依存することを利用したもので、無張力時の透磁率をあらかじめ測定しておくことにより、磁気特性と張力の関係から、**PC鋼材**応力の測定が可能な装置。



斜材・外ケーブルの張力 (EMセンサ)

EMセンサ (Elasto-Magnetic sensor)

	プレインストール型 (挿入型)	ポストインストール型 (後巻き型)
ボビン (芯棒部)	円筒型 	半割型 
鋼線コイル	機械巻き付け	現場巻き付け



プレインストール型

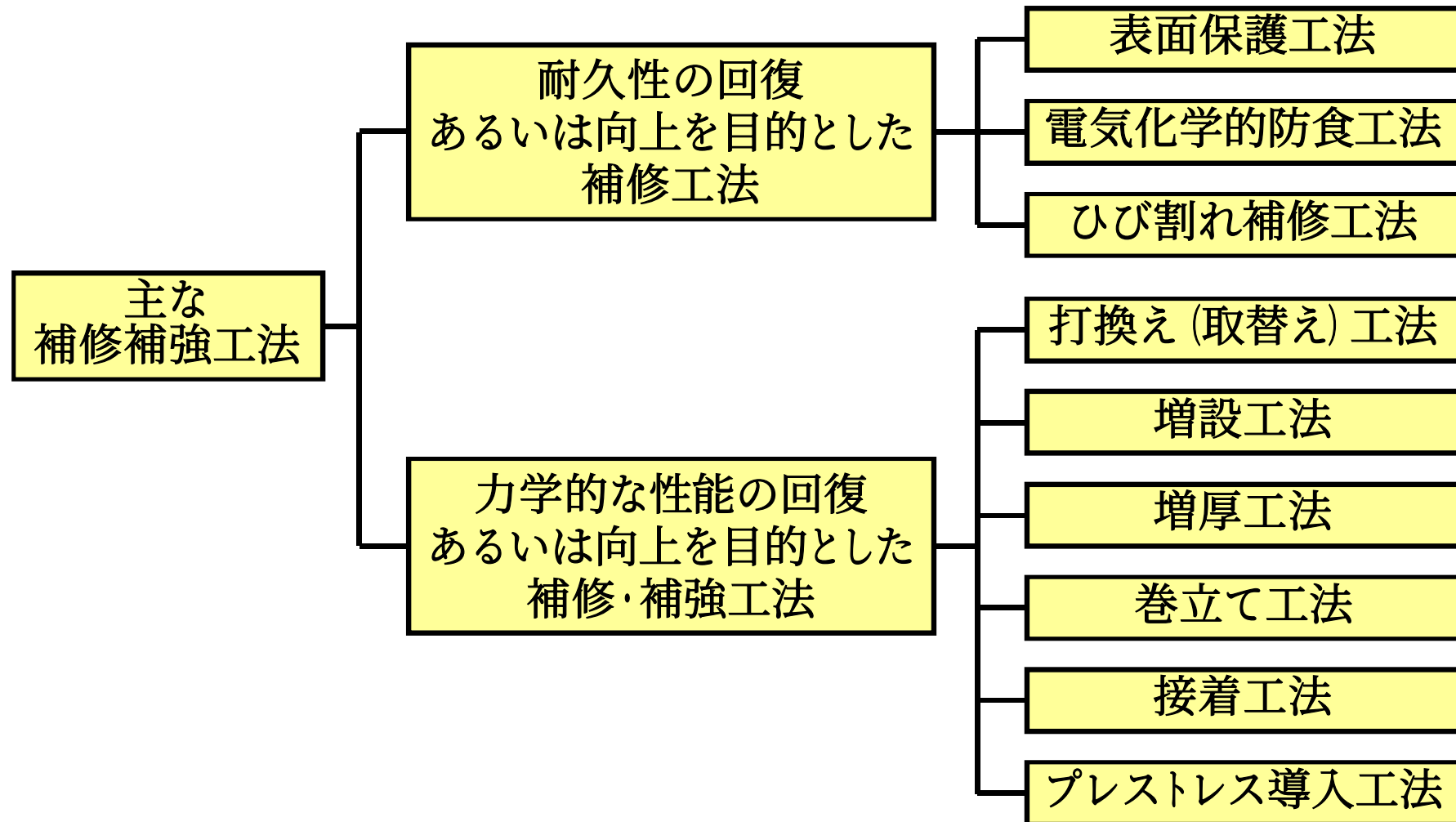


ポストインストール型

4.7 コンクリート構造の 主な補修・補強工法

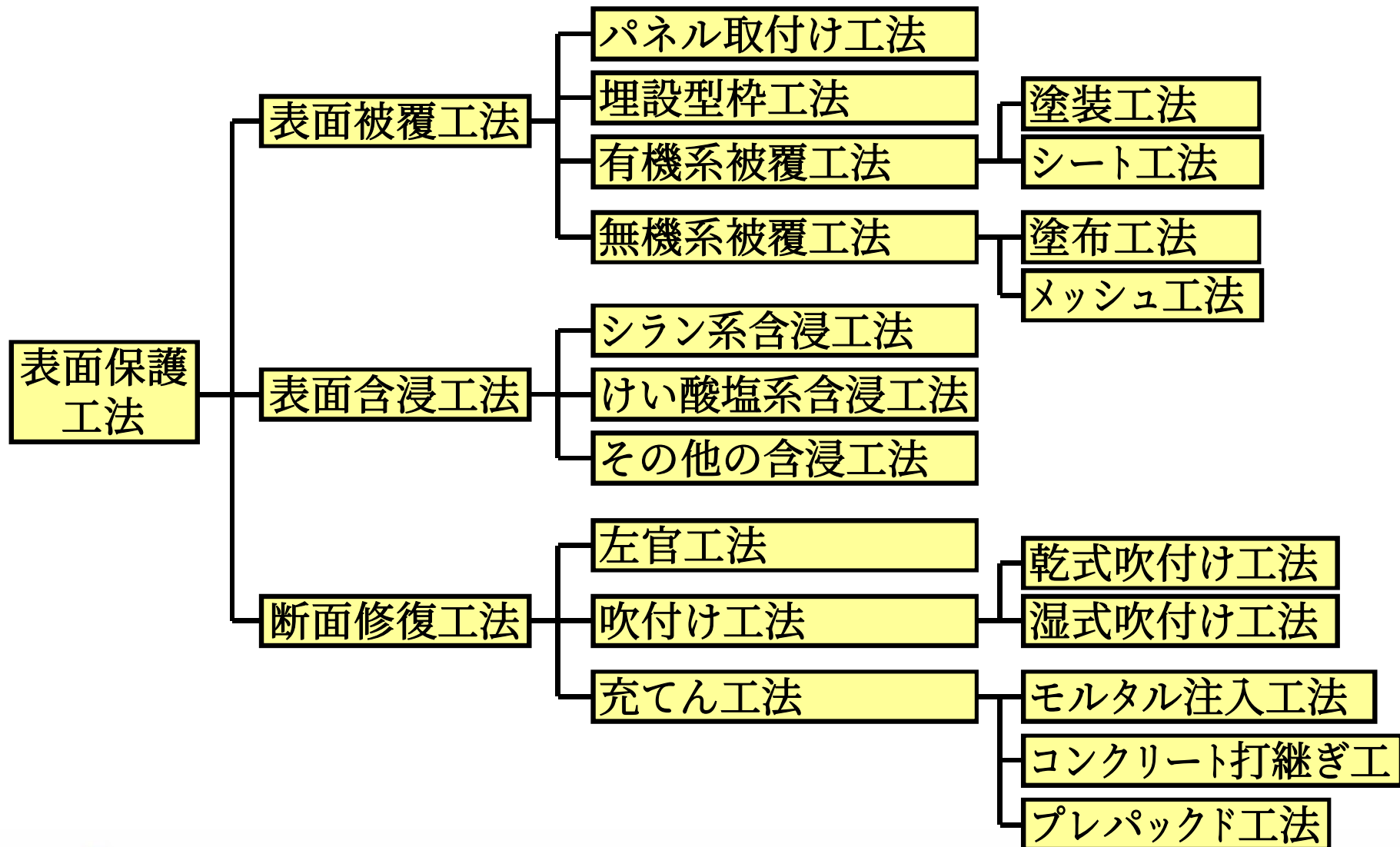
主な補修・補強工法

NEXCO



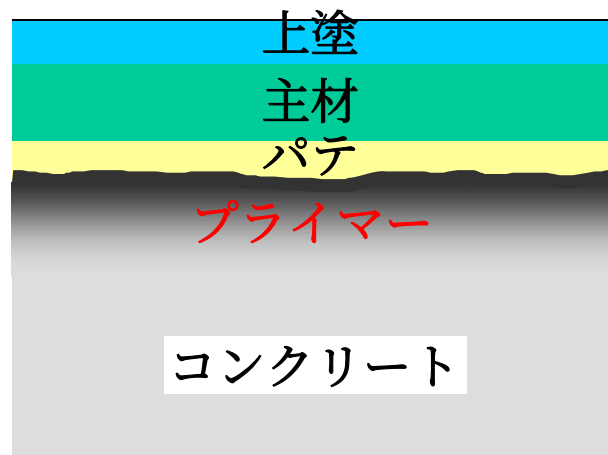
表面保護工法の種類

NEXCO

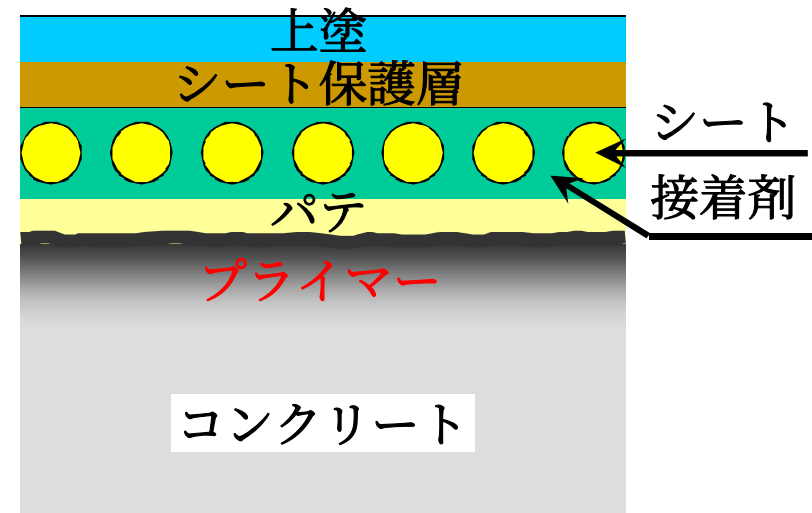


