疲労亀裂の特徴と
応力測定実務

小野 秀一（施工技術総合研究所）

第24回鋼構造基礎講座
「鋼橋の維持管理－疲労き裂の発見～調査･原因究明～補修補強の実務」

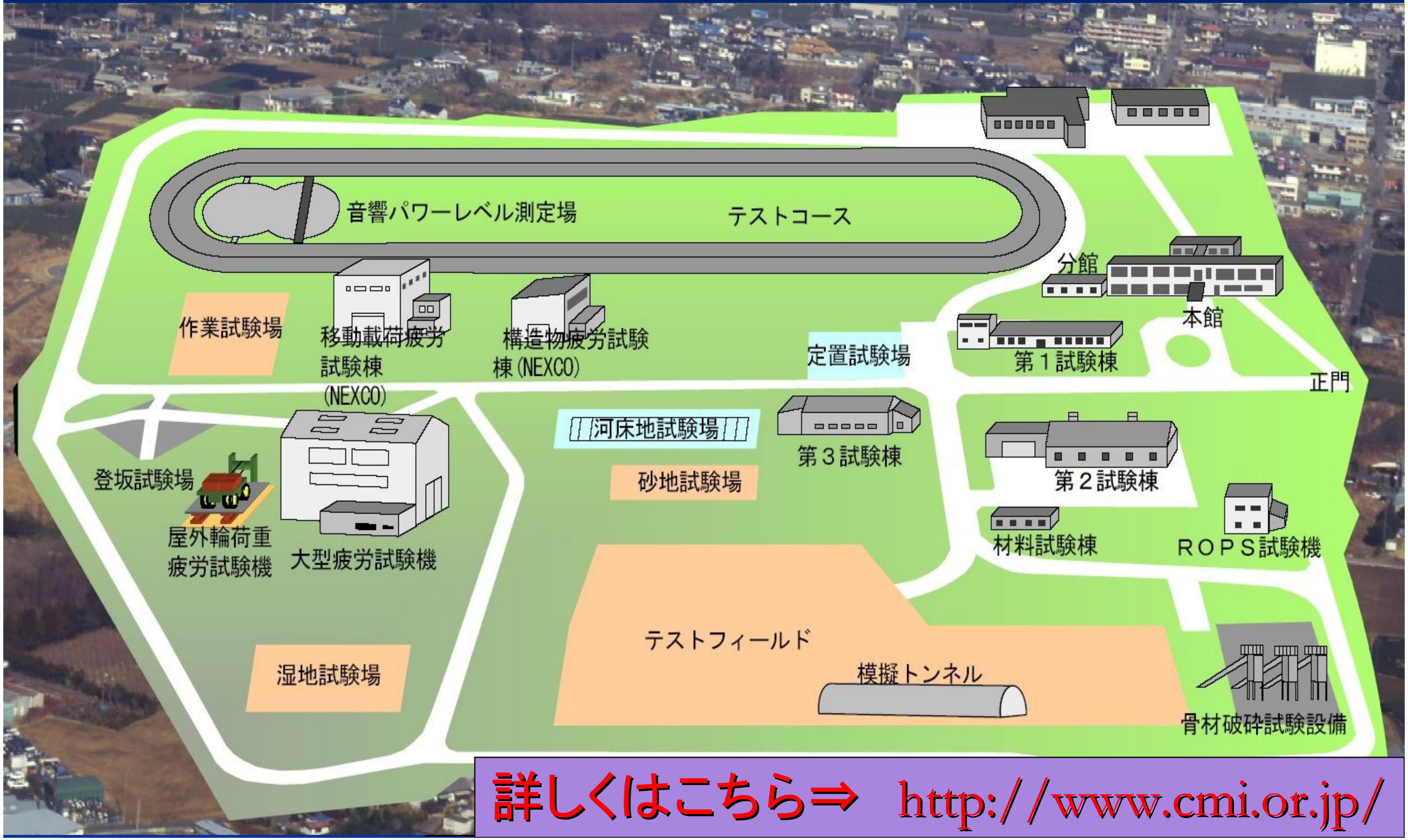
疲労亀裂の特徴と応力測定実務

一般社団法人 日本建設機械施工協会
施工技術総合研究所　小野秀一

建設機械と機械化施工に関する
わが国唯一の総合試験研究機関

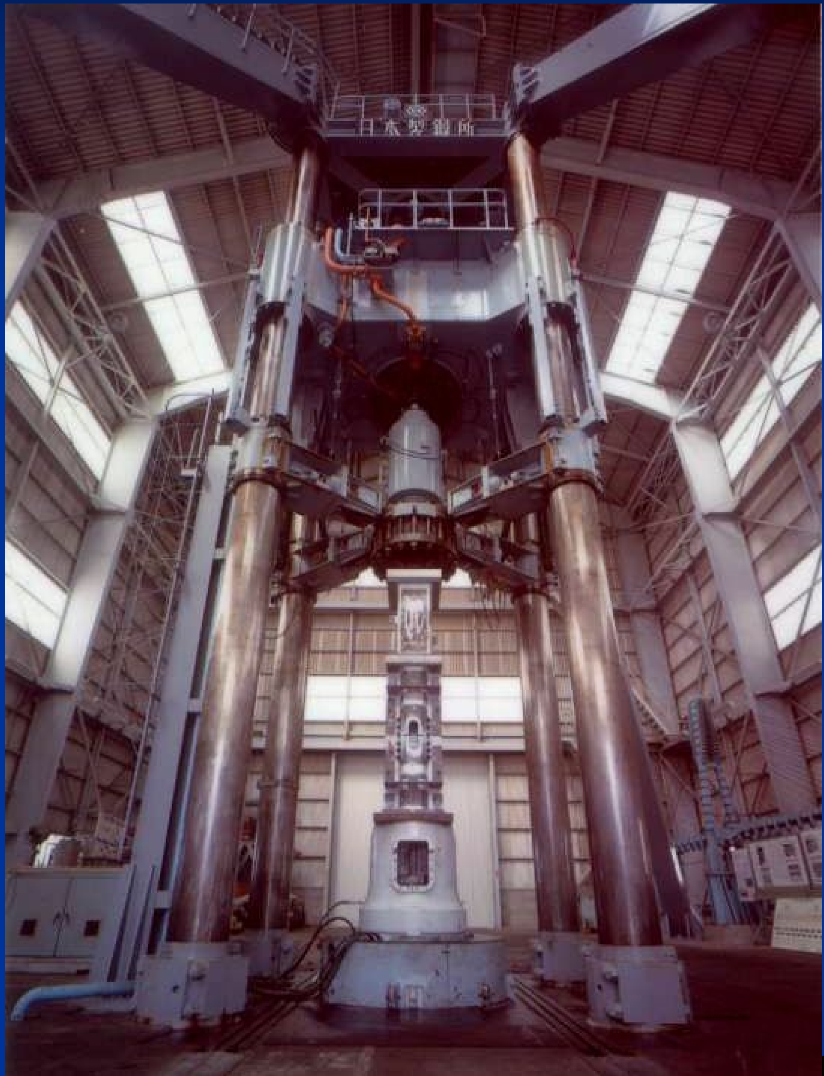
施工技術総合研究所

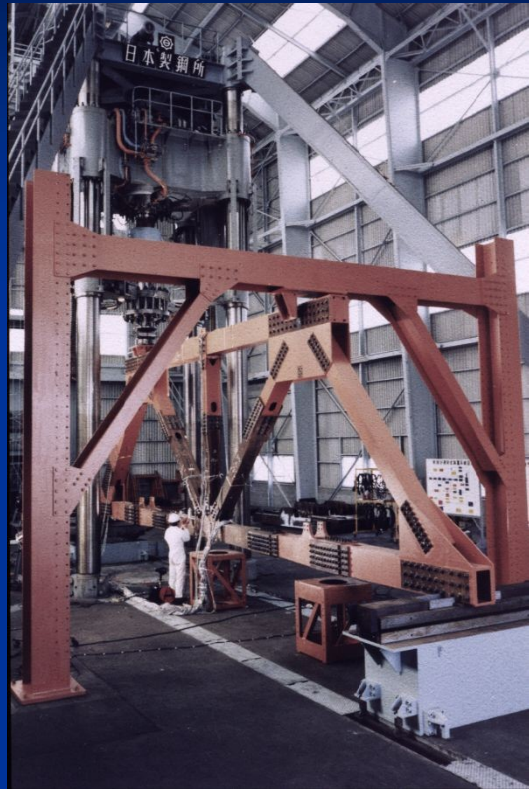
各種実験設備



詳しくはこちら⇒ http://www.cmi.or.jp/

4MN大型疲労試験機





- 最大動的荷重：4MN
- 最大試験体サイズ：
  - 長さ12m、幅2.5m、高さ5.5m

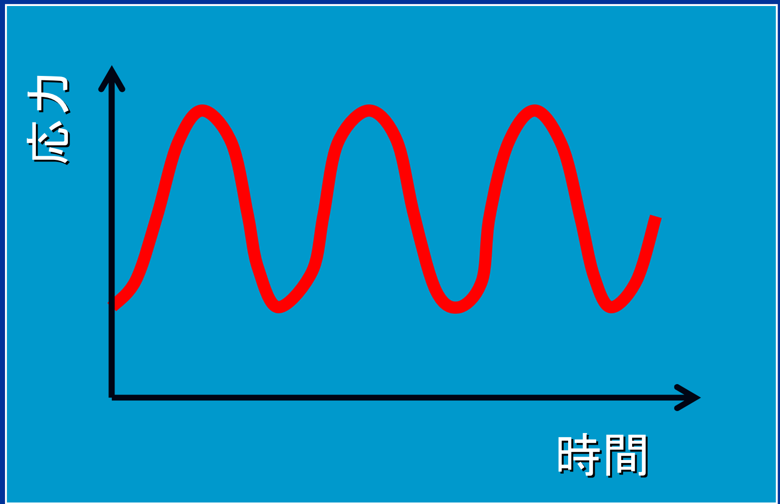
講演の内容

- 疲労試験の概要(基礎)
- 疲労試験の事例と実橋への適用例
  - プレートガーダー橋対傾構取付部の疲労対策
  - アーチ橋垂直材の疲労対策
  - 鋼製橋脚隅角部の疲労対策
  - 鋼床版の疲労対策

実物大試験体を用いた大型疲労試験による疲労対策検討事例

疲労損傷とは

- 繰り返し荷重によって，構造物，構造部材，継手内に疲労きれつが発生・進展すること（鋼道路橋の疲労設計指針より）



疲労損傷の原因

- 構造的な問題
- 疲労強度の低いディテール
- 応力集中
- 溶接欠陥
- 想定していない繰り返し荷重の負荷

机上の計算では推定が困難

疲労の評価には疲労試験が必要

大型疲労試験の必要性

小型試験体では再現できない要素がある

- 板厚効果の影響
- 実際と同じサイズでの溶接の再現
- 実際と同じ応力分布の再現　　　　など

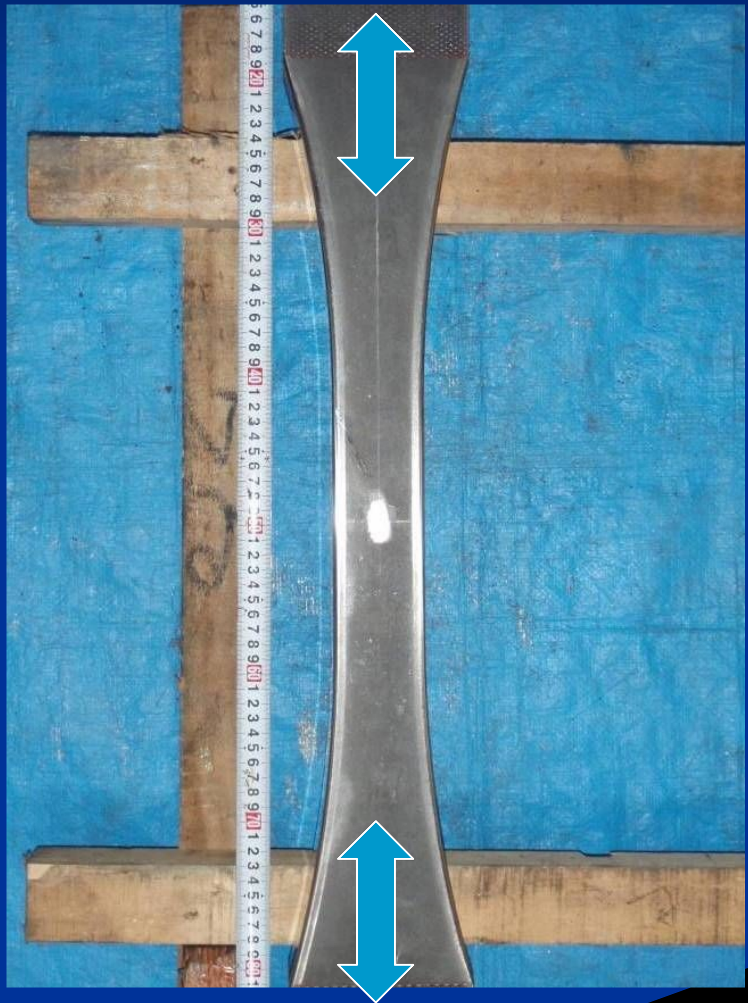
↓

実物大相当の試験体を用いた疲労試験が必要

大型疲労試験の目的

- 実構造物の疲労挙動を把握する
  - 新設構造物の疲労強度確認
  - 既設構造物の補修工法検討の基礎データ収集
  - 補修・補強工法適用による効果検証
- 応力状態を確認する
  - 公称応力の確認
  - 応力集中
  - 応力分布

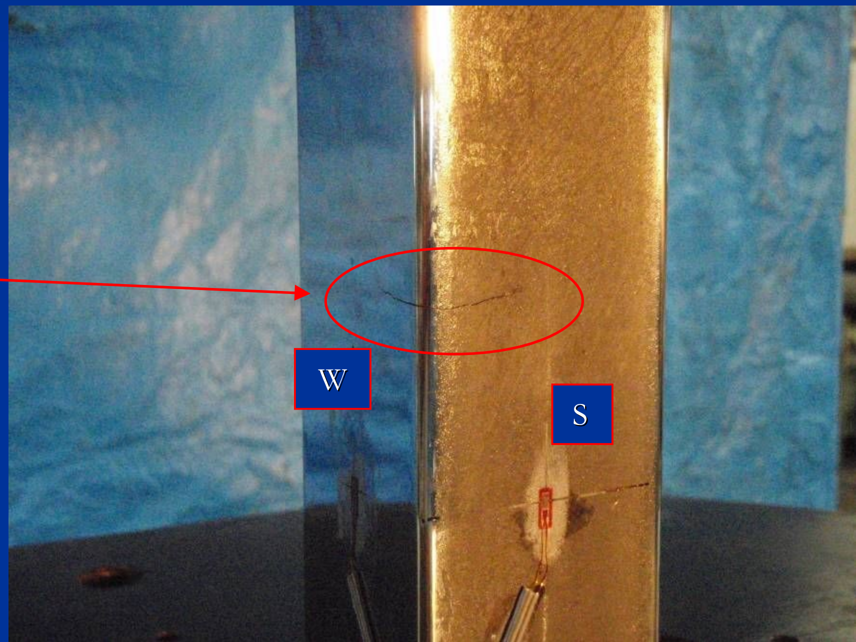
クーポン試験体の疲労試験



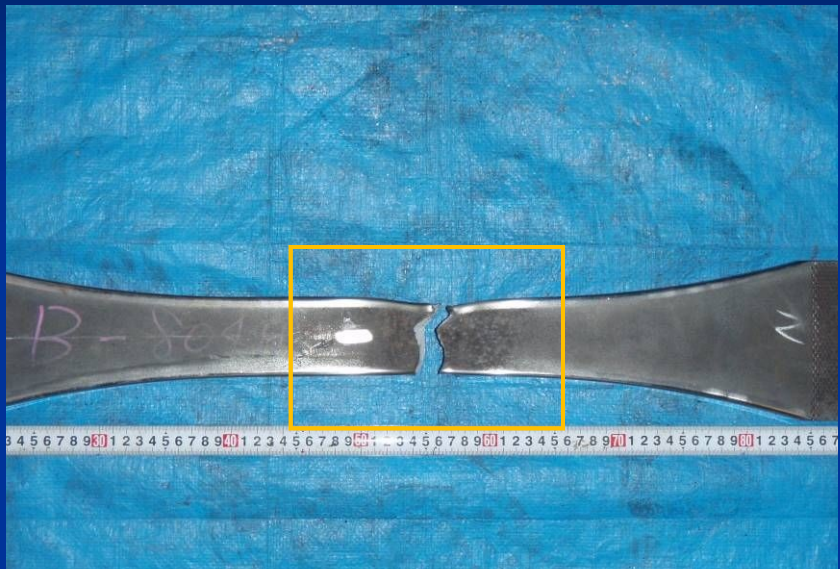
- 疲労試験条件の例
  - ・荷重条件：68kN〜1360kN
  - ・応力範囲：18〜350N/mm²
  - ・応 力 比　：0.05
  - ・繰返し速度：5.0Hz