表面被覆工法(有機系被覆工法)

有機系ポリマーを主成分とする被覆材料でコンクリート表面に数100 μm から数mmの皮膜を形成し、コンクリート構造物の耐久性向上、補修、美観・景観の確保を行うもので、**塗装工法**と**シート工法**とに大別される。



塗装工法の断面事例

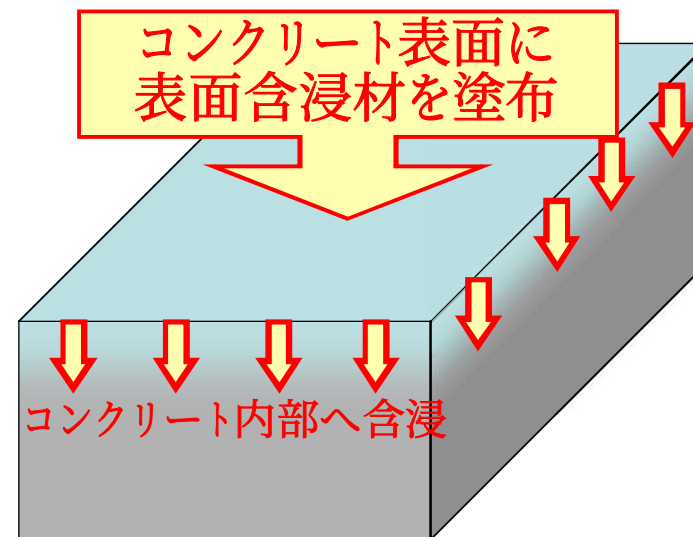


シート工法の断面事例

表面含浸工法

NEXCO

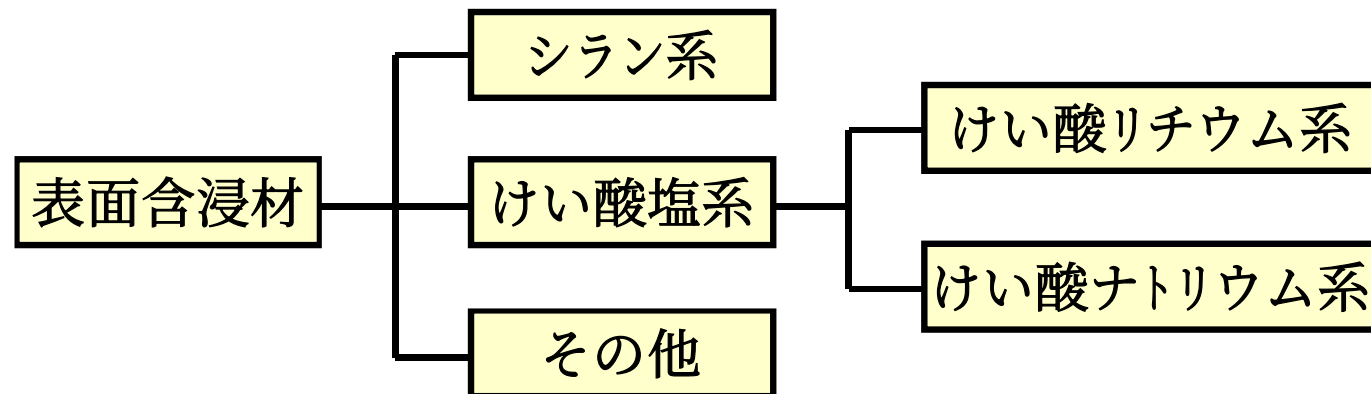
所定の効果を発揮する表面含浸材をコンクリート表面から含浸させ、コンクリート表層部の組織を改質して、コンクリート表層部への特殊機能を付与することで部材を保護し、コンクリート構造物の耐久性を向上させる工法であり、使用する表面含浸材の種類ごとに、シラン系含浸工法・けい酸塩系含浸工法・その他の含浸工法に大別される。



①土木学会の基準－表面保護工法設計施工指針(案)