疲労き裂の発生と進展

破断直前の状況（40万回前後）



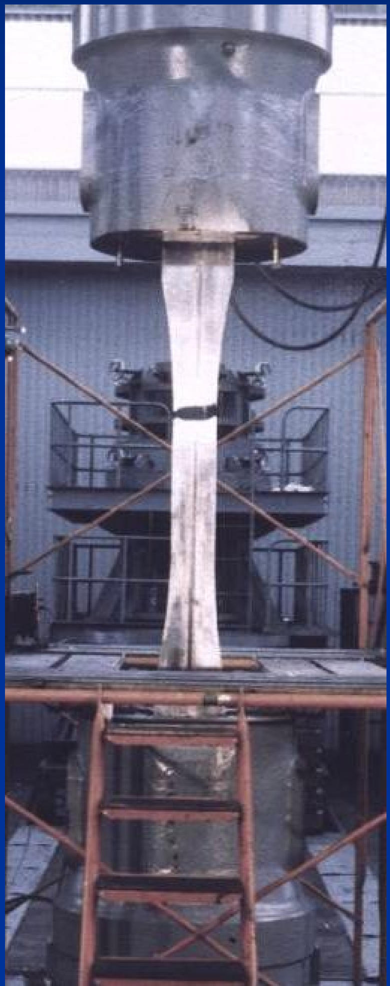
疲労破断面の様子

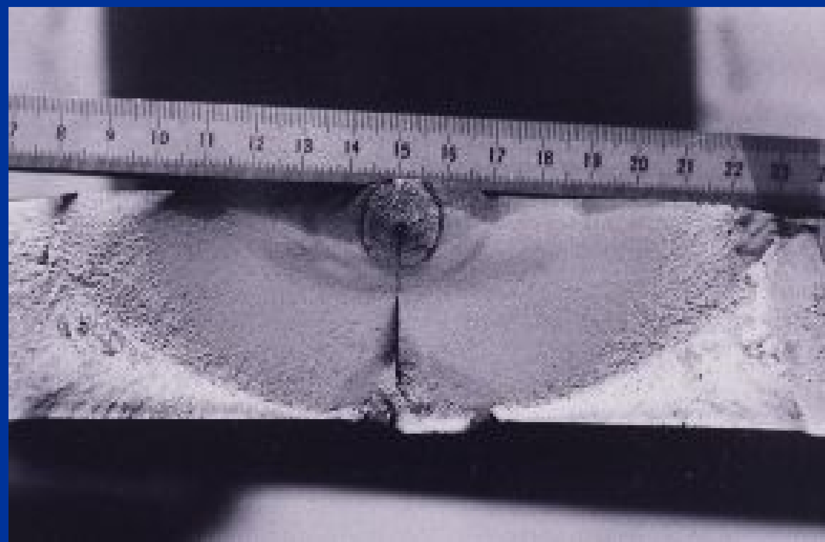


起点

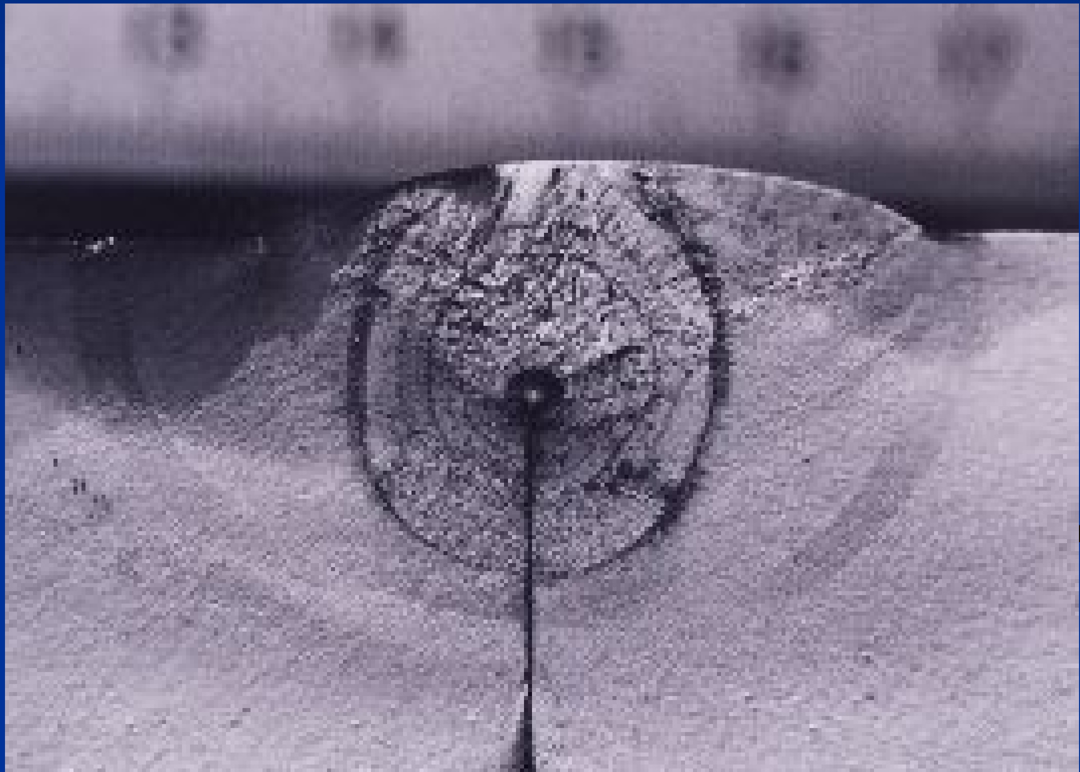
板幅方向

縦ビード継手の疲労亀裂

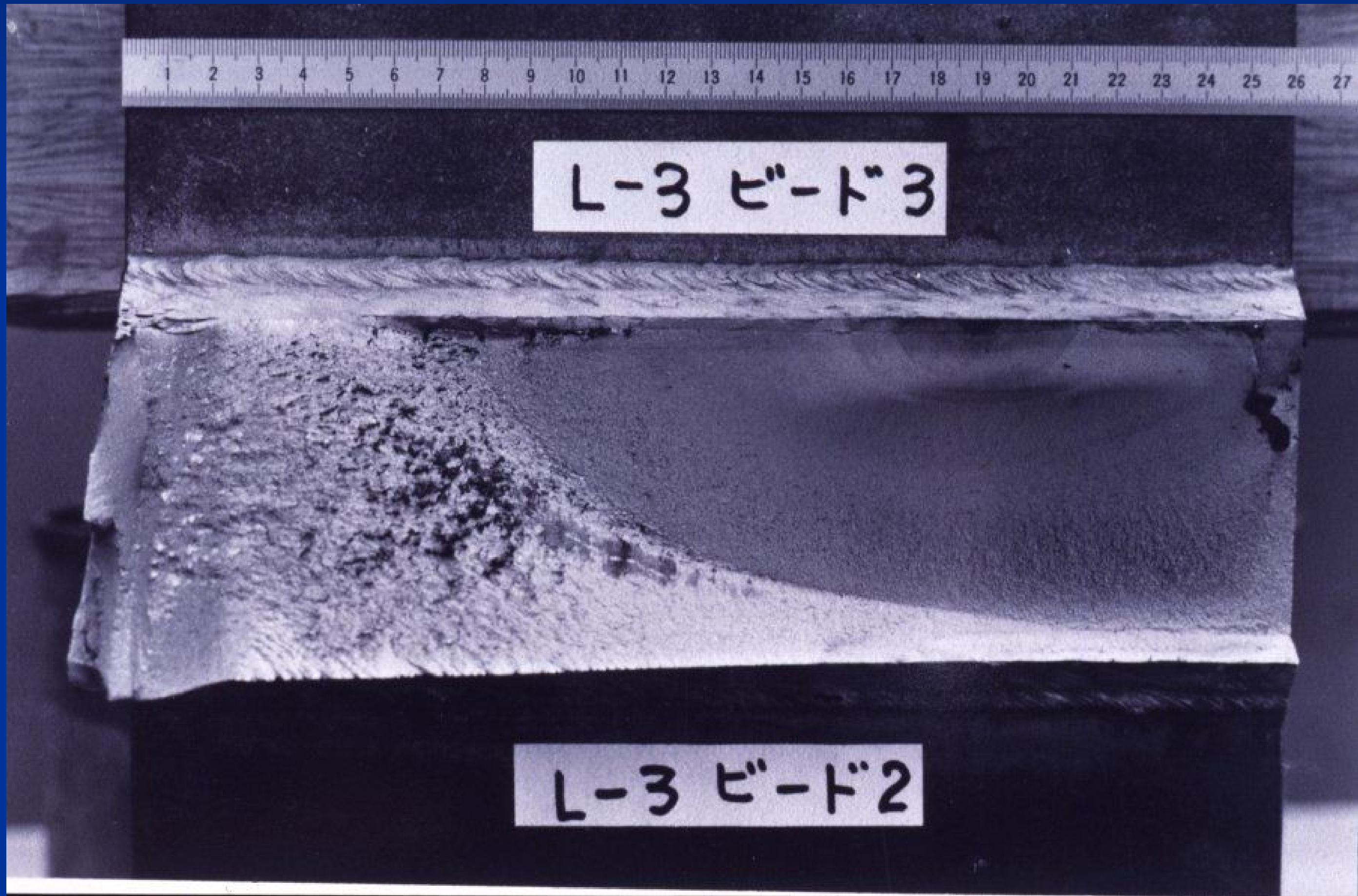




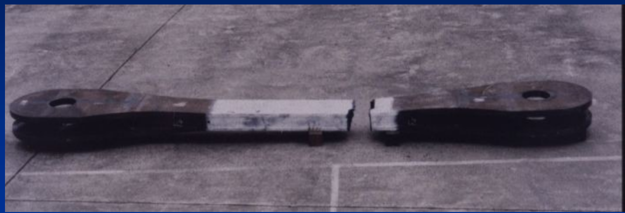
疲労破面の様子
（ブローホールからのき裂の進展）

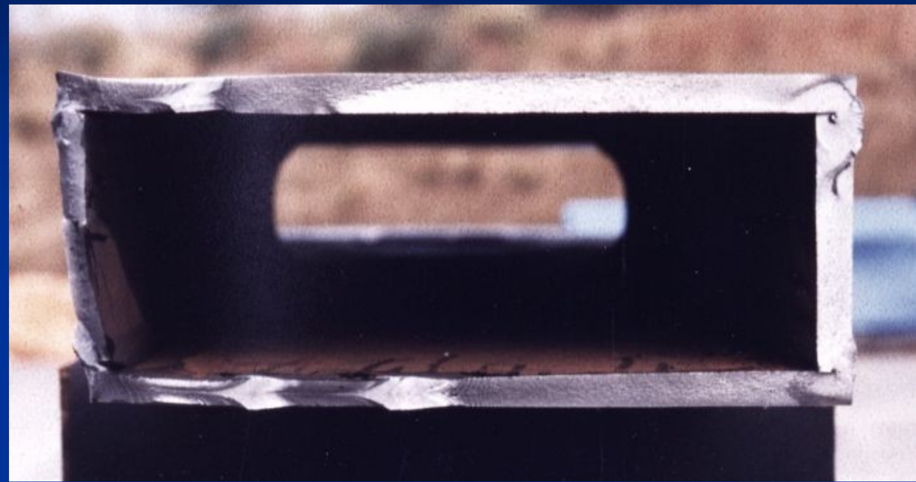


リブ十字継手の疲労亀裂

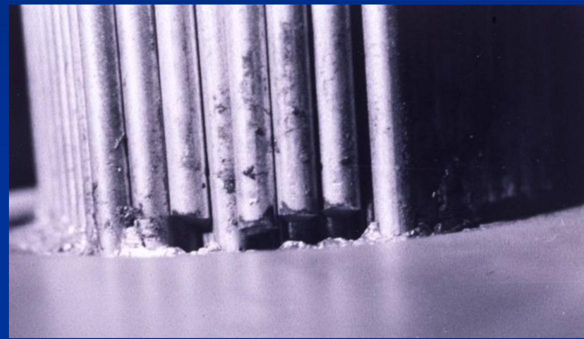


ボックス断面角溶接部の疲労亀裂

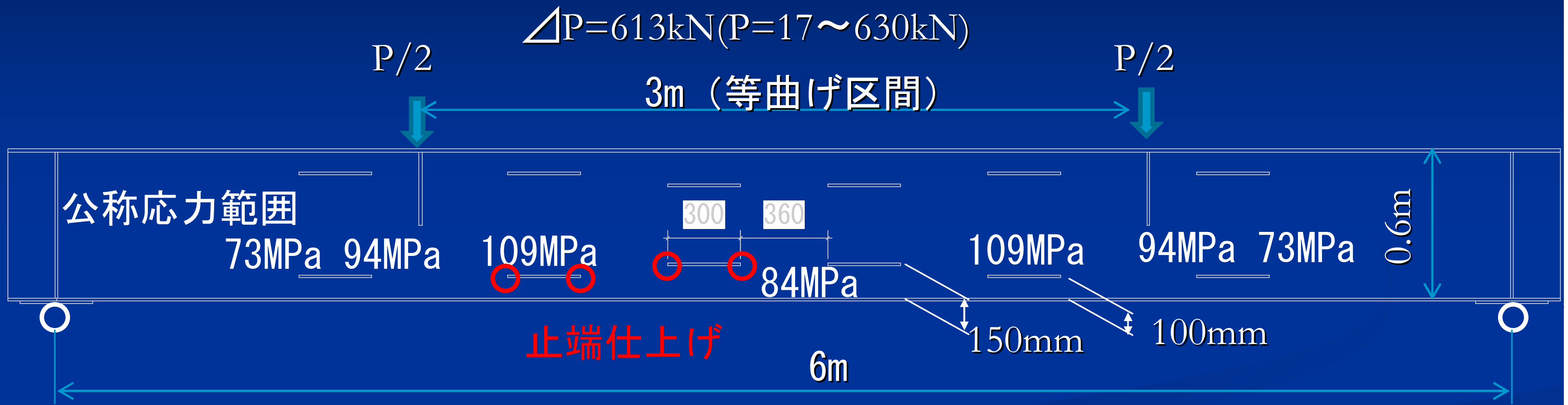


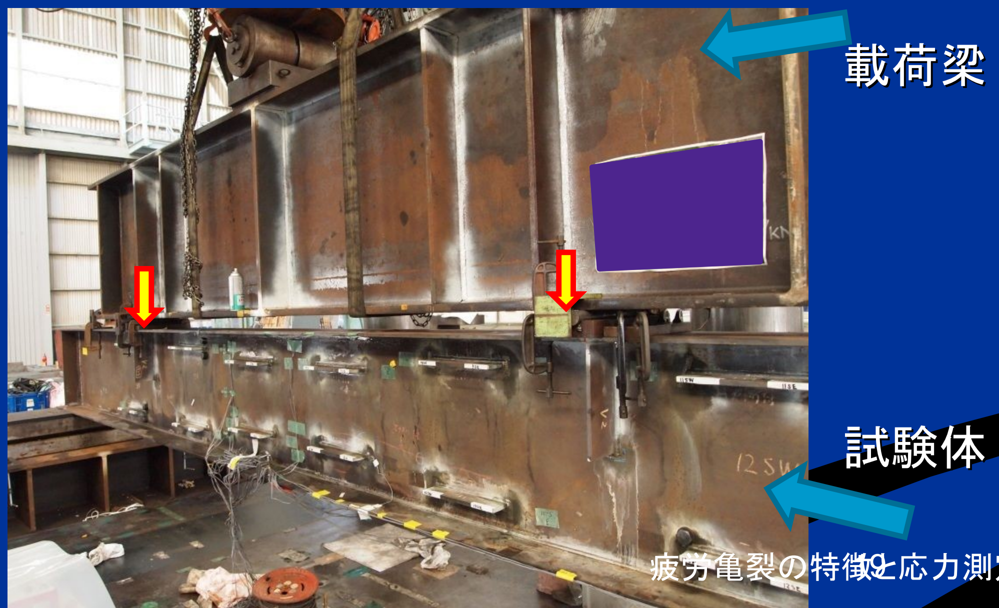


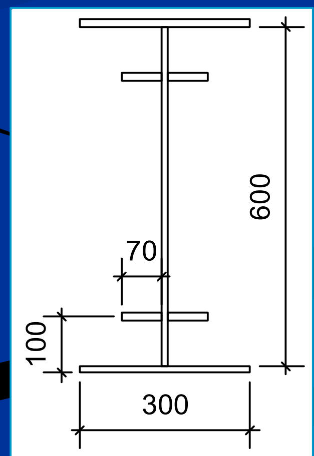
橋梁用ケーブルの疲労試験

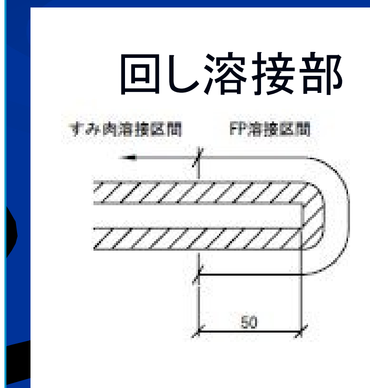


大型桁試験体の例



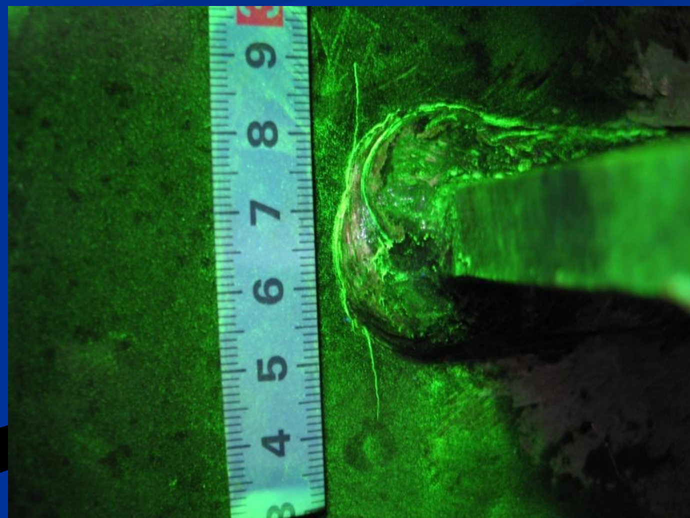




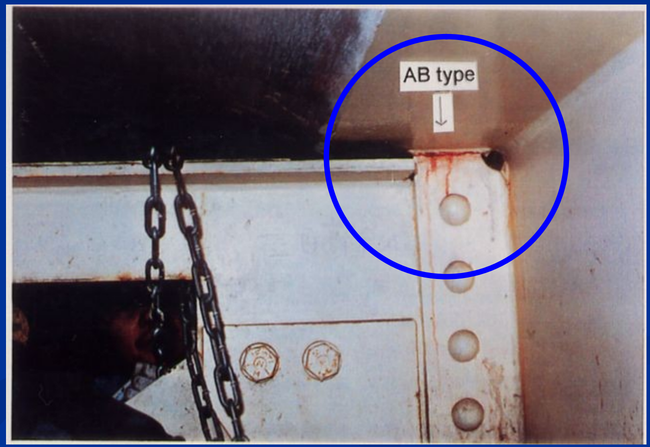


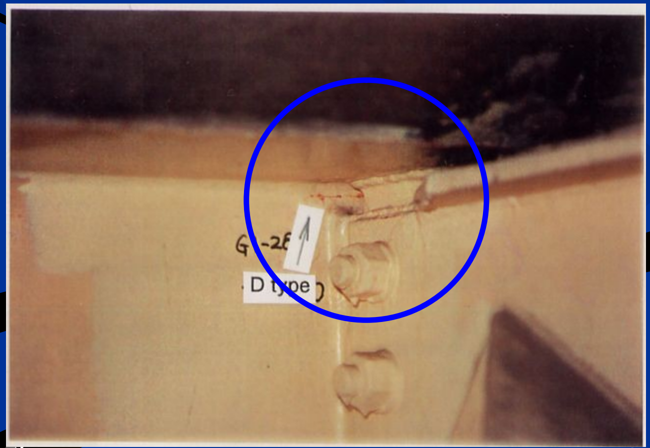
部材の板厚はすべて12mm

疲労亀裂の発生と調査例

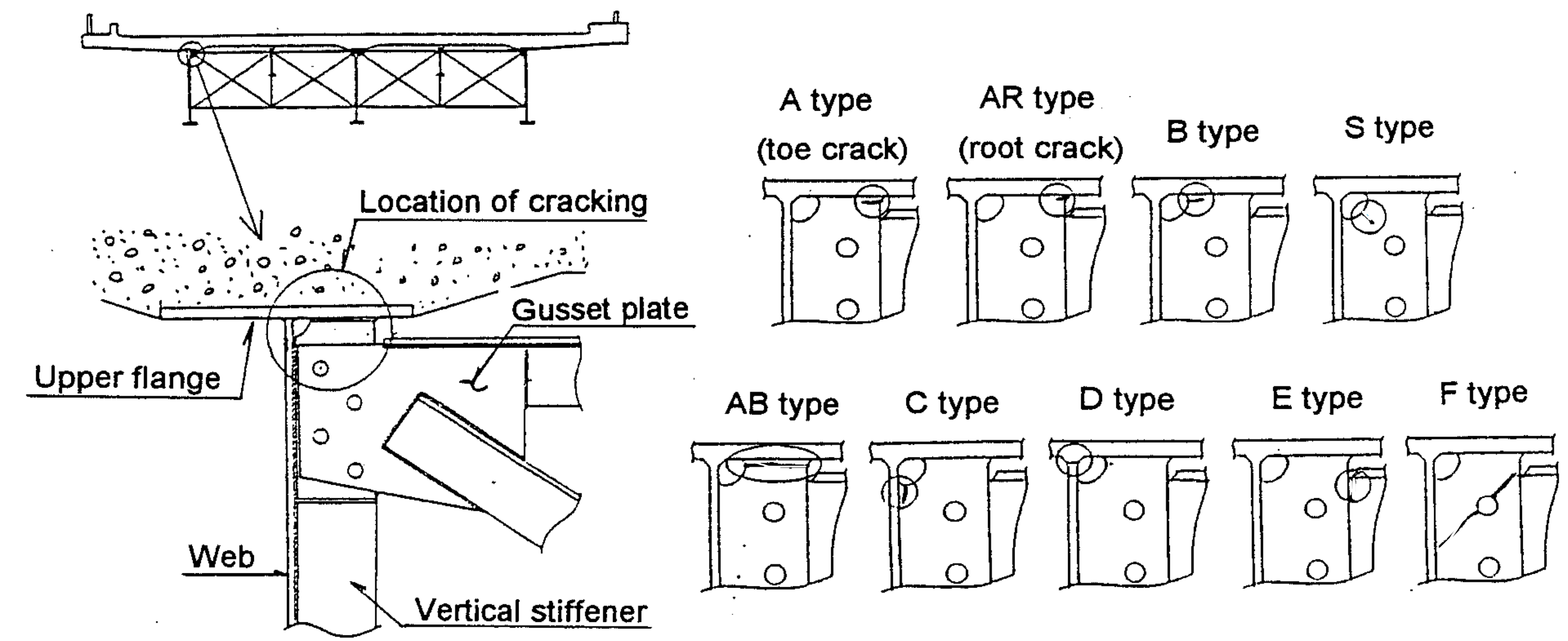


プレートガーダー橋対傾構取付部の疲労損傷対策

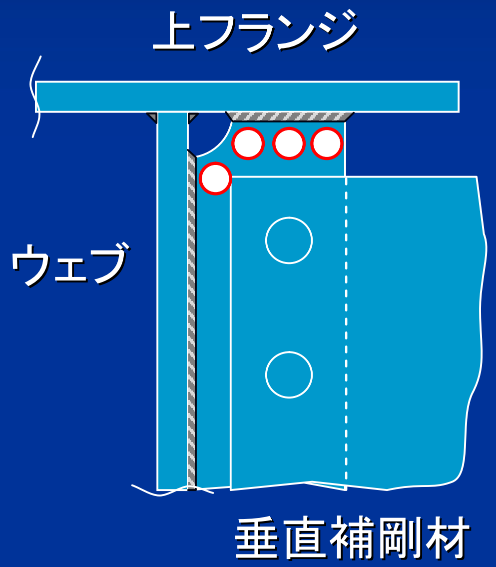


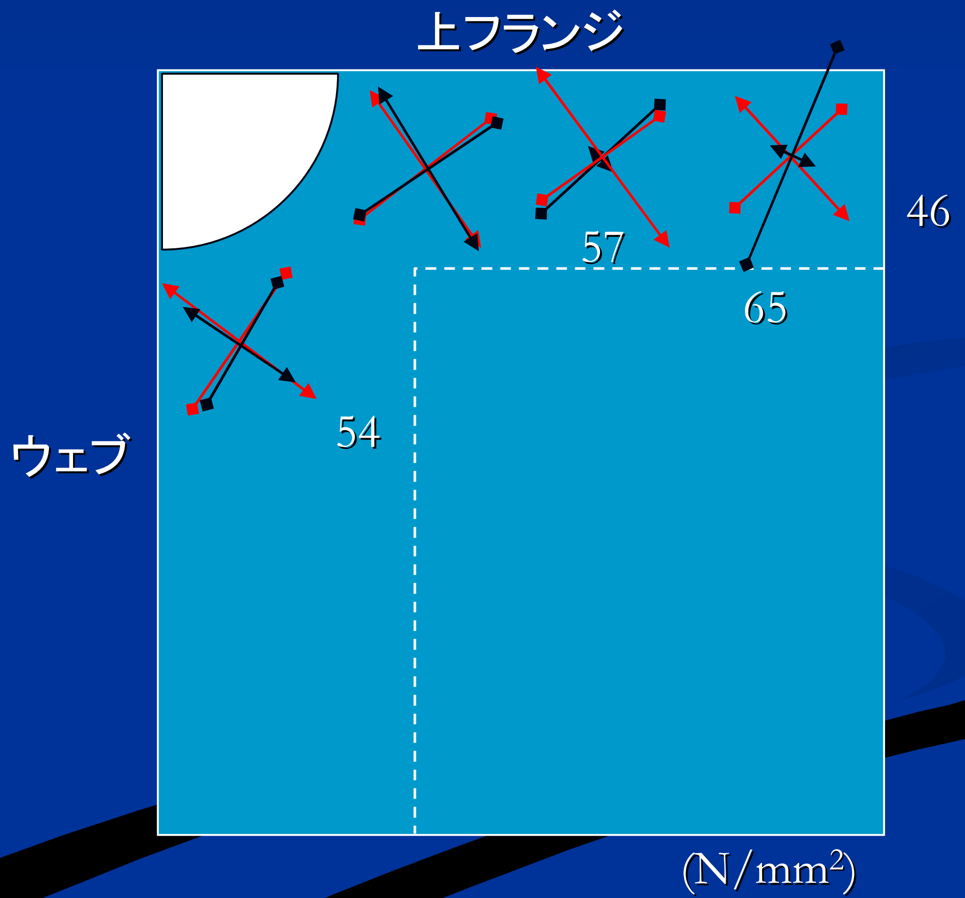


対傾構取付部の亀裂パターン



対傾取付部垂直補剛材上端部の実測応力





レベルクロッシング法による応力頻度

80

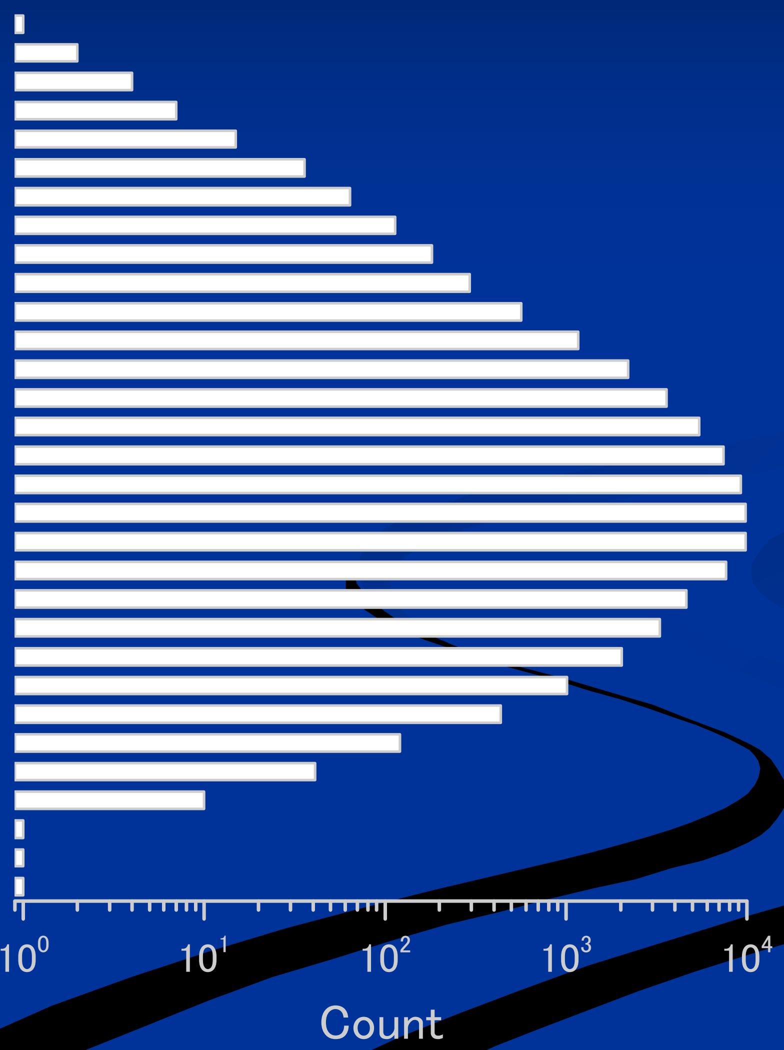
50

0

-50

(N/mm^2)

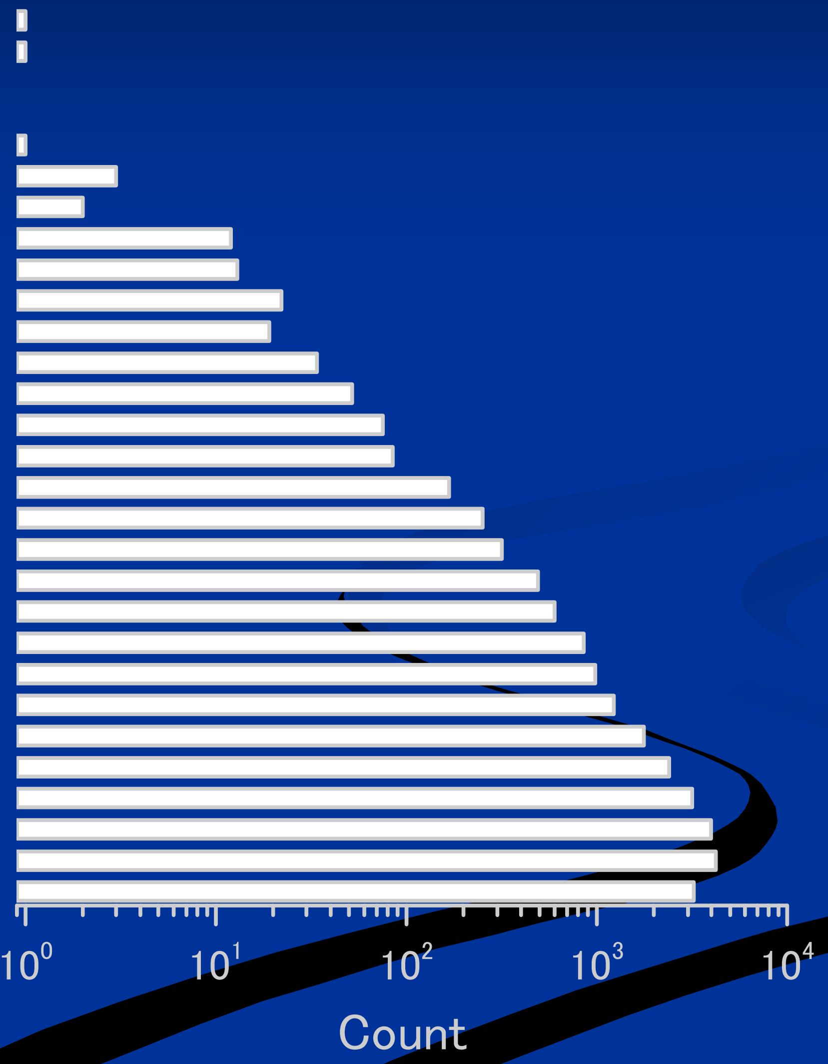
Stress	Count	Count(%)
8.8	1	0.00
8.3	2	0.00
7.8	4	0.01
7.3	7	0.01
6.8	15	0.02
6.3	36	0.05
5.8	64	0.09
5.3	114	0.16
4.8	181	0.26
4.3	294	0.43
3.8	567	0.82
3.3	1167	1.69
2.8	2210	3.20
2.3	3591	5.19
1.8	5450	7.88
1.3	7419	10.73
0.8	9225	13.34
0.3	9791	14.16
−0.3	9791	14.16
−0.8	7664	11.08
−1.3	4618	6.68
−1.8	3296	4.77
−2.3	2037	2.94
−2.8	1014	1.47
−3.3	436	0.63
−3.8	121	0.17
−4.3	41	0.06
−4.8	10	0.01
−5.3	1	0.00
−5.8	1	0.00
−6.3	1	0.00



レインフロー法による応力頻度

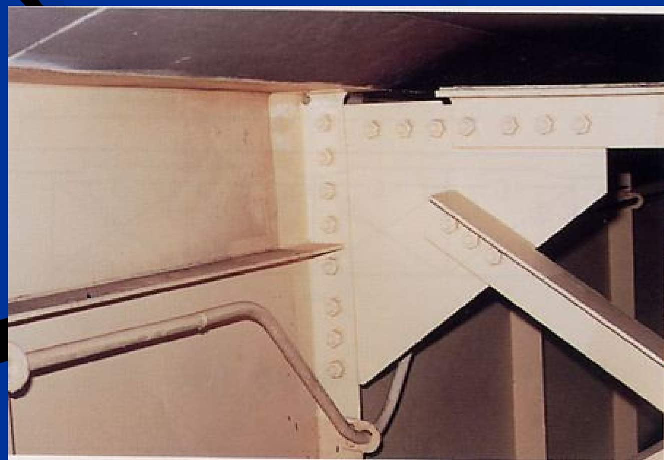
150
100
50
10
(N/mm^2)

Stress	Count	Count(%)
15.5	0	0.00
15.0	1	0.00
14.5	1	0.00
14.0	0	0.00
13.5	0	0.00
13.0	1	0.00
12.5	3	0.01
12.0	2	0.01
11.5	12	0.05
11.0	13	0.05
10.5	22	0.09
10.0	19	0.08
9.5	34	0.14
9.0	52	0.22
8.5	75	0.31
8.0	85	0.35
7.5	168	0.70
7.0	252	1.05
6.5	317	1.32
6.0	492	2.05
5.5	599	2.50
5.0	854	3.56
4.5	983	4.10
4.0	1227	5.12
3.5	1768	7.37
3.0	2409	10.05
2.5	3170	13.22
2.0	3976	16.58
1.5	4212	17.57
1.0	3230	13.47