表面含浸工法

NEXCO



表面含浸材の分類

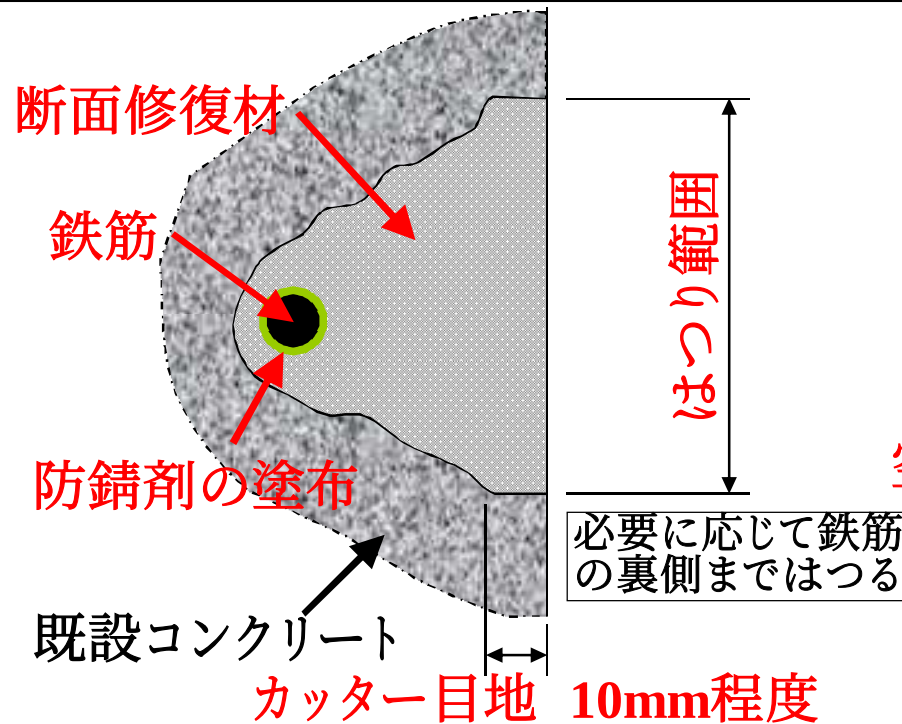
表面含浸材の機能

含浸材の種類	機能
シラン系	浸透性吸水防止材とも称され、コンクリート表層部に含浸させることにより吸水防止層を形成し、外部からの水や塩化物イオンの浸入を抑制する。
けい酸リチウム系	浸透性固化材や浸透性アルカリ付与材とも称され、コンクリート表層部に含浸させることにより、ぜい弱なコンクリート表層部を固化したり、中性化したコンクリート表層部にアルカリ性を付与して鉄筋の腐食環境を改善する。
けい酸ナトリウム系	浸透性固化材や浸透性防水材料、あるいはコンクリート改質材とも称され、コンクリート表層部に含浸させることにより、細孔内部に不溶性の結晶体を生成し、外部からの水や炭酸ガスの侵入を抑制したり、中性化したコンクリート表層部にアルカリ性を付与して鉄筋の腐食環境を改善する。

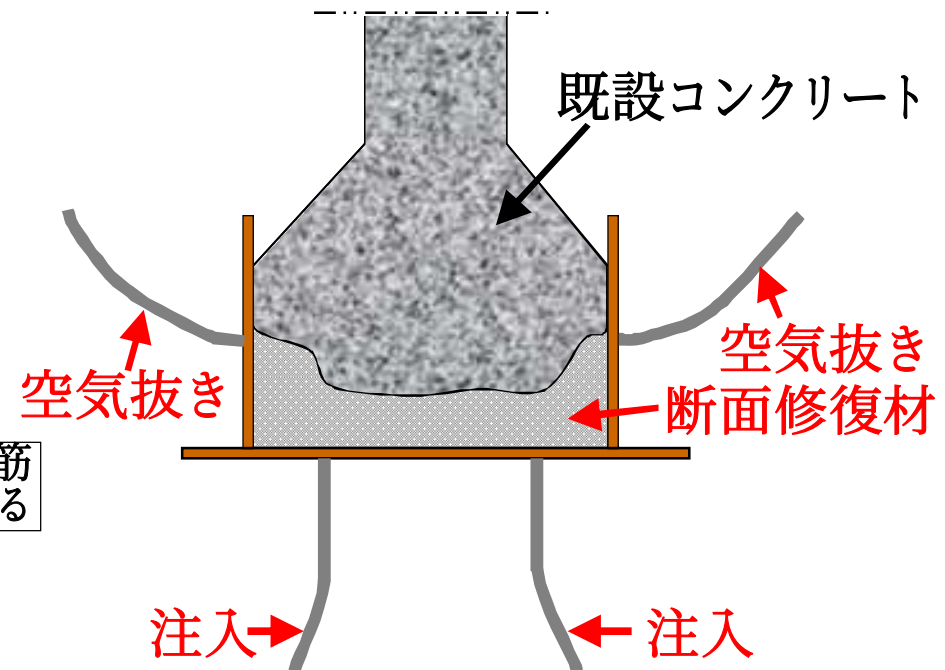
断面修復工法

NEXCO

コンクリート構造物の**耐久性の向上**，**劣化の抑制**または**補修を目的**として，コンクリートの劣化，鋼材の腐食，その他の原因によって欠損したコンクリート断面または劣化因子を含むコンクリート部分を除去した後の断面修復部を，その**当初の性能および形状寸法に戻すために用いられる工法**である。



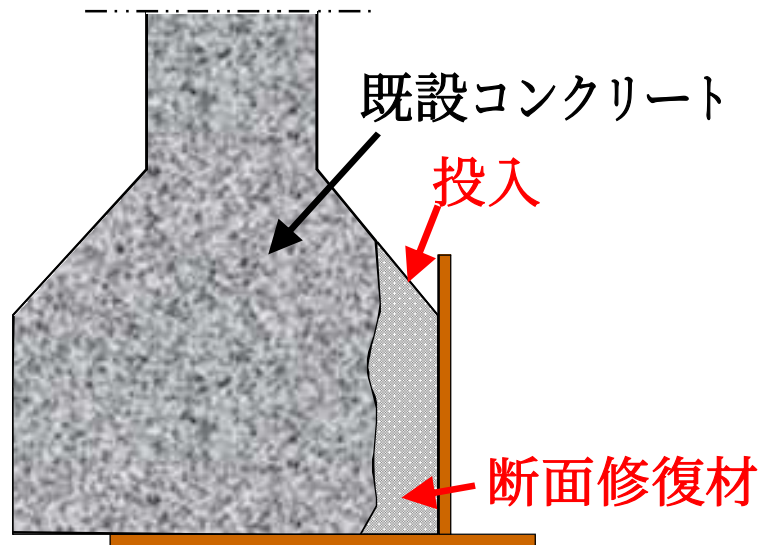
(a) 左官工法



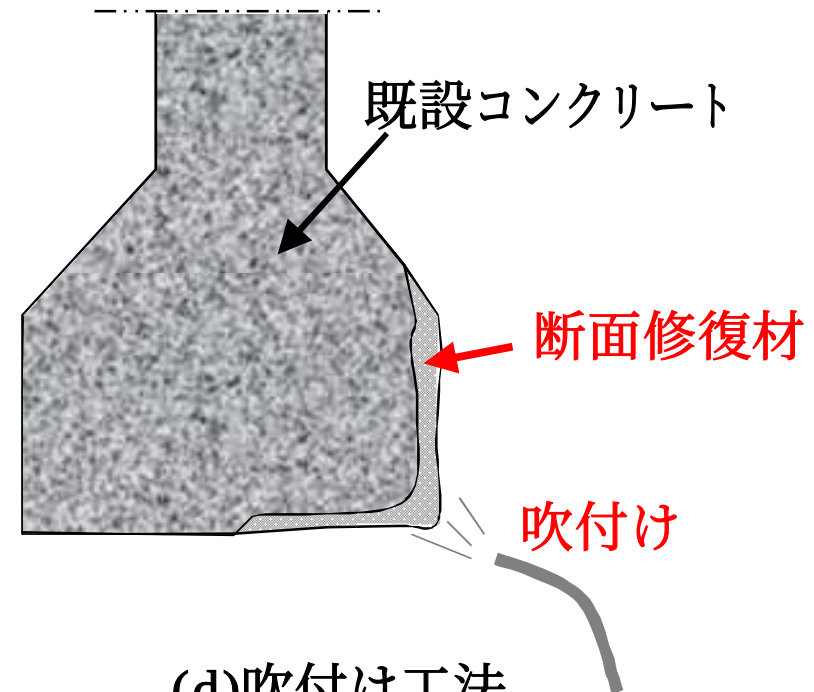
(b) 打込み工法(プレパクトコンクリート)