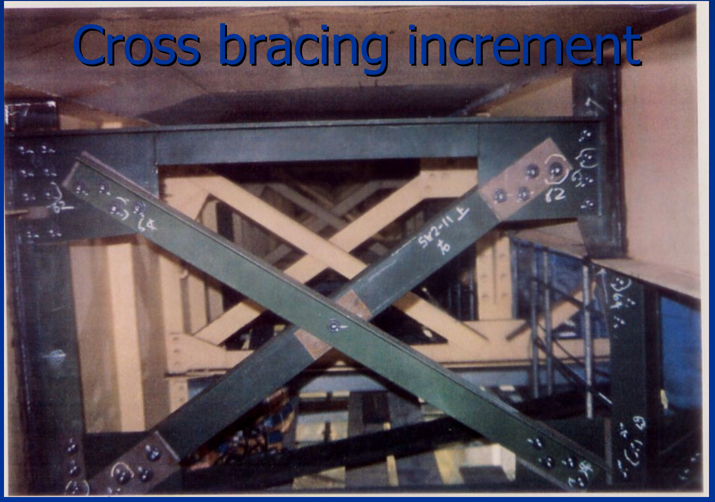


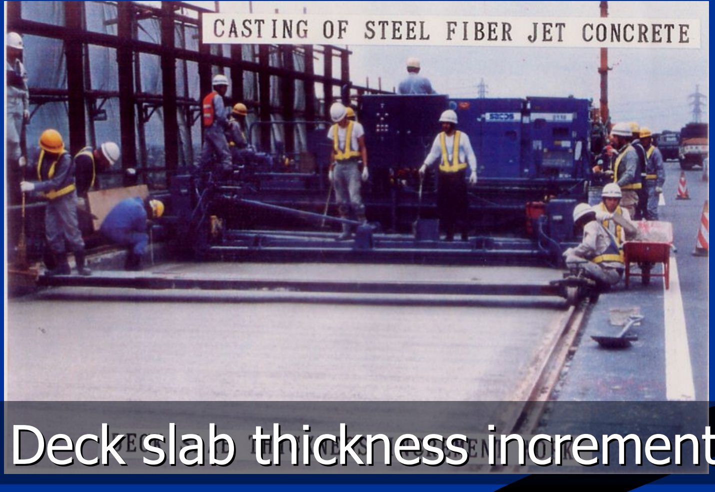
対傾構取付部の疲労損傷対策

replace

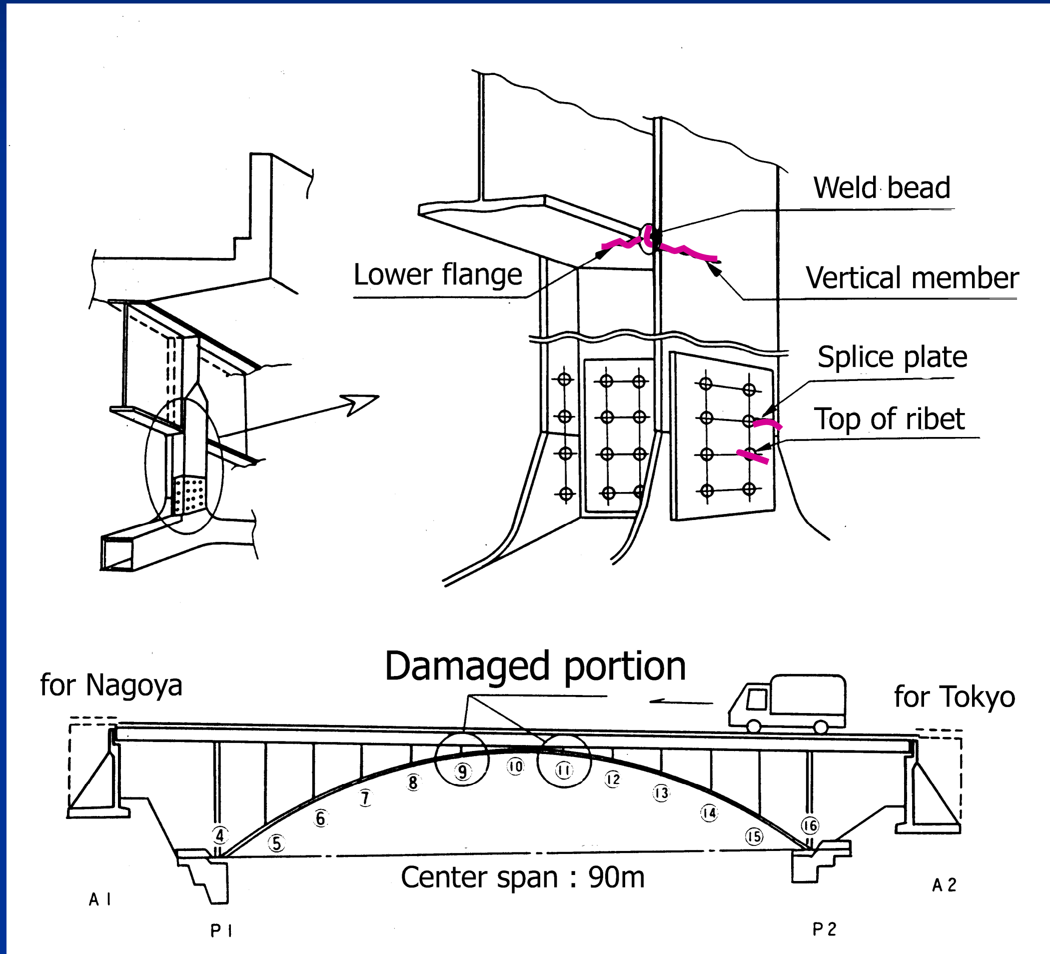


対傾構取付部の疲労損傷対策

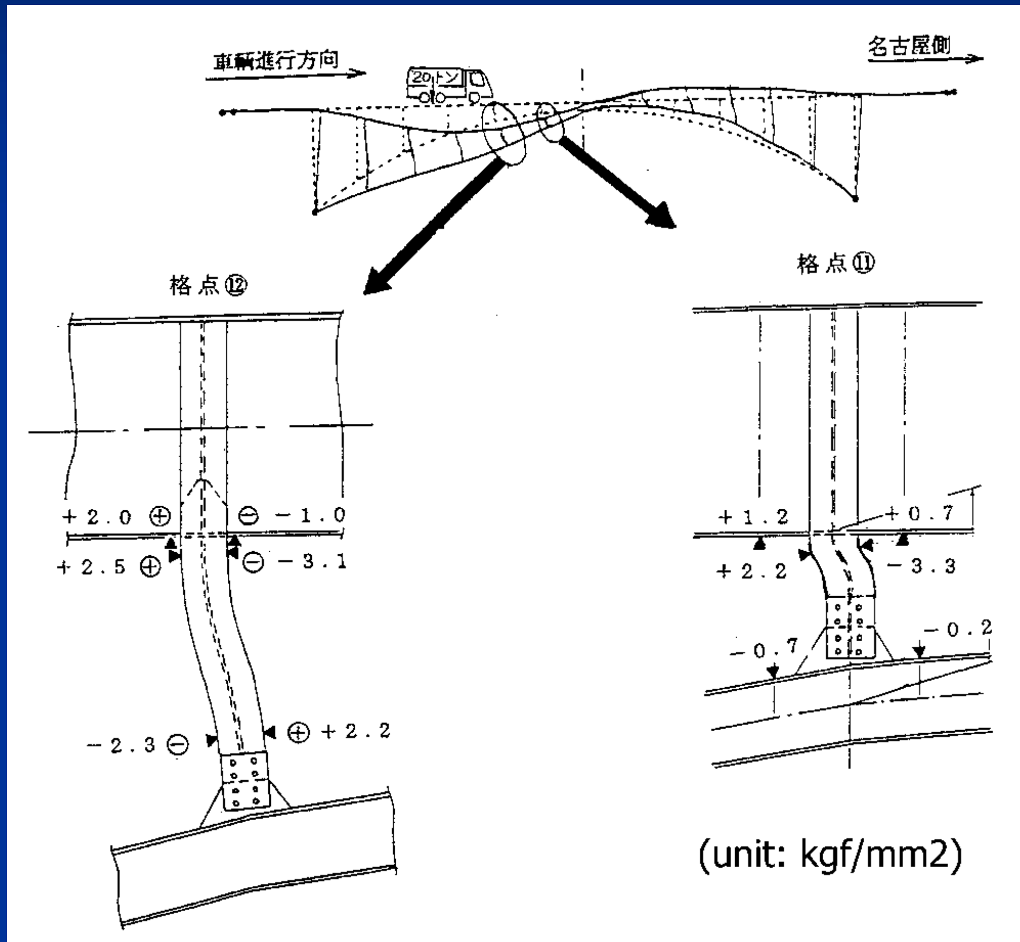




アーチ橋垂直材の疲労損傷対策

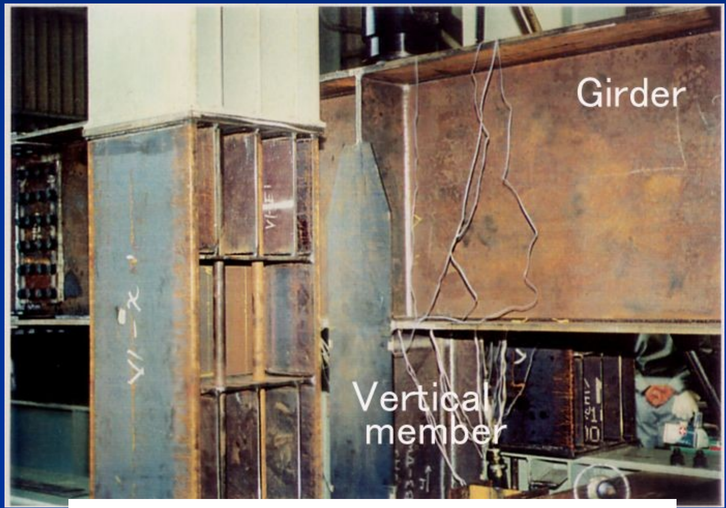


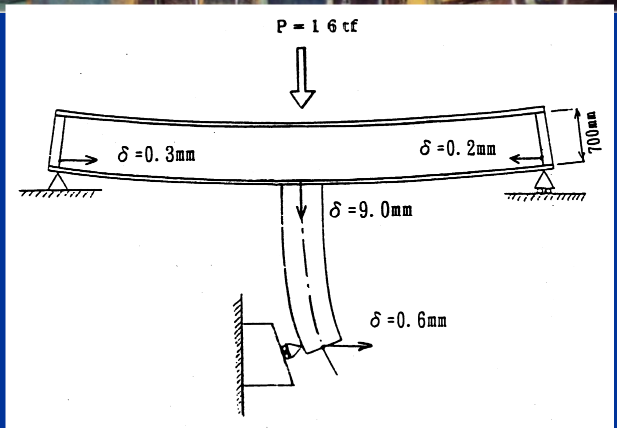
実橋測定による損傷原因解明



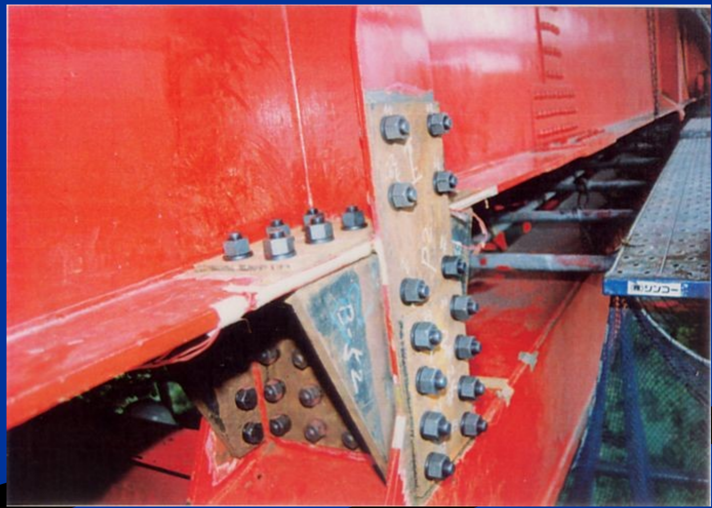
疲労試験による補強工法の検討

Fatigue test

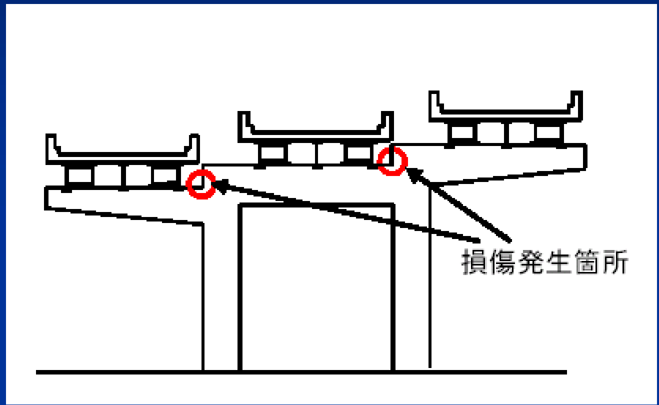


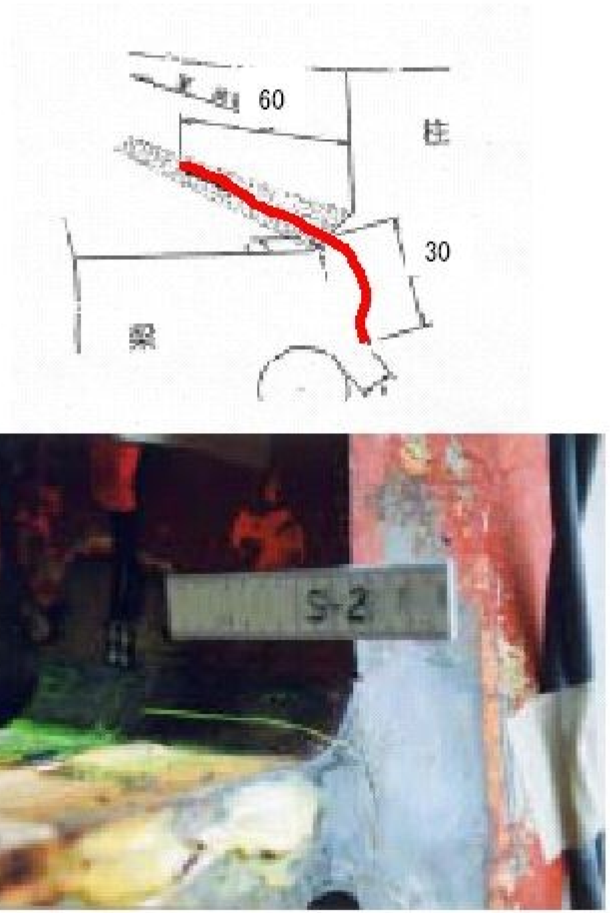


Reinforcement



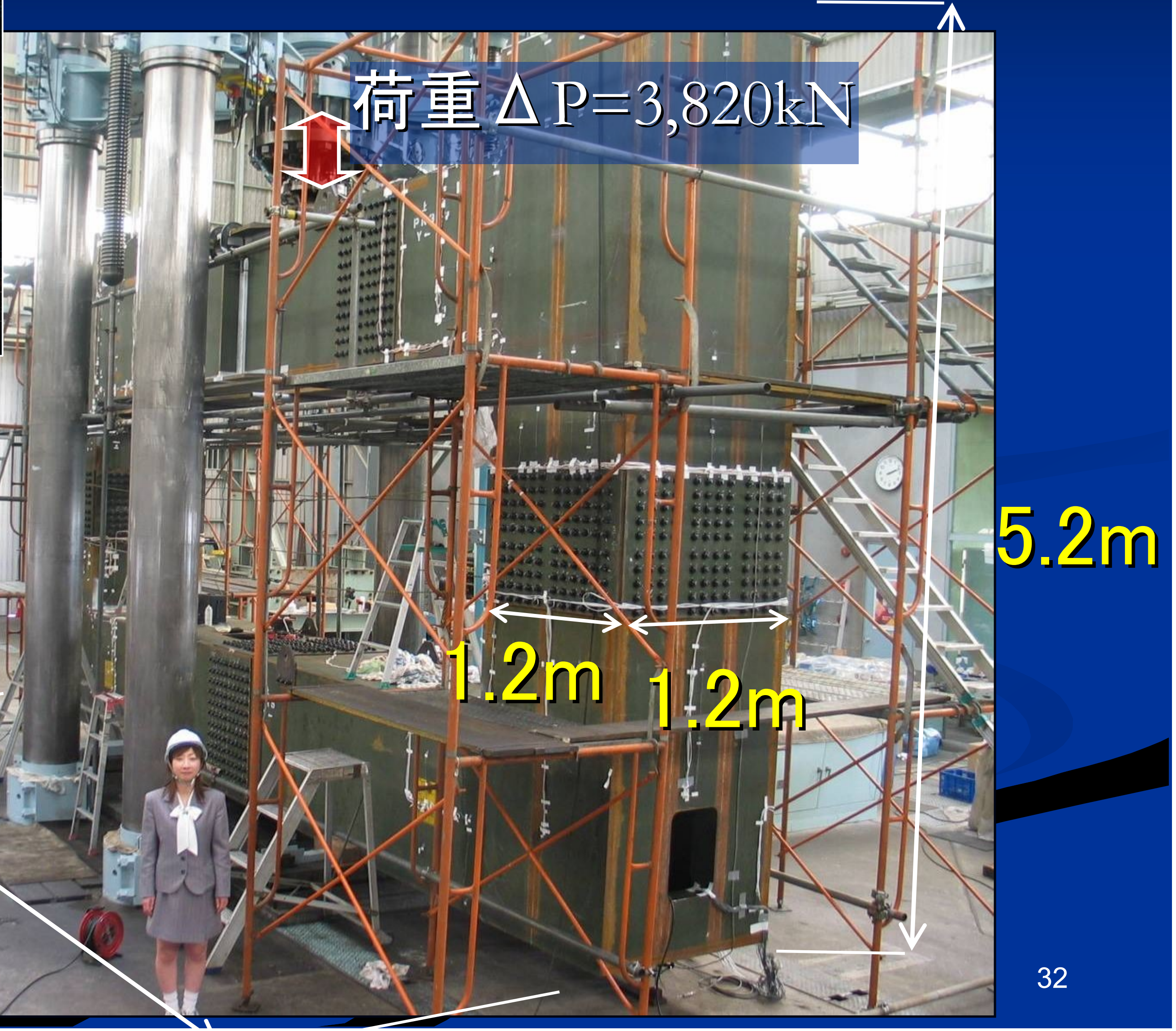
鋼製橋脚隅角部の疲労損傷対策



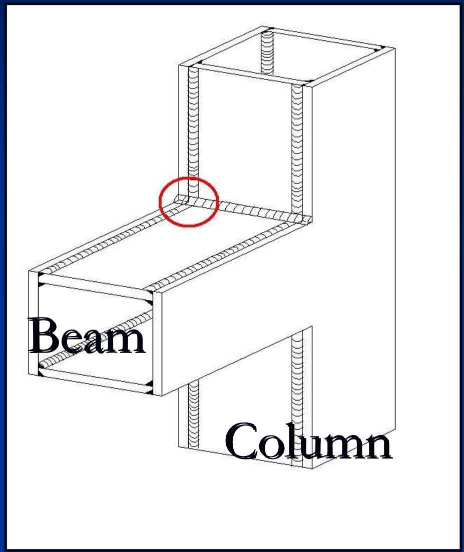


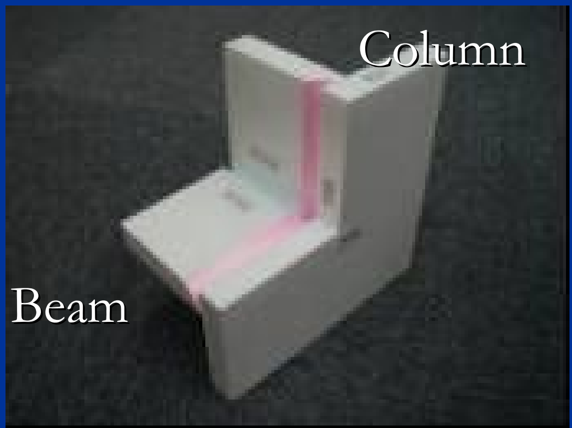
損傷状況

疲労対策検討のための大型疲労試験
（鋼製橋脚隅角部）



隅角部の板組パターン



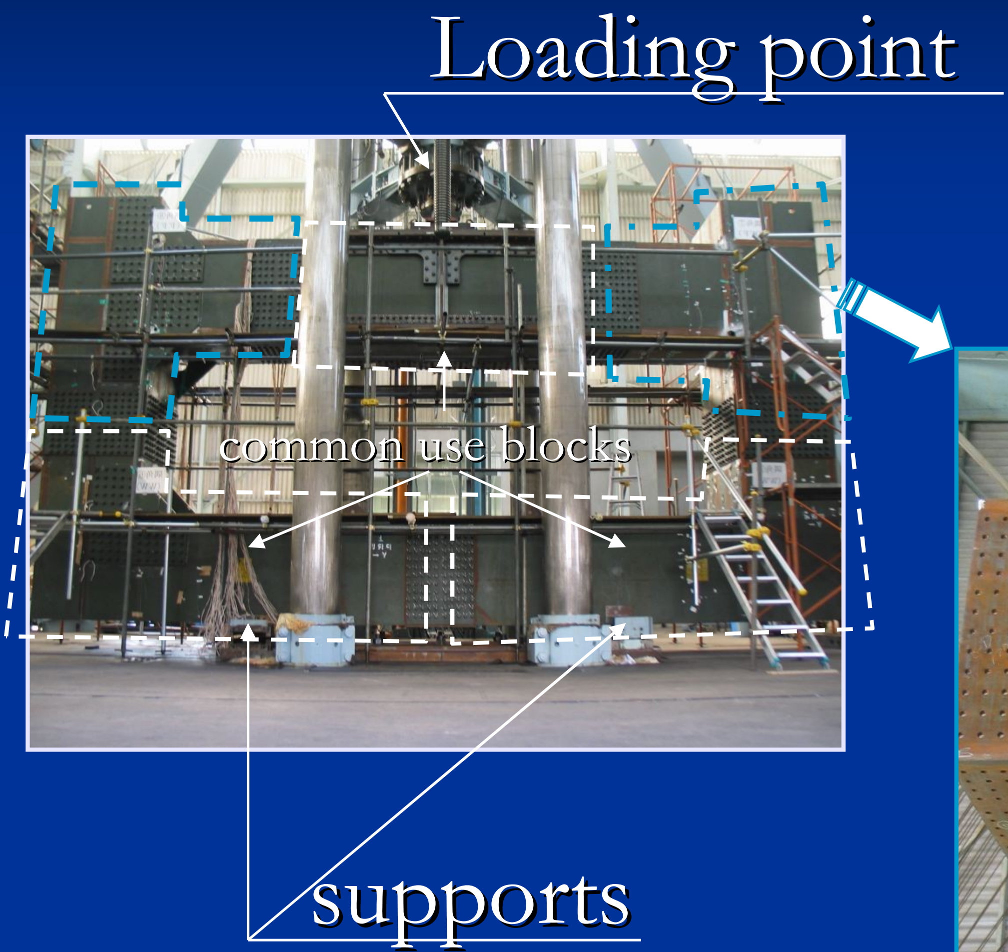


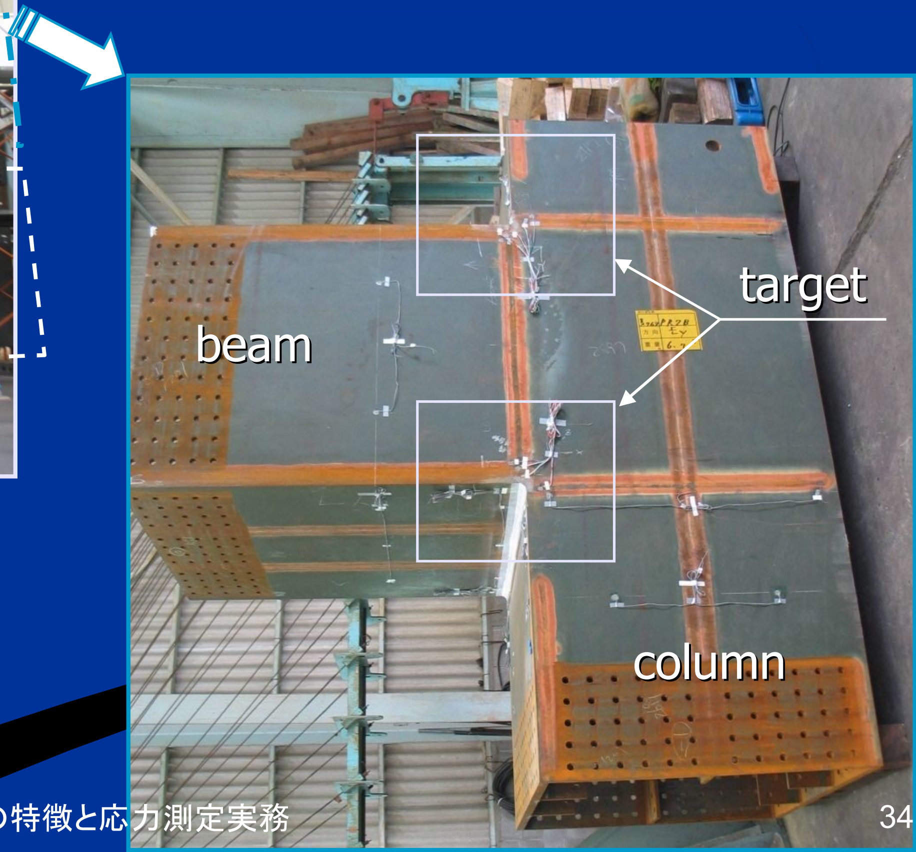
WW type

WF type

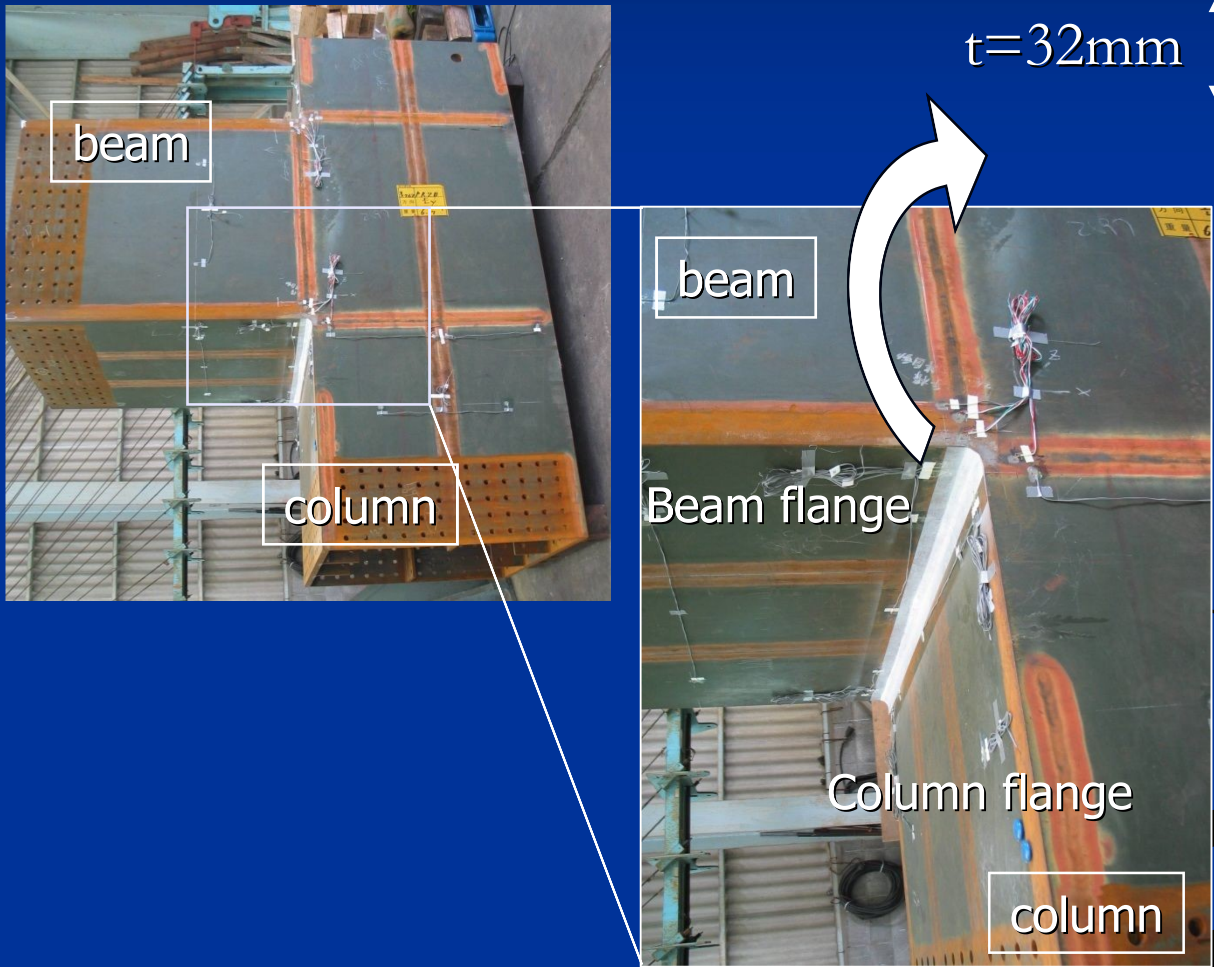
FF type

試験体の詳細

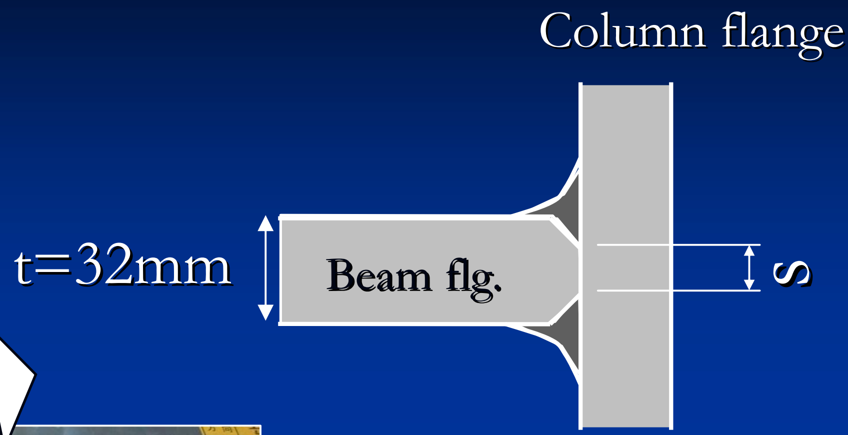

Loading point
common use blocks
supports


target
beam
column

溶接条件



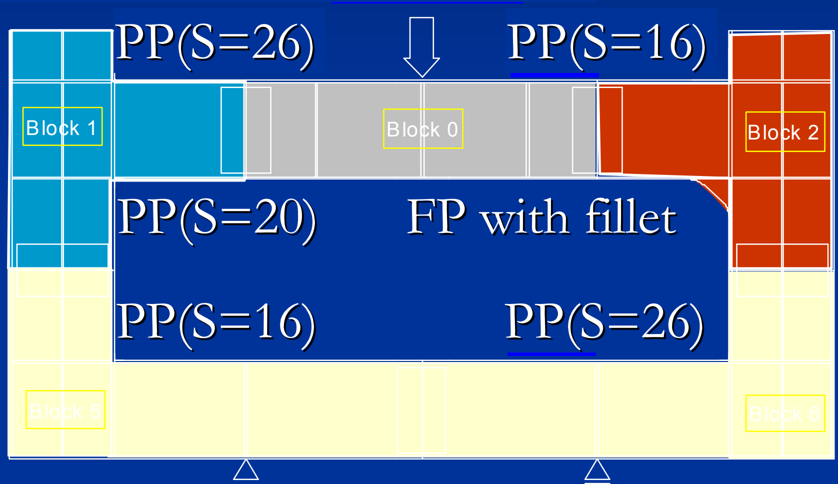
Parameter of partial penetration



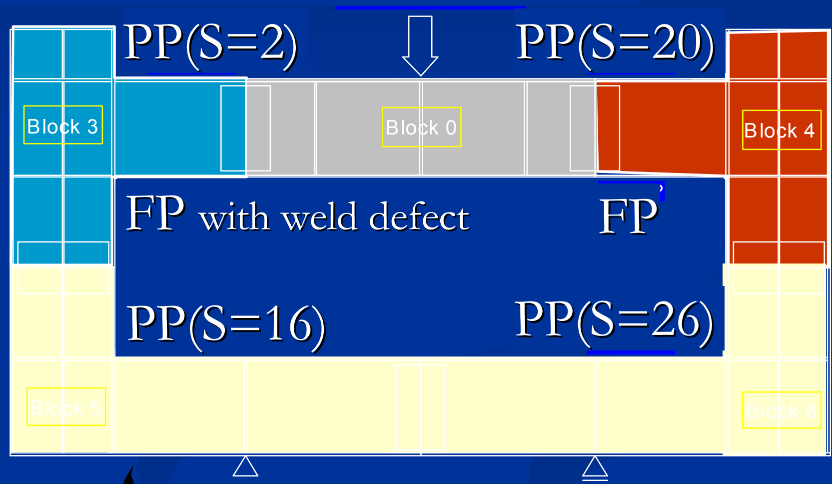
S: non-penetration size

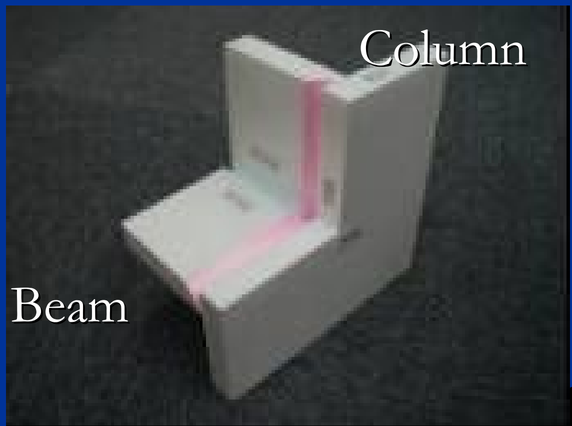
試験ケースと隅角部の条件

Case1(WW type)



Case2(WW type)



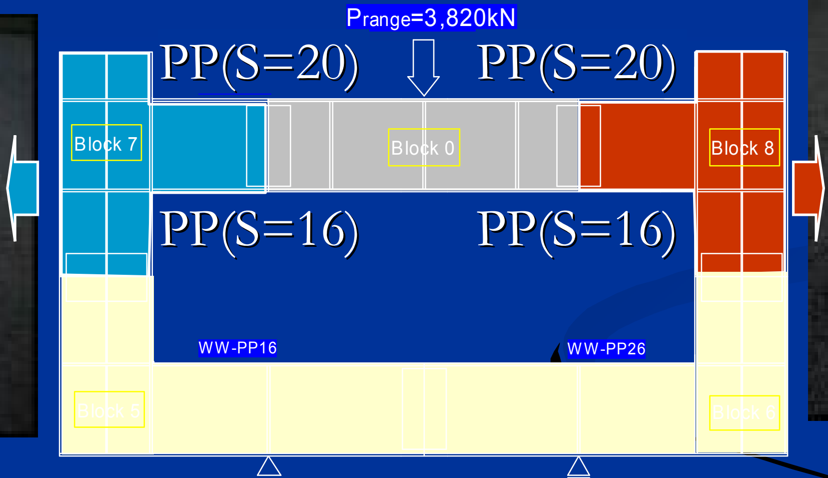


PP: Partial Penetration
FP: Full Penetration
S: Non-penetration size(mm)

試験ケースと隅角部の条件

Case3(WF and FF)

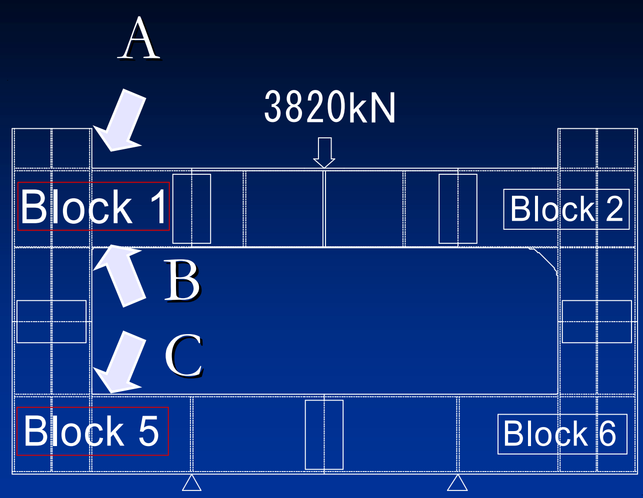
WF type

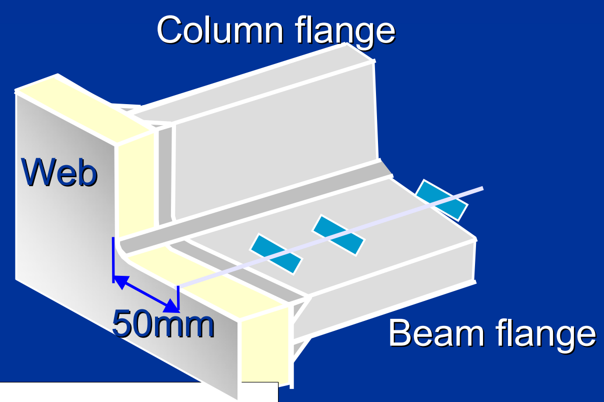


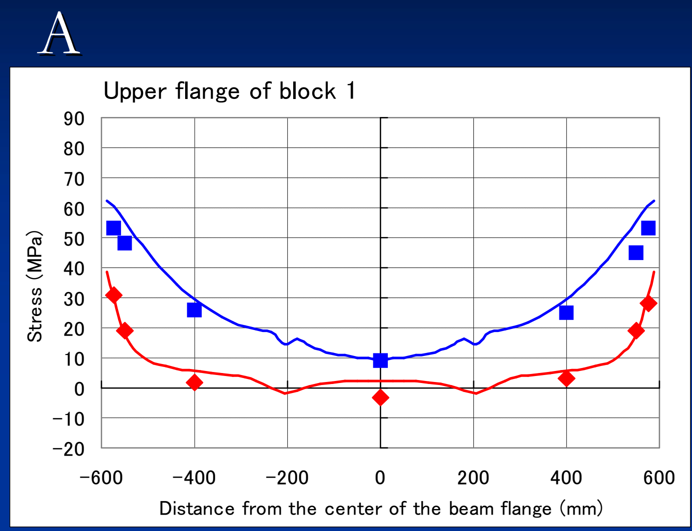
FF type

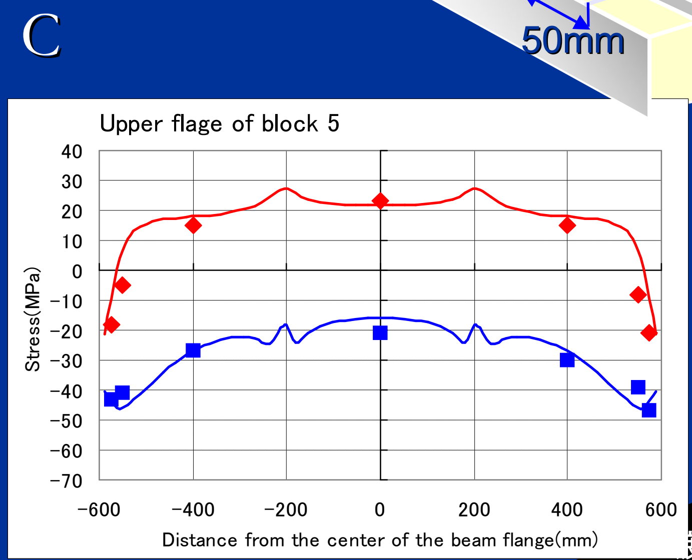
PP: Partial Penetration
S: Non-penetration size(mm)