断面修復工法

NEXCO



(c) 打込み工法(打継ぎコンクリート)



(d) 吹付け工法

断面修復工法

NEXCO



左官工法



吹付け工法



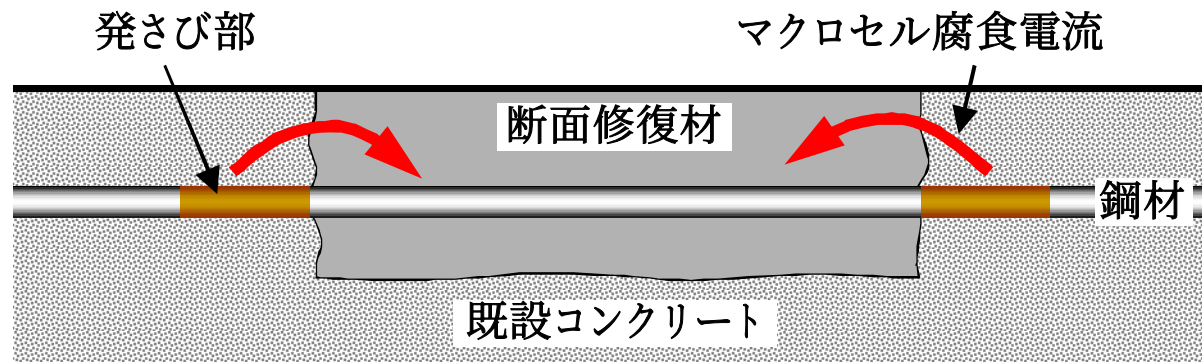
打込み工法

断面修復工法の留意点

NEXCO

鋼材が腐食している場合の補修の留意点

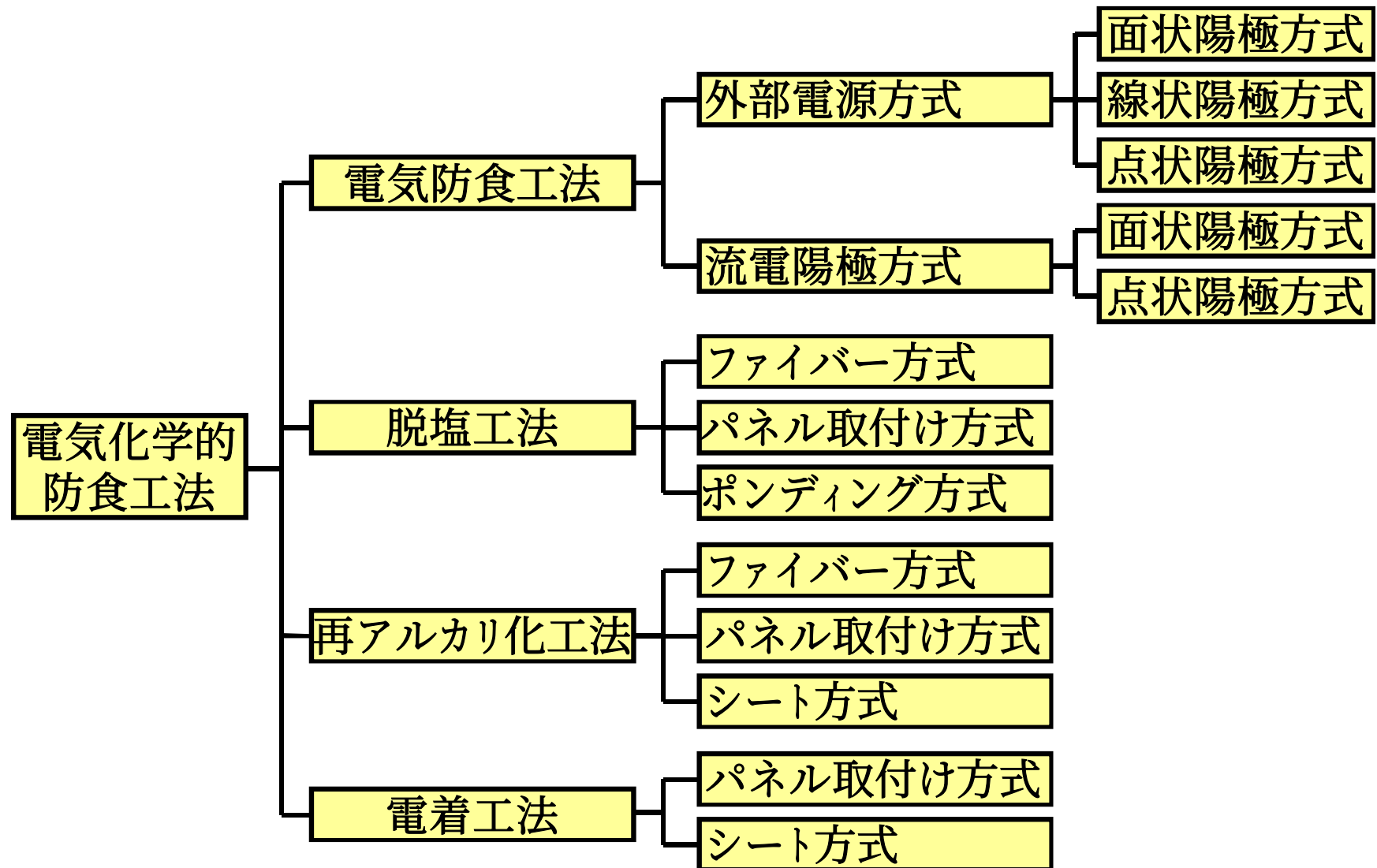
- ①腐食した鋼材の錆を完全に除去し、防錆材(亜硝酸リチウム等)を塗布する。
- ②鋼材の断面欠損が著しい場合には、新たに鋼材を追加する。
- ③ひび割れが発生していない部分の鋼材も腐食していることが多いので、この部分も含めて補修する。
- ④ひび割れが進行性の場合は、変形追従性の大きい補修材料を使用する。
- ⑤断面の修復範囲の決定にあたっては、マクロセル腐食により修復範囲周辺の劣化の進行が加速する可能性があるため、十分な検討が必要となる。



マクロセル腐食

電気化学的防食工法の種類

NEXCO



電気化学的防食工法の特徴

NEXCO

電気化学的防食工法は、**コンクリート内部の鉄筋等の鋼材を陰極**とし、**コンクリート表面近傍に設けた陽極**を通じてコンクリート中に直流電流を流すことにより、**コンクリート中の鋼材腐食に伴う劣化を防止する工法**である。電気化学的防食工法としては、一般に**電気防食工法**、**脱塩工法**、**再アルカリ化工法**、**電着工法**がある。

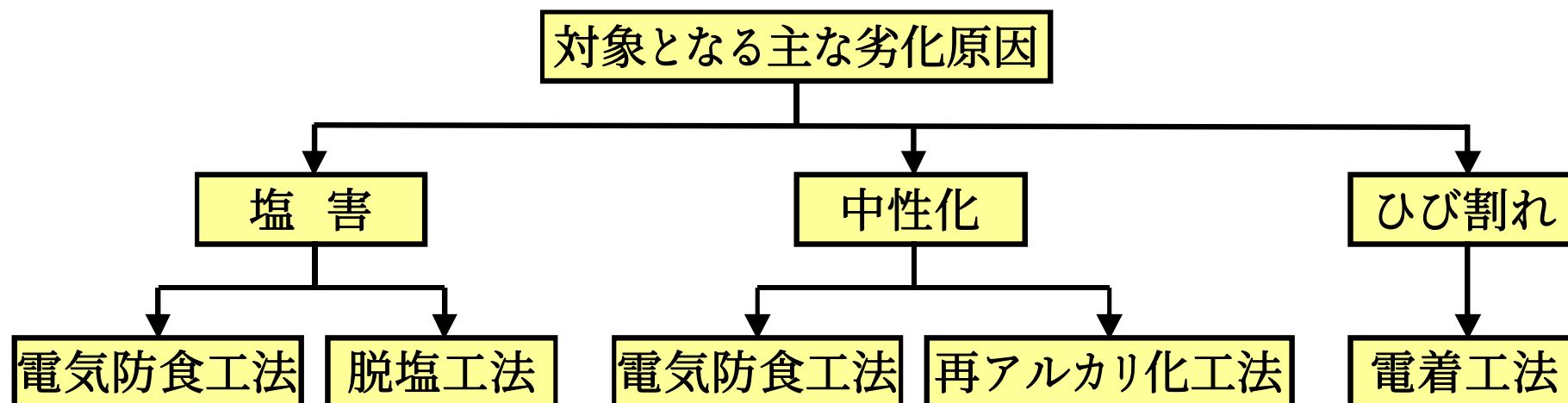
項 目	電気防食工法	脱塩工法	再アルカリ化工法	電着工法
効 果	継続的な通電を行い、鋼材の腐食反応を電気化学的に制御する。	仮設陽極に通電を行い、塩化物イオンを電気化学的に除去もしくは低減する。	仮設陽極に通電を行い、電気化学的にアルカリ性を再付与する。	仮設陽極に通電を行い、無機系物質の電着物を電気化学的に析出させ、ひび割れの閉塞や緻密化を図る。
通電期間	防食期間中継続	約8週間	約1～2週間	約6ヶ月間
電流密度	0.001～0.03A/m ²	1 A/m ²	1 A/m ²	0.5～1A/m ²
通電電圧	1～5V	5～50V	5～50V	10～30V
電 解 液	—	Ca (OH) ₂ 水溶液等	Na ₂ CO ₃ 水溶液等	海水
効果確認の方法	電位または電位変化量の測定	コンクリートの塩化物イオン量の測定	コンクリートの中性化深さの測定	コンクリートの透水係数の測定
効果確認の頻度	数回／年	通電終了後	通電終了後	通電終了後

効果と選定方法

NEXCO

電気化学的防食工法の目的と主な効果

名 称	防 食 対 策	期待される主な効果
電気防食工法	腐食反応の抑制	腐食電池の抑制
脱塩工法	鋼材の腐食環境の改善	塩化物イオン濃度の低減
再アルカリ化工法		アルカリ性の回復
電着工法	腐食因子の供給低減	ひび割れの閉塞と緻密化