応力分布







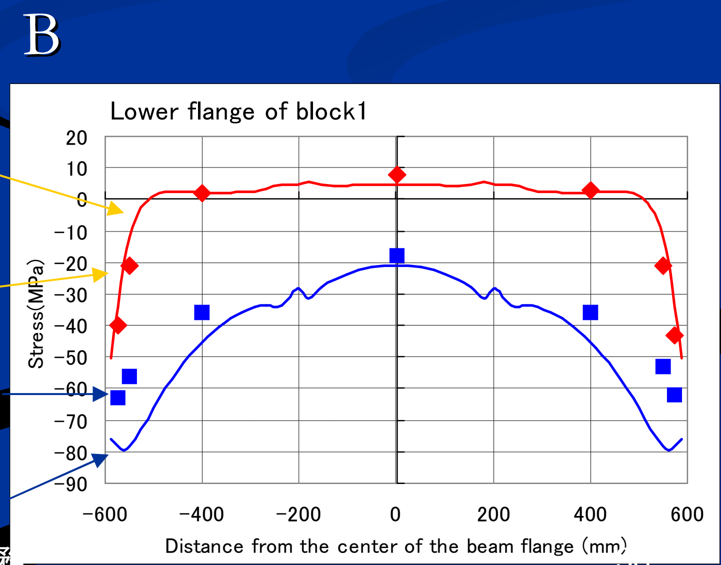


FEM (inner side)

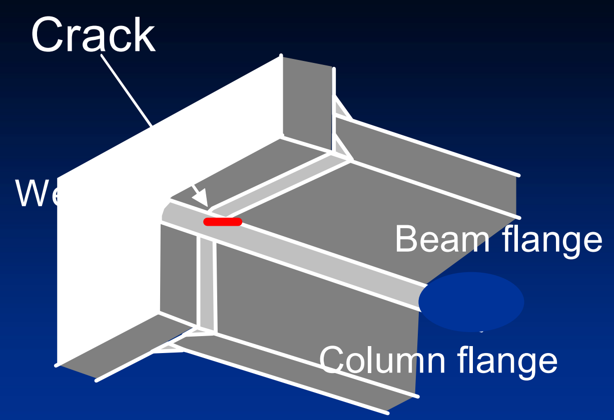
Measured (inner side)

Measured (outer side)

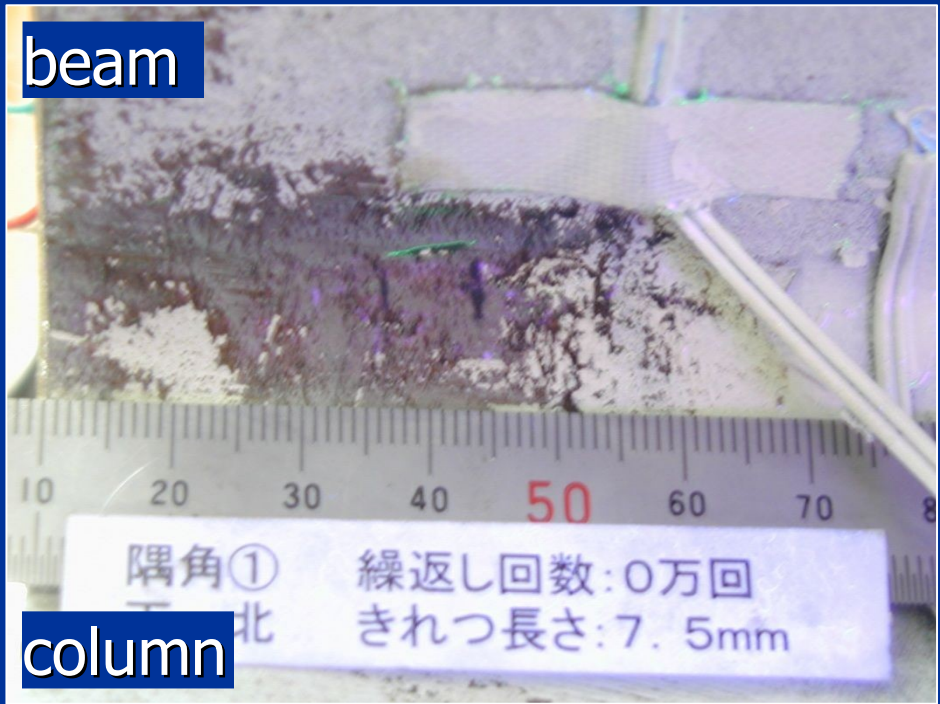
FEM (outer side)



疲労亀裂の発生と進展状況（WWタイプ）

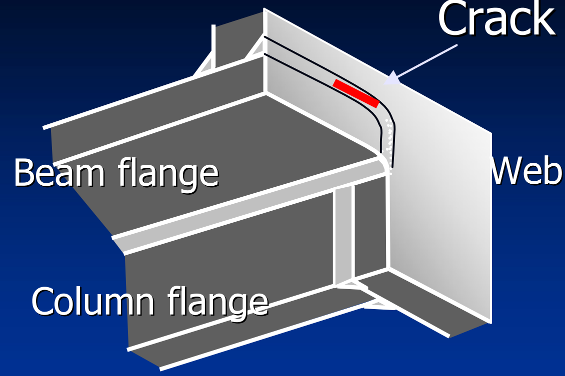


WW-PP20

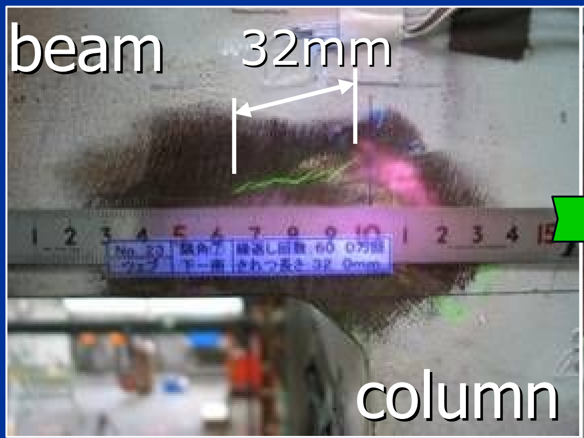


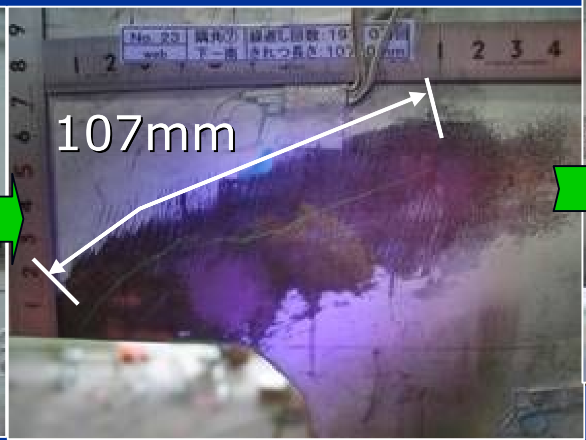
Detected before the fatigue test　　　at 2 million cycles