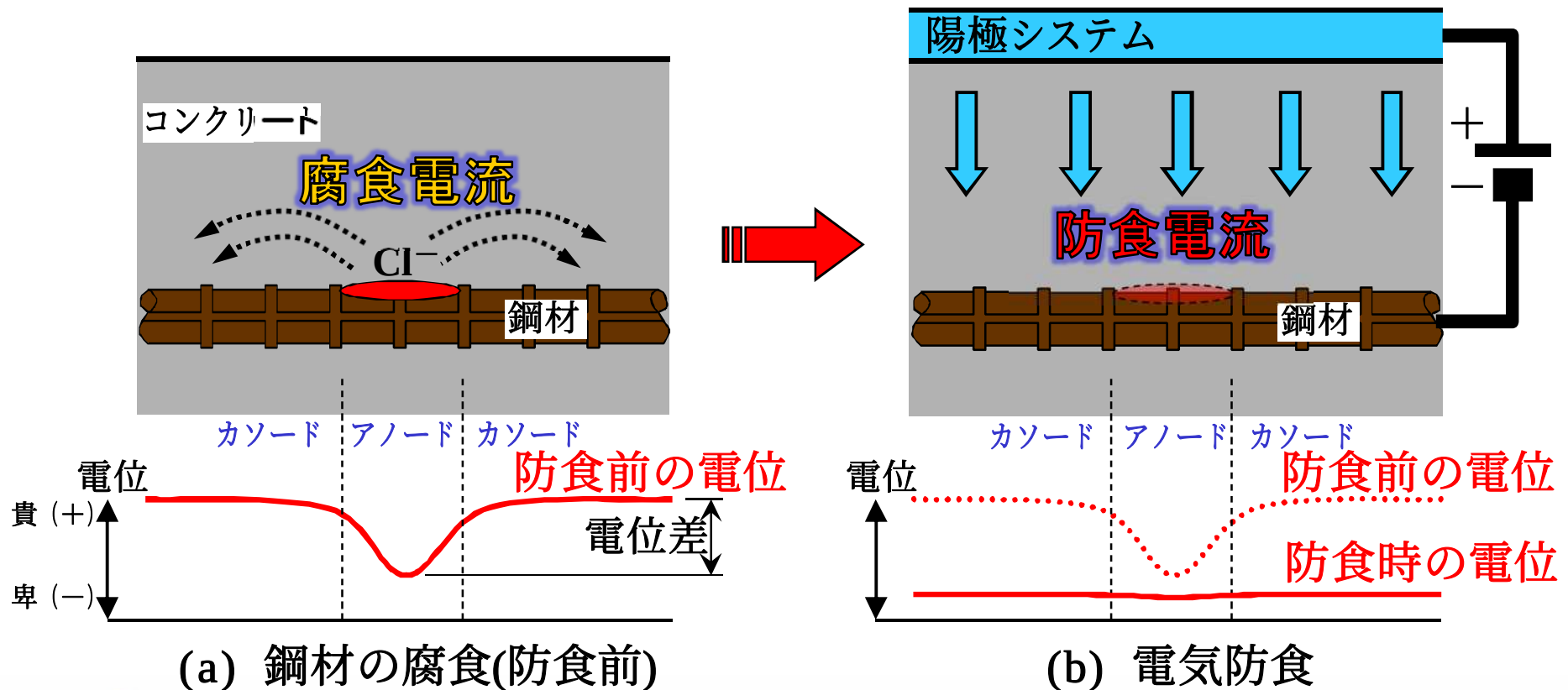


電気化学的防食工法の選定

電気防食工法の概要

NEXCO

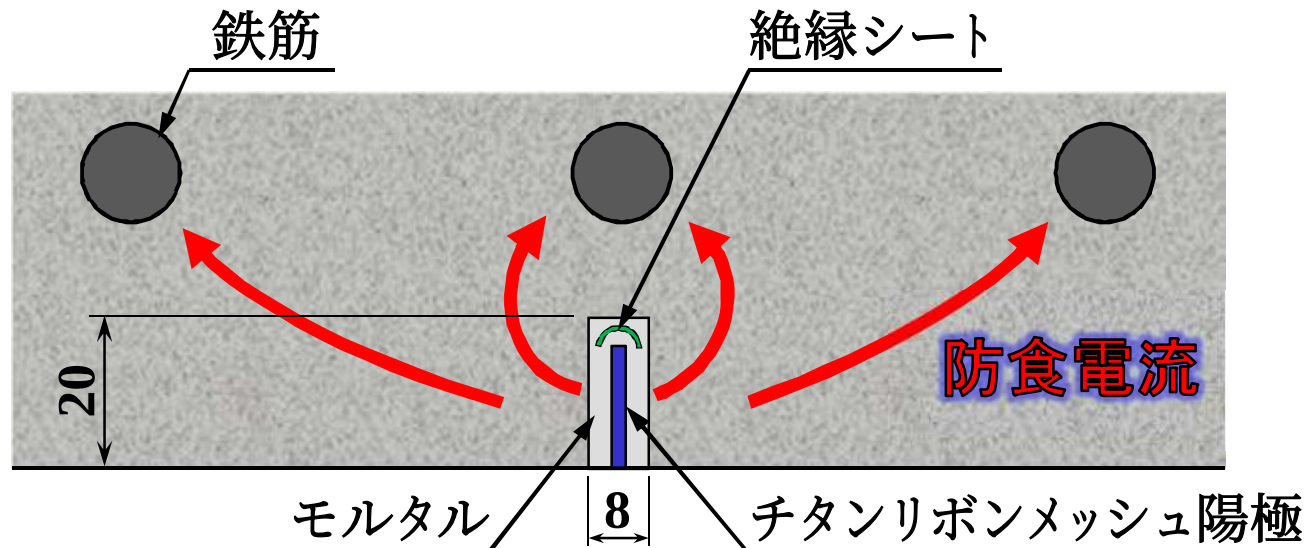
電気防食工法は、コンクリートに設置した陽極システムから鋼材へ電流を流すことにより鋼材の電位をマイナス方向へ変化させ、鋼材の腐食を電気化学的に抑制する工法である。



電気防食工法の事例

NEXCO

・チタンリボンメッシュ方式 (外部電源: 線状陽極)



陽極配置概要図

陽極設置手順

- ① 溝切りはつり : 溝切り幅が小さく目視での深さ確認が困難な場合は、定尺棒等を用いて深さ確認を行う。
- ② 溝内点検 : 溝内に金属片が存在すると電気が短絡するので、金属片探査器等を用い撤去あるいは絶縁処理を施す。
- ③ 陽極設置

電気防食工法の事例

NEXCO



陽極設置用溝切り



溝内点検



リボンメッシュ陽極

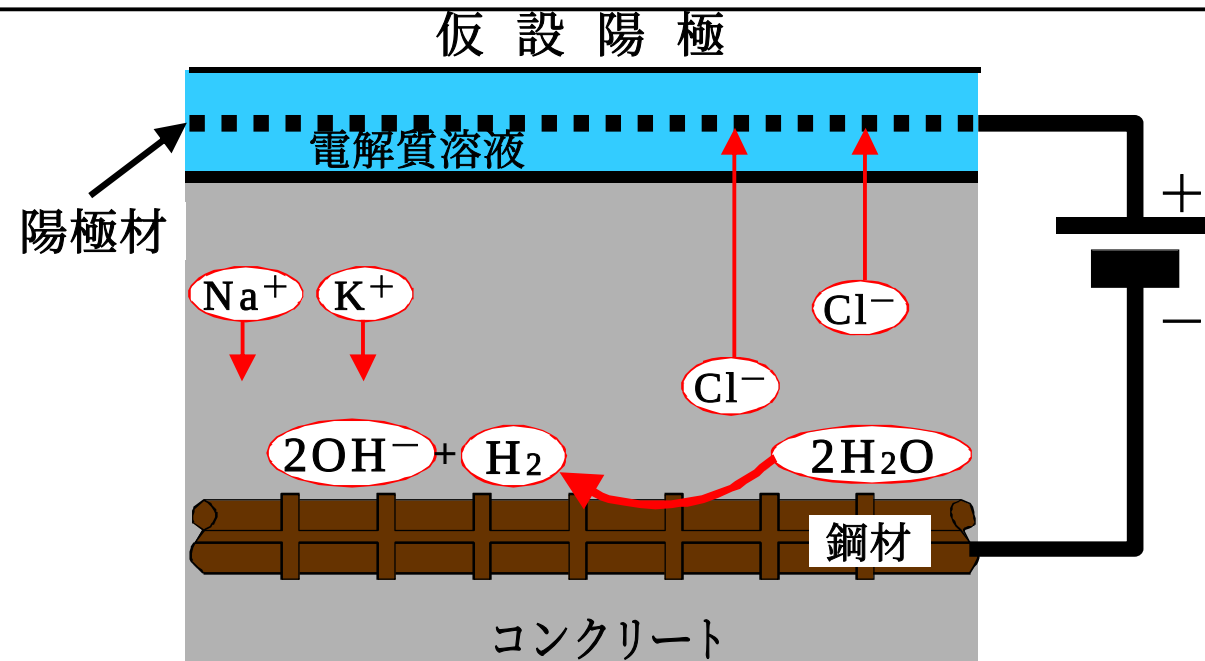


陽極設置

脱塩工法の概要

NEXCO

脱塩工法は、コンクリートの表面に電解質溶液と陽極材からなる陽極電極を仮設し、鋼材との間に直流電流を一定期間のみ流し、電気泳動の原理で塩化物イオンをコンクリート外に抽出する工法である。

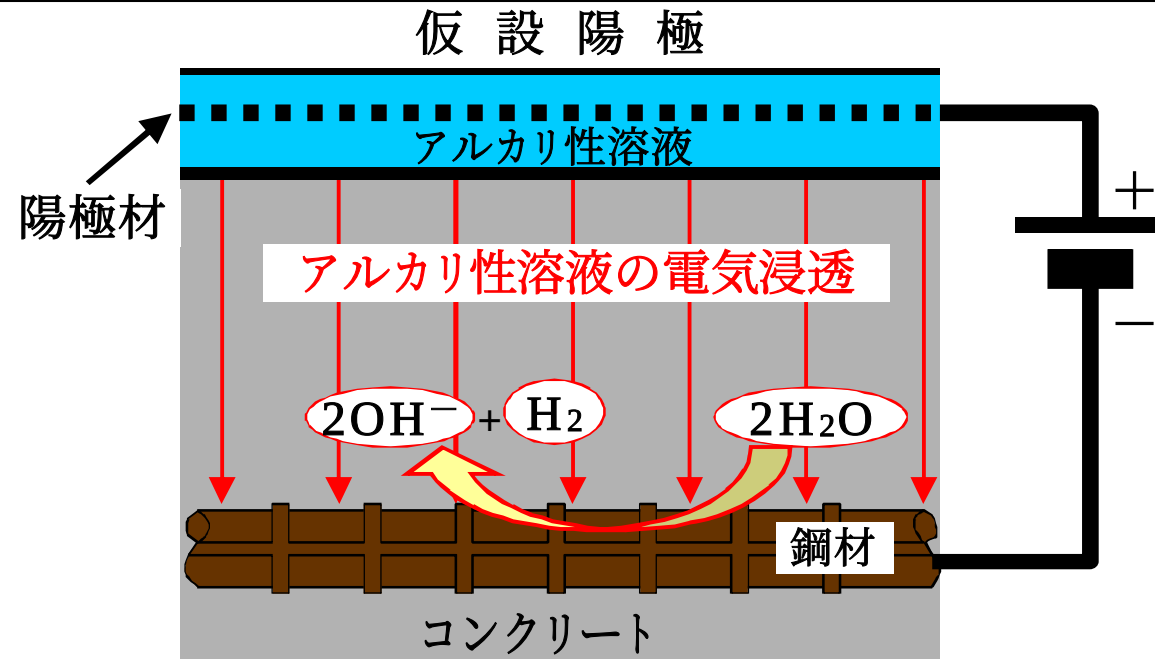


過去の事例からは、脱塩処理を適切に行っても、塩化物イオンを100%除去することはできず、多少なりとも塩化物イオンが残存することが確認されている。また、陰極となる鋼材より深い位置に存在する塩化物イオンを脱塩することは困難である。