疲労亀裂の発生と進展状況（WF type）

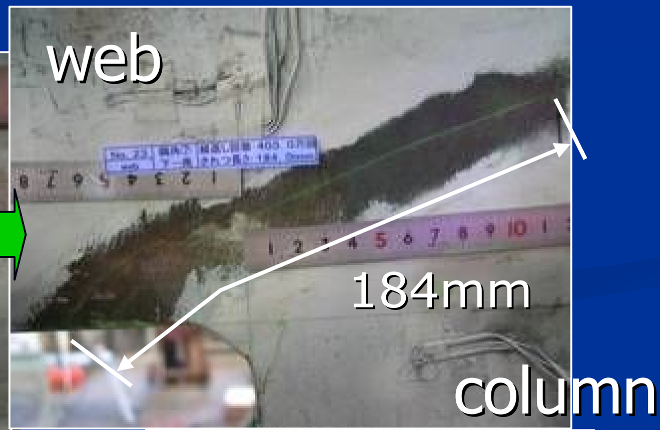


WF-PP16
Detected at 0.6 million cycles



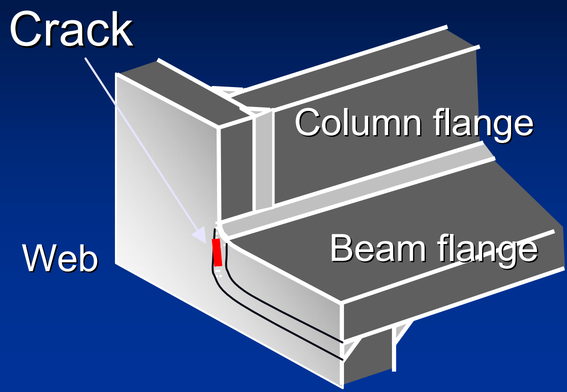


at 2 million cycles



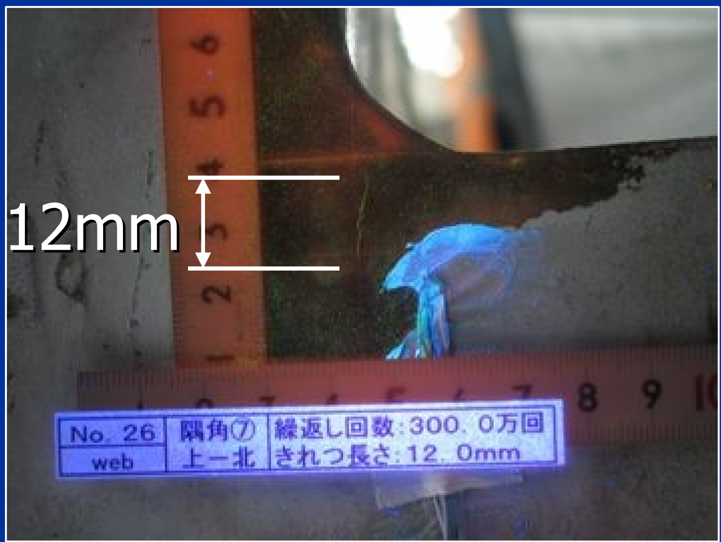
at 4 million cycles

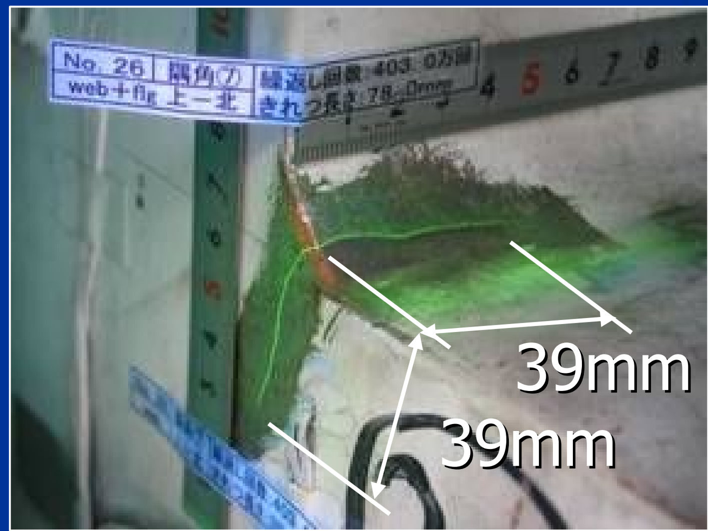
疲労亀裂の発生と進展状況
（WF type）



WF-PP20

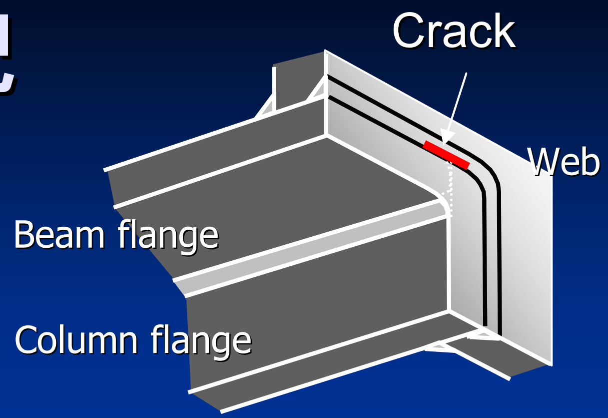
Detected at 3.0 million cycles





at 4 million cycles

疲労亀裂の発生と進展状況（FF type）



FF-PP16

Detected at 0.14 million cycles

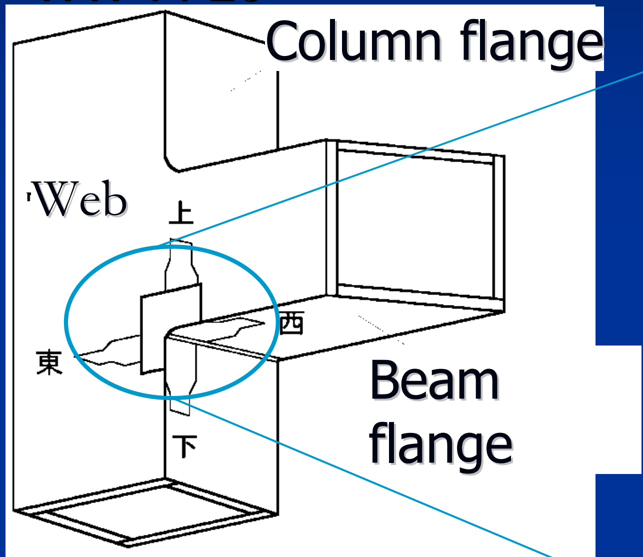
Repaired by stop-hole

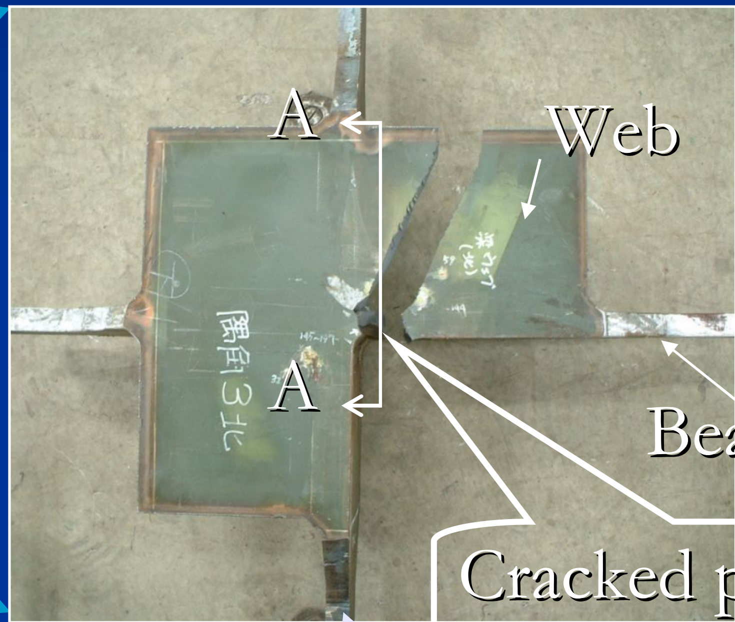
at 4 million cycles

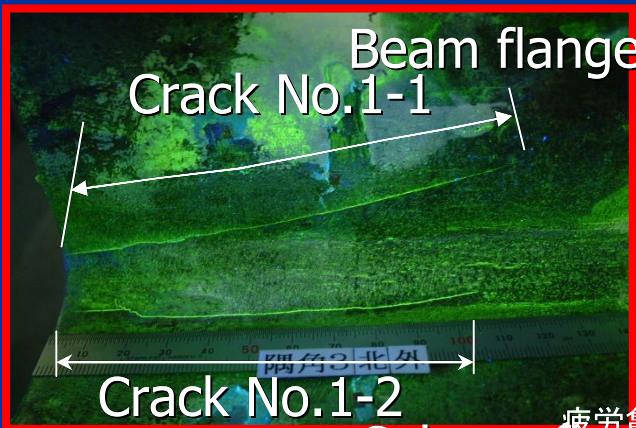
Stiffening plate

疲労亀裂の破面調査

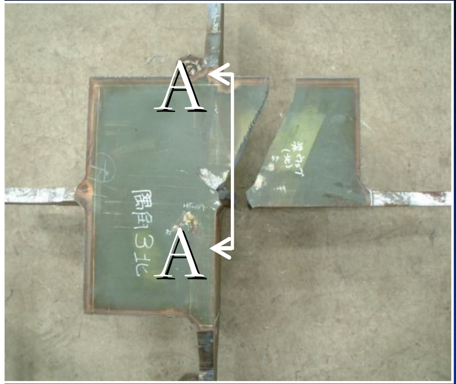
WW-PP20





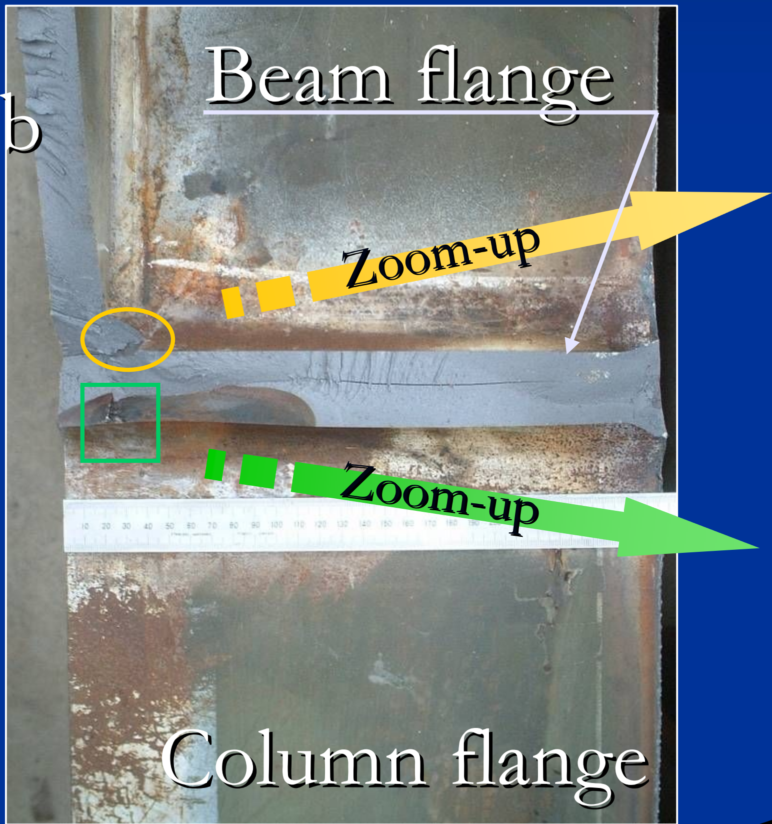


疲労破面

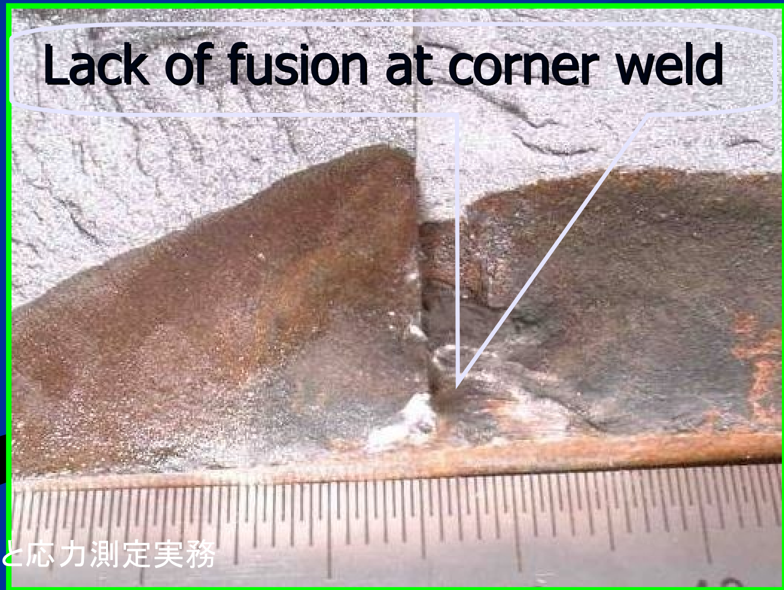

A
A

A-A

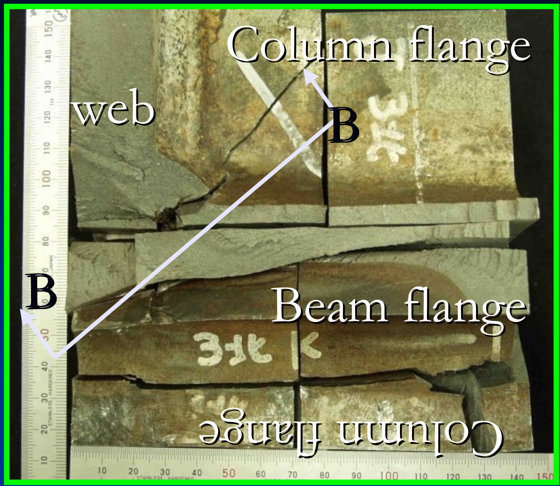
Web


Beam flange
Zoom-up
Zoom-up
Column flange


B
B

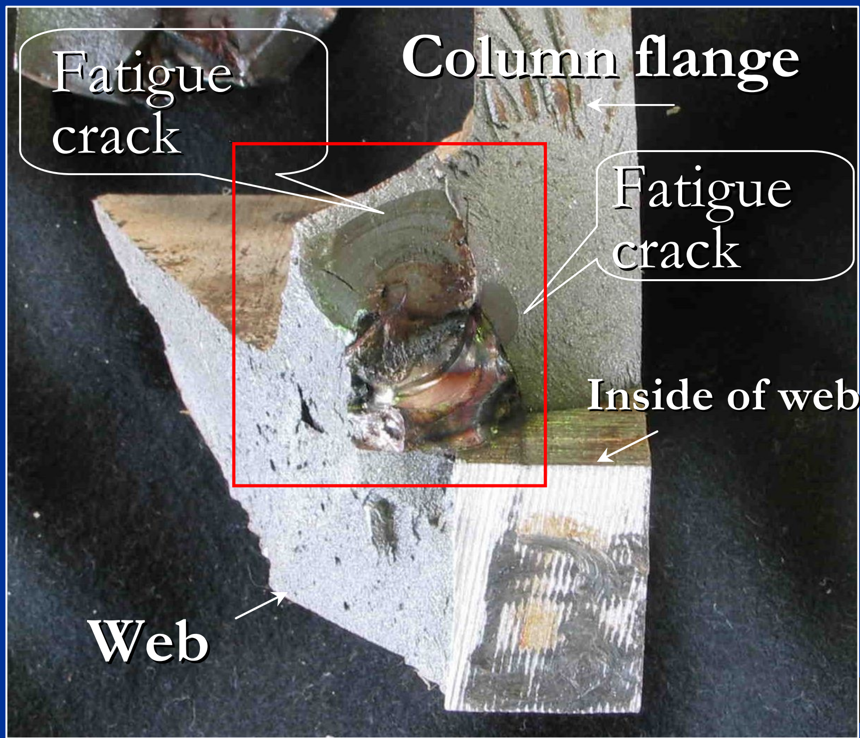

Lack of fusion at corner weld

未溶着部からの疲労亀裂



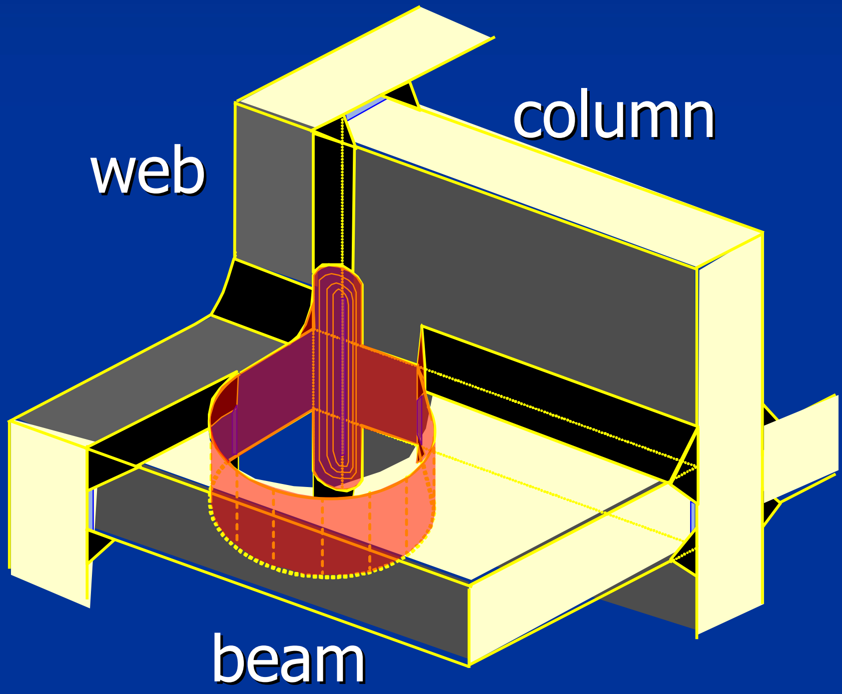
Fatigue cracks

B-B

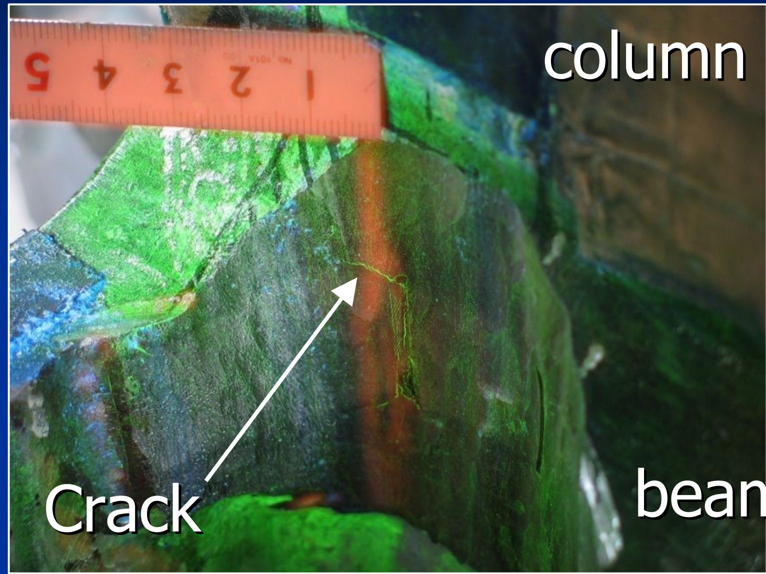


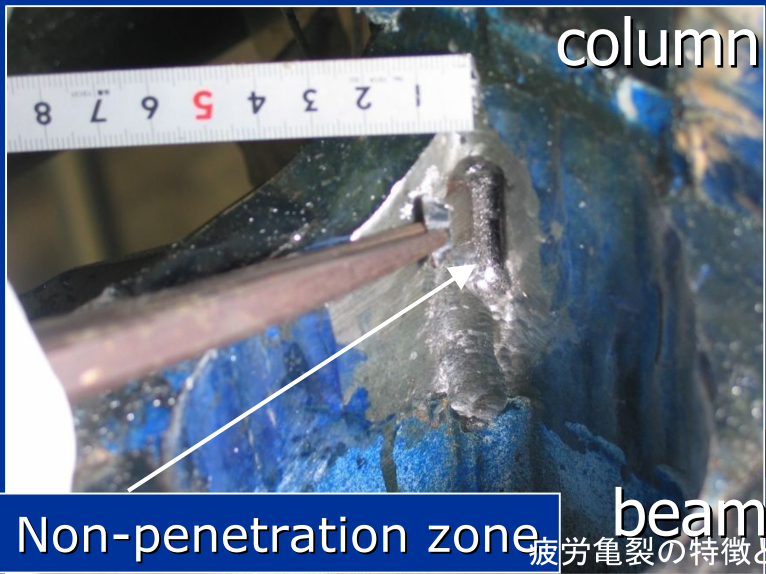
Non-penetration zone

補修工法の検討(スカラップ工法)



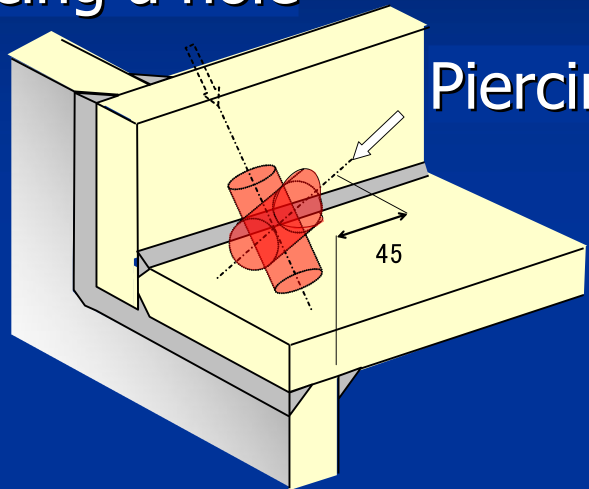
補修工法の試行（スカラップ法）



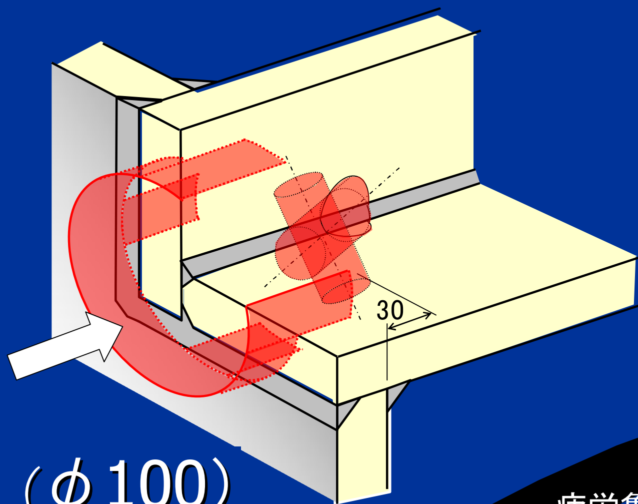


大コアによる補修工法の試行

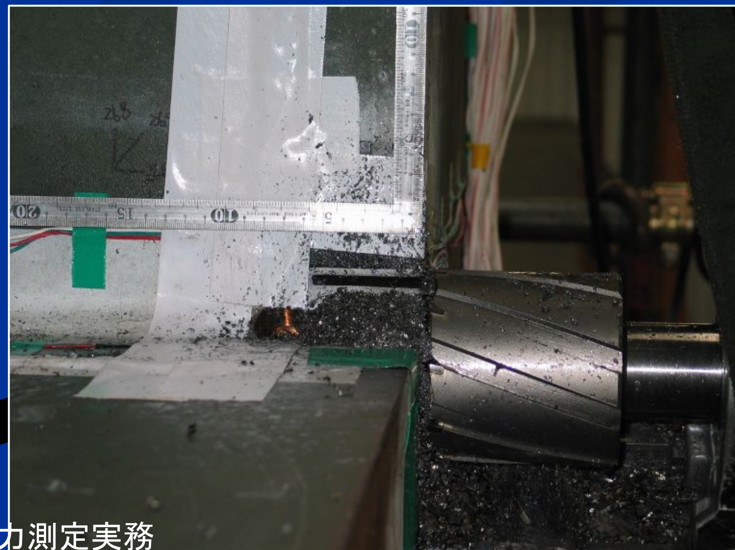
Piercing a hole



Piercing a hole

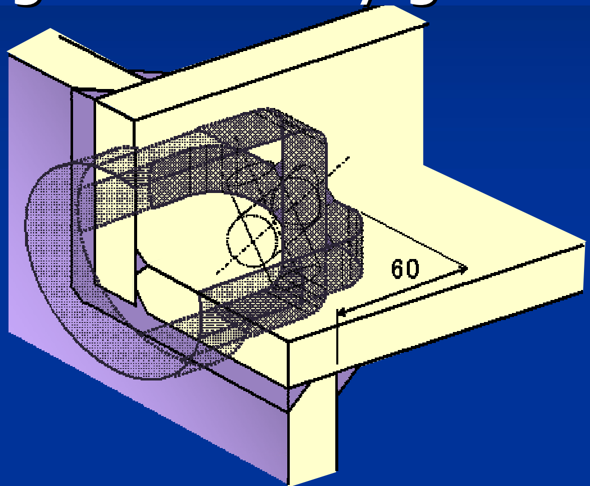


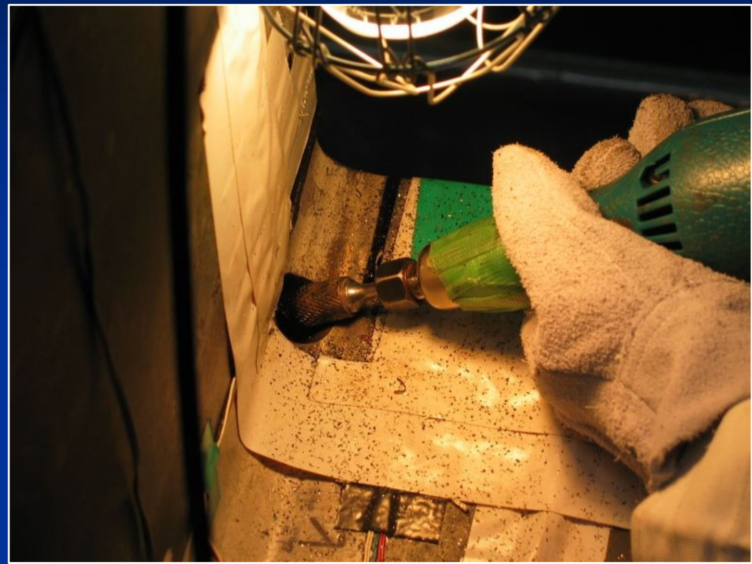
Coring（φ100）



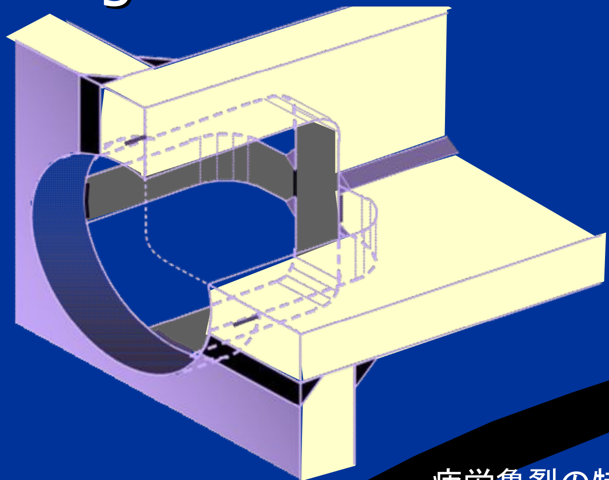
大コアによる補修工法の試行

Cutting out core by grinding





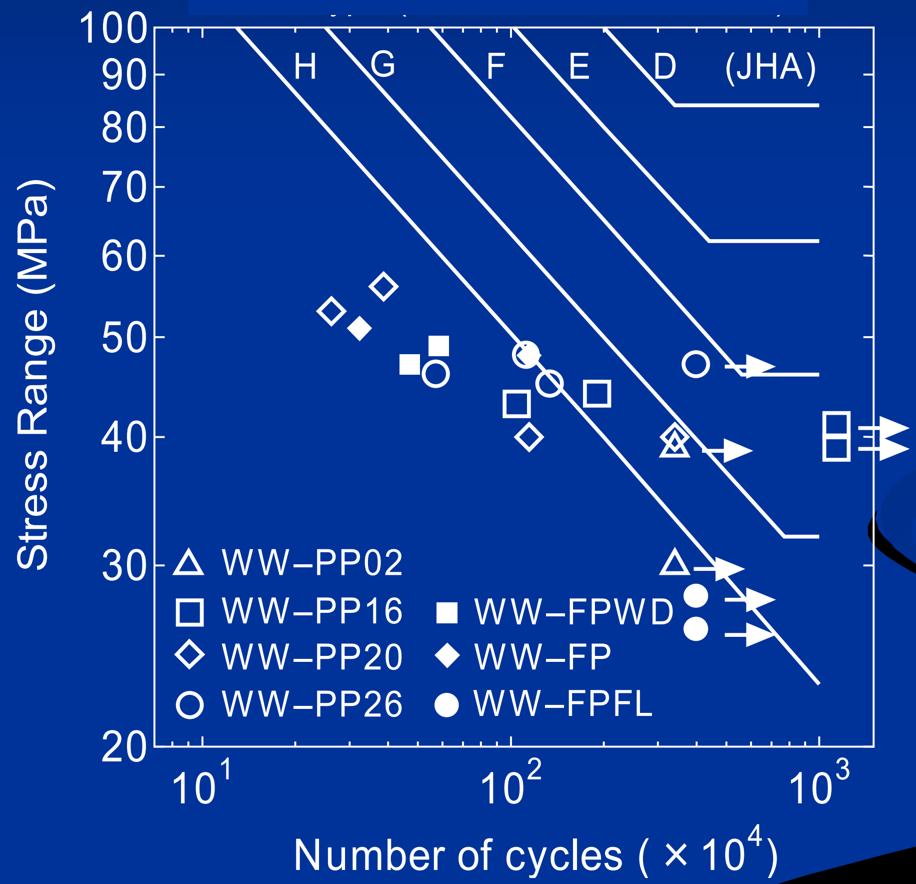
Surfacing inside core

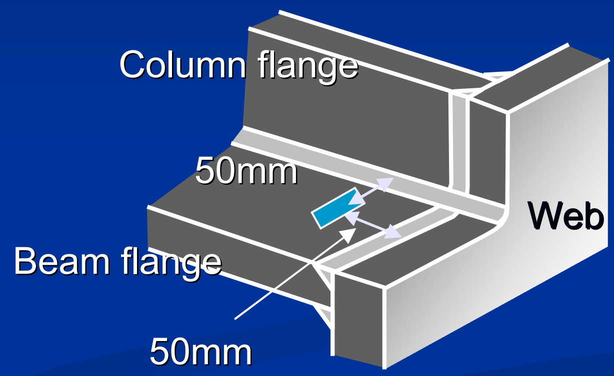


改良型大コア法の試行




疲労強度評価 (WWタイプ)