再アルカリ化工法の概要

NEXCO

再アルカリ化工法は、コンクリートの表面にアルカリ性の電解質溶液、陽極材、保持材からなる陽極電極を仮設し、鋼材との間に直流電流を一定期間流すことで、コンクリートへアルカリ性の電解質溶液を電気浸透させ、中性化しているコンクリートのアルカリ性を回復させる工法である。

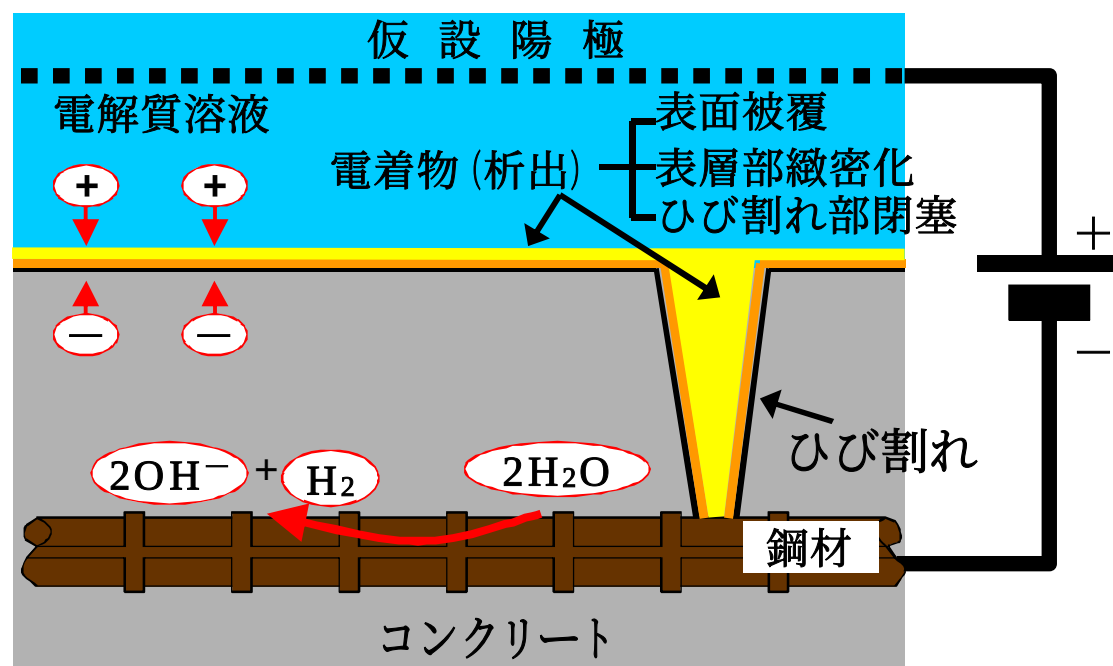


PC構造物に脱塩工法および再アルカリ化工法を適用する場合は、PC鋼材の水素脆化に対する注意が必要となる。

電着工法の概要

NEXCO

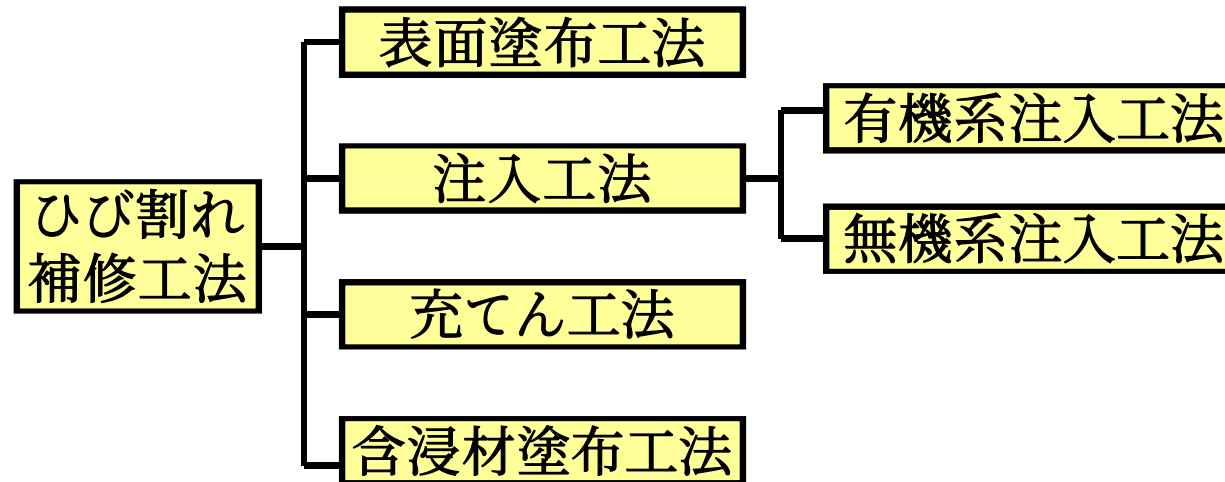
電着工法は、コンクリート構造物に埋設されている鋼材を陰極とし、電解質溶液を介して仮設陽極との間に直流電流を一定期間のみ流すことによって、コンクリート構造物表面に不溶性無機系物質の電着物を析出させる工法である。



電着工法においては、電解質溶液中（海水などの自然水や人工海水等）のカルシウム・マグネシウムイオンが、電気泳動によりコンクリート表面・表層部の空隙・ひび割れ内部に移動し、炭酸カルシウムや水酸化マグネシウムなどの電着物となって析出される。

ひび割れ補修工法の種類

NEXCO



- ①コンクリートに発生するひび割れには、進行性のひび割れと非進行性のひび割れがある。
- ②セメントの水和に伴うひび割れやコンクリートの沈下・ブリーディング、不適切な施工等によるひび割れは、施工中または竣工後の早い時点でひび割れが顕在し、数年以内に収束すると考えられる非進行性のものであるので、ひび割れ補修工法のみで補修を行うことも可能である。
- ③鋼材の腐食に起因するひび割れやアルカリシリカ反応によるひび割れ、荷重の繰返しに起因するひび割れなどの進行性のひび割れは、他の補修工法と併用してひび割れ補修工法を行う必要がある。

ひび割れ補修工法の概要

NEXCO

①表面塗布工法

微細なひび割れ(一般に幅0.2mm以下)の上に塗膜を構成させ、防水性や耐久性を向上させる目的で行われる工法で、ひび割れのみを被覆する方法である。

②注入工法

一般に幅0.15～1mm程度のひび割れに有機系(アクリル樹脂・エポキシ樹脂等)または無機系(セメント系等)の材料を注入して、防水性や耐久性を向上させる目的で行われる工法である。

③充てん工法

一般に0.5～1mm程度以上の比較的大きな幅のひび割れでかつ鋼材が腐食していない場合の補修に適する工法で、ひび割れに沿ってU字型にカットし、その部分に補修材を充てんする工法である。

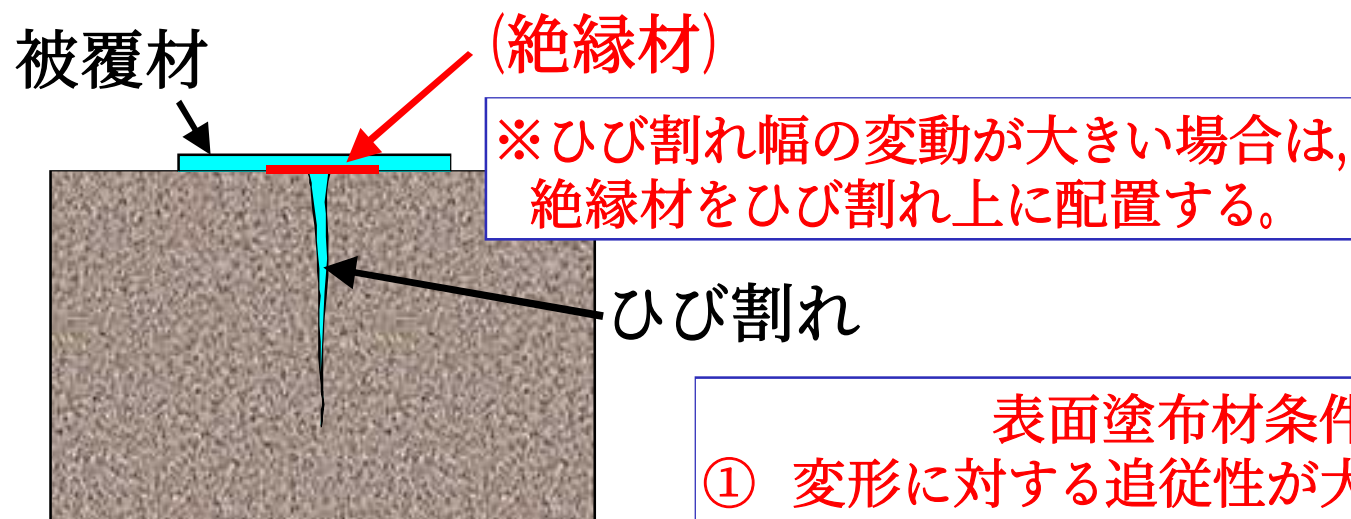
④含浸材塗布工法

微細なひび割れ(一般に幅0.2mm以下)に対して、注入器具または圧入器具等を用いず、ひび割れに含浸材(アクリル樹脂・エポキシ樹脂等)を含浸、固化することにより、ひび割れ注入と同等の性能となるように補修する工法である。

表面塗布工法

NEXCO

微細なひび割れ(一般に幅0.2mm以下)の上に塗膜を構成させ、防水性や耐久性を向上させる目的で行われる工法



表面塗布工法概要図

表面塗布材条件

- ① 変形に対する追従性が大きい
- ② コンクリートとの接着性に優れている。

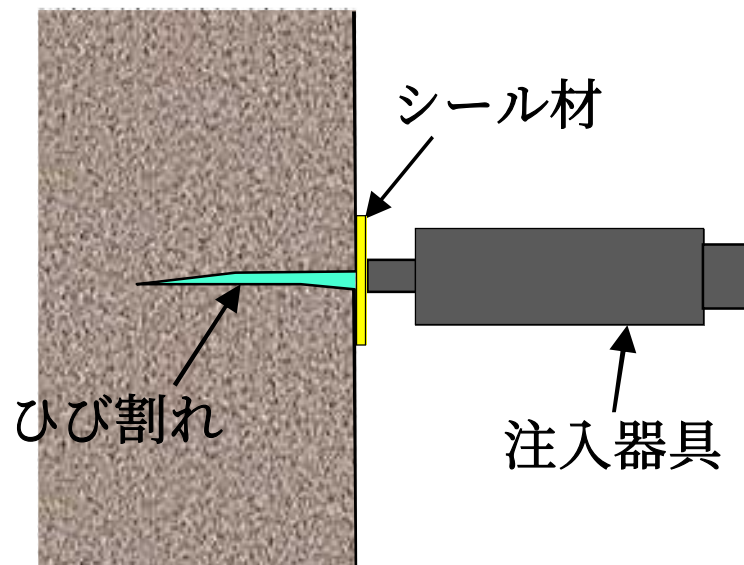
一般的に使用される材料 : シリコン樹脂, ウレタン樹脂

ひび割れ幅の変動がない場合 : ポリマーセメントモルタル等

注入工法

NEXCO

幅0.15～1mm程度のひび割れに有機系(アクリル樹脂・エポキシ樹脂等)または無機系(セメント系等)の材料を注入して, 防水性や耐久性を向上させる目的で行われる工法



注入工法概要図



注入工法実施状況

4.8 コンクリート橋の高耐久化の方策

コンクリート橋の高耐久化のための方策は何か？

速やかな対策

- 中性化や塩害等による劣化を放置した場合は、劣化が急速に進行し、補修補強の費用も増大する。
- PC鋼材の劣化を放置した場合は、PC鋼材の破断により耐荷力の減少や落橋の可能性が増大する。

診断（点検）技術者の育成及び配置

- コンクリート橋の構造や劣化要因を理解し、効率的な診断を実施できる技術者を配置する必要がある。

5. 橋梁の高耐久化の方策

維持管理の課題

NEXCO

経年化により
劣化の発生および進行が増大する

点検・診断・補修補強を適切に実施する。

・確実な点検頻度の確保

(見る)

点検の制度化

・損傷の確実な発見・評価

(見過ごさない)

診断技術

・確実な補修・補強

(先送りしない)

対策方法

橋梁の高耐久化

診断(点検)技術の向上

NEXCO

変状を見過ごさずに適正に評価できる規準・技術者

診断 (点検) 規準の確立

- 効率的に診断できる規準の作成
 - ・ 劣化要因の把握
 - ・ 効率的な点検のための点検時の着目点
 - ・ 点検結果の評価方法
- 効率的な非破壊検査等の点検技術の開発
 - ・ 変状を適正に調査できる手法の開発 (Ex. PC鋼材の変状, 鋼材の亀裂)
 - ・ 近接目視点検困難箇所の効率的な点検手法の開発
- 診断結果のデータベース化および見える化

診断 (点検) 技術者の育成及び配置

- 対象橋梁の構造や劣化要因を理解し、効率的な診断を実施できる技術者を配置する必要がある。

確実な対策(補修・補強)

NEXCO

LCCの最小化を目指した確実な補修・補強の実施

補修・補強規準の確立

- 種々の変状に対応できる補修・補強工法の明文化
- LCCの最小化が可能となる対策方法および時期の明確化
- 補修・補強結果のデータベース化および見える化

補修・補強をマネジメントできる技術者の育成及び配置

- 対象橋梁の構造や劣化要因を理解し、効率的な補修・補強を実施できる技術者を配置する必要がある。

補修・補強工事が効率的に実施できる体制の構築

- 補修・補強が速やかに実施できる契約方法や実施体制の検討
- サプライチェーン・マネジメント (Supply Chain Management : SCM) の実施。