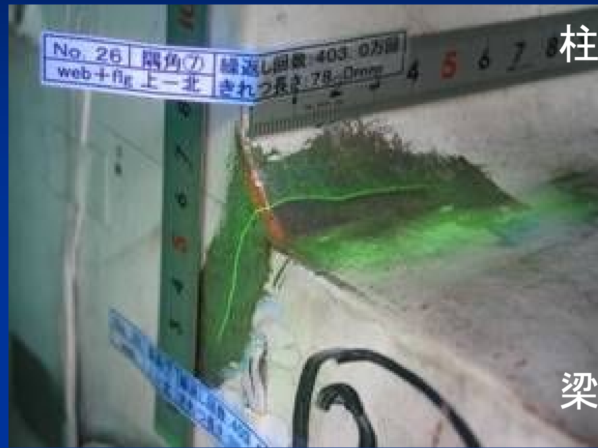


Category	Fatigue strength at 2 million cycles (MPa)
D	100
E	80
F	65
G	50
H	40

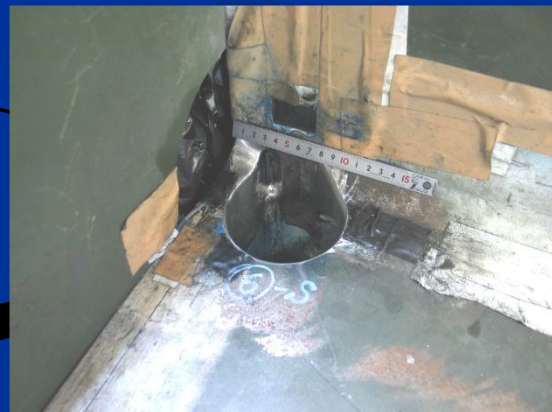
- Stress range measured at 50 × 50mm
- Number of cycles at crack length of 30mm

鋼製橋脚隅角部の
疲労損傷と補修補強方法

実橋に生じた疲労亀裂
（首都高HPより引用）



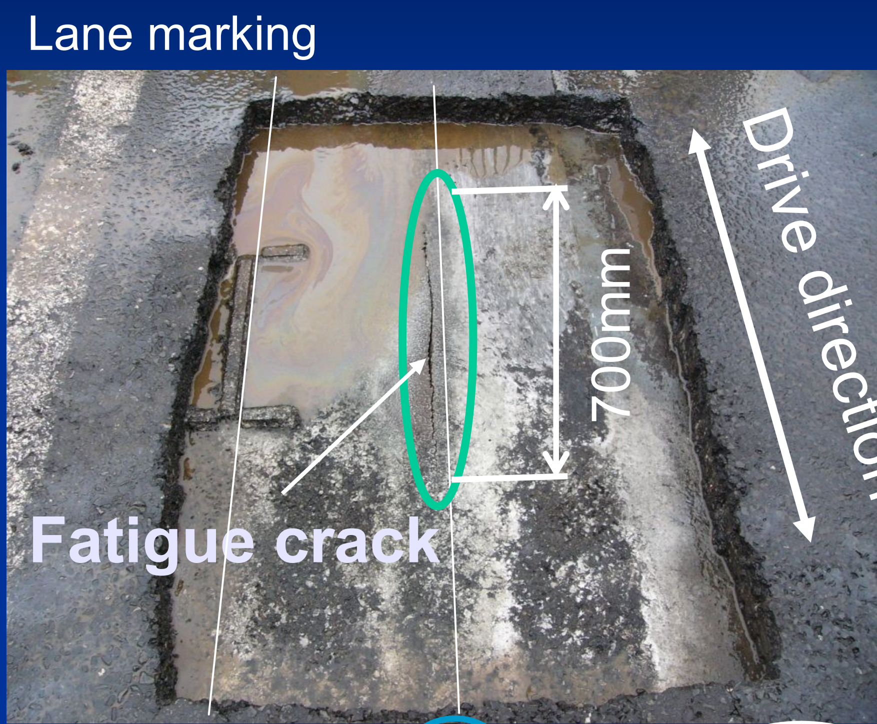
試験体に生じた疲労亀裂

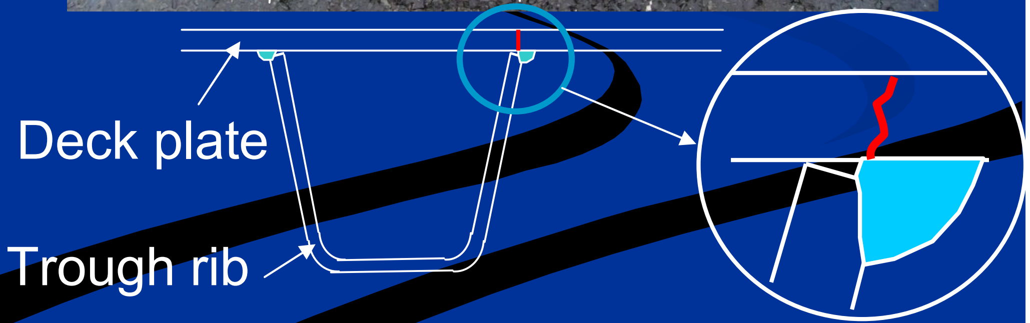


各種の補修・補強工法（試験体で試行した例）

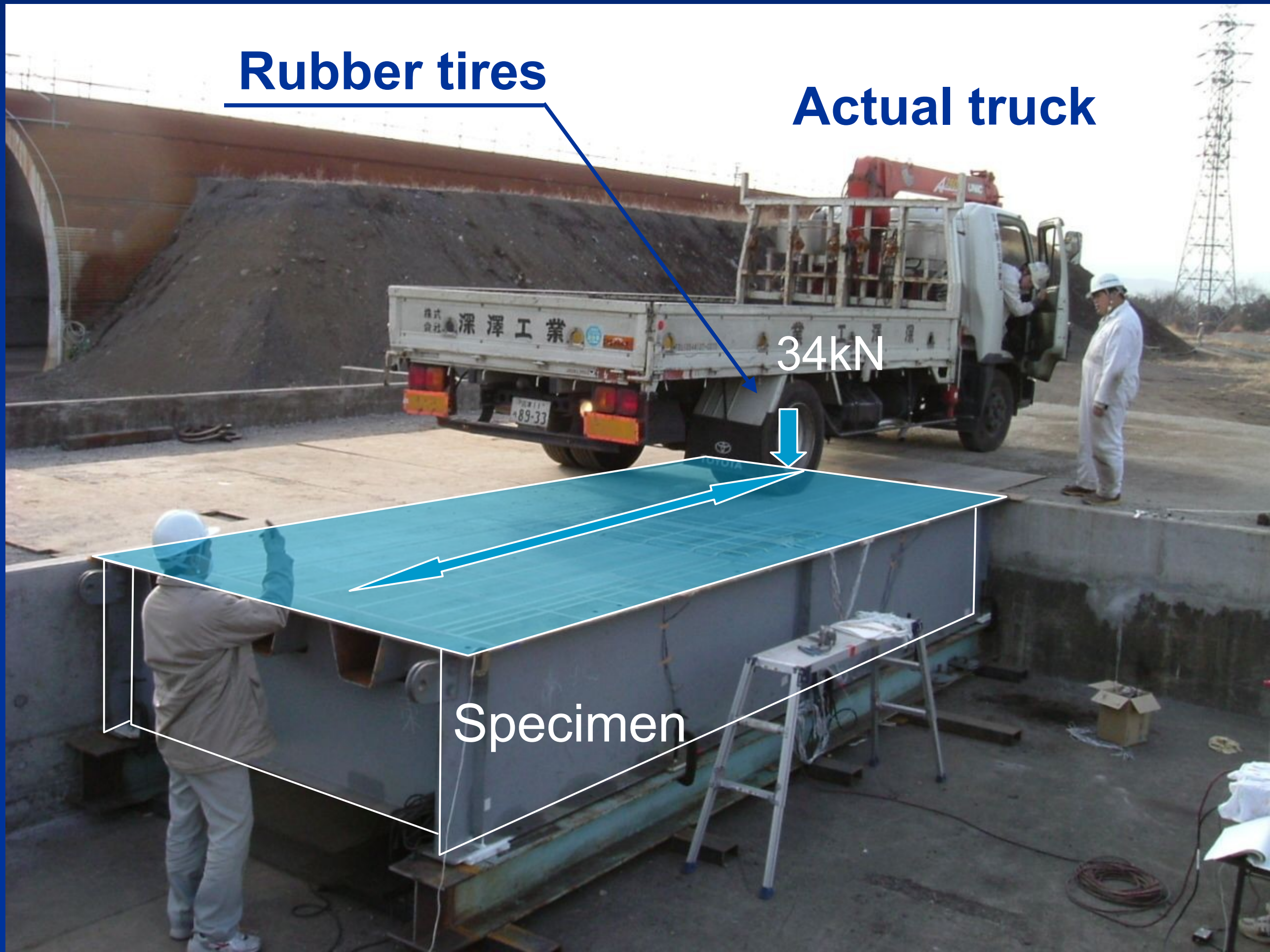
鋼床版の疲労損傷対策


Deck plate
Longitudinal rib
Transverse rib
Main girder
Main girder


Lane marking
Drive direction
700mm
Fatigue crack


Deck plate
Trough rib

実トラック載荷試験による応力変形挙動の詳細調査



載荷試験状況

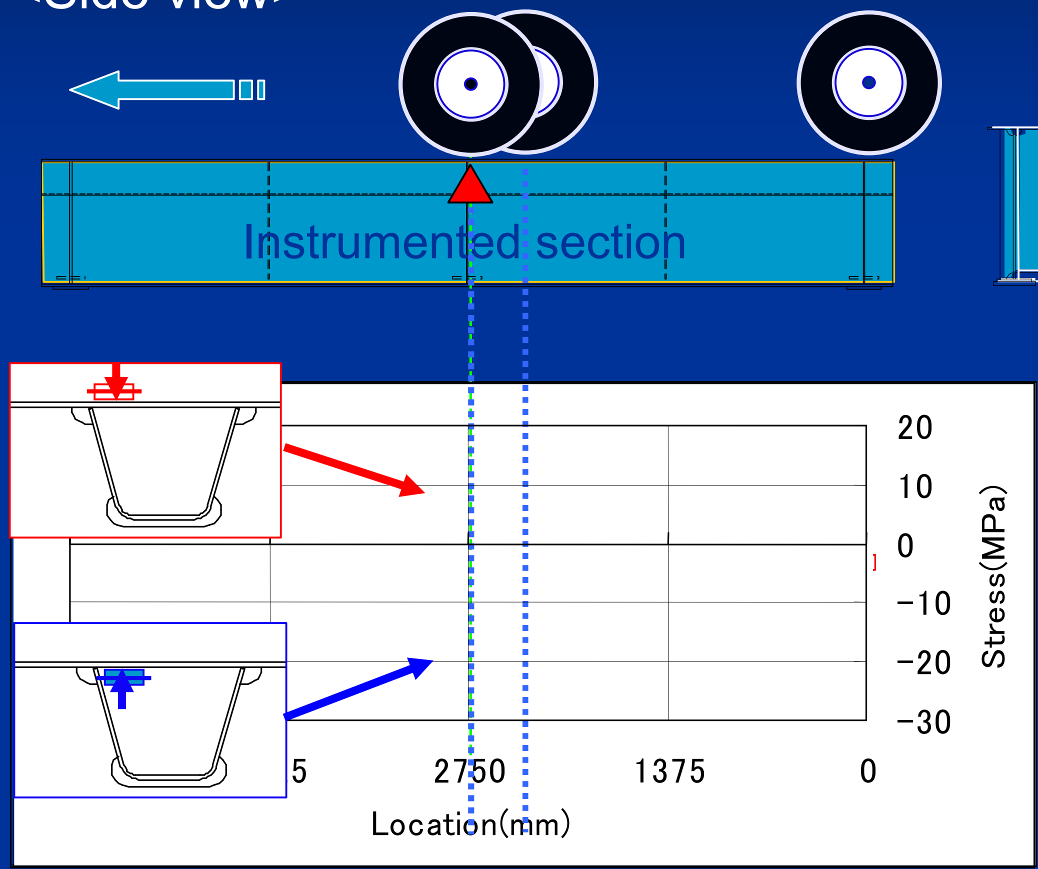
Moving of truck


Checking transverse location

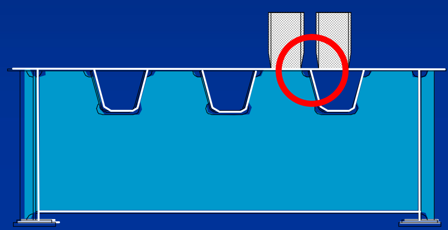

Checking longitudinal location

トラック載荷試験結果の一例

<Side view>

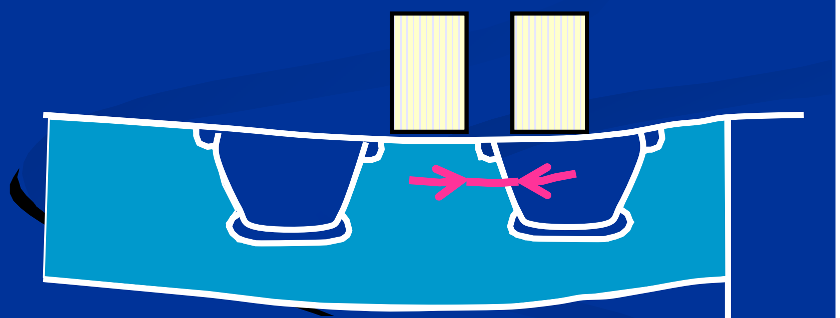


<Cross section view>

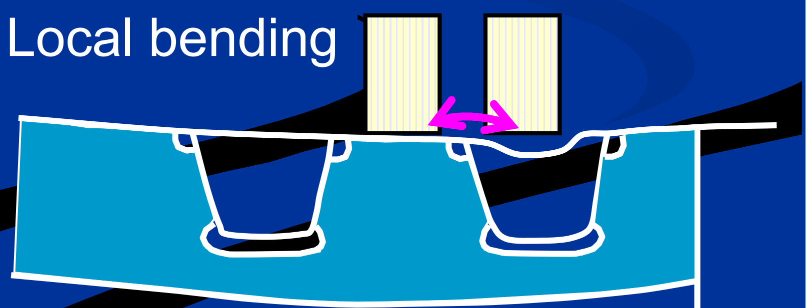


Instrumented section

Transverse rib action



Local bending



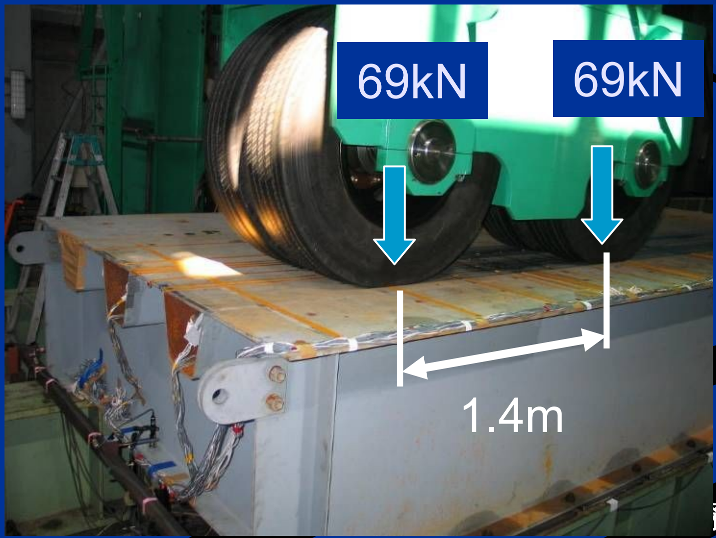
車両の通過によって複雑に変化

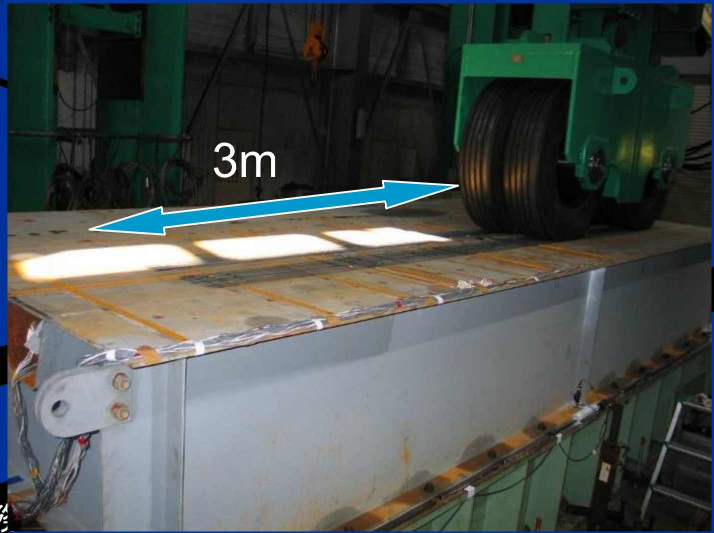
移動載荷疲労試験

Specimen

Loading system:
actual double rubber tire
tandem axle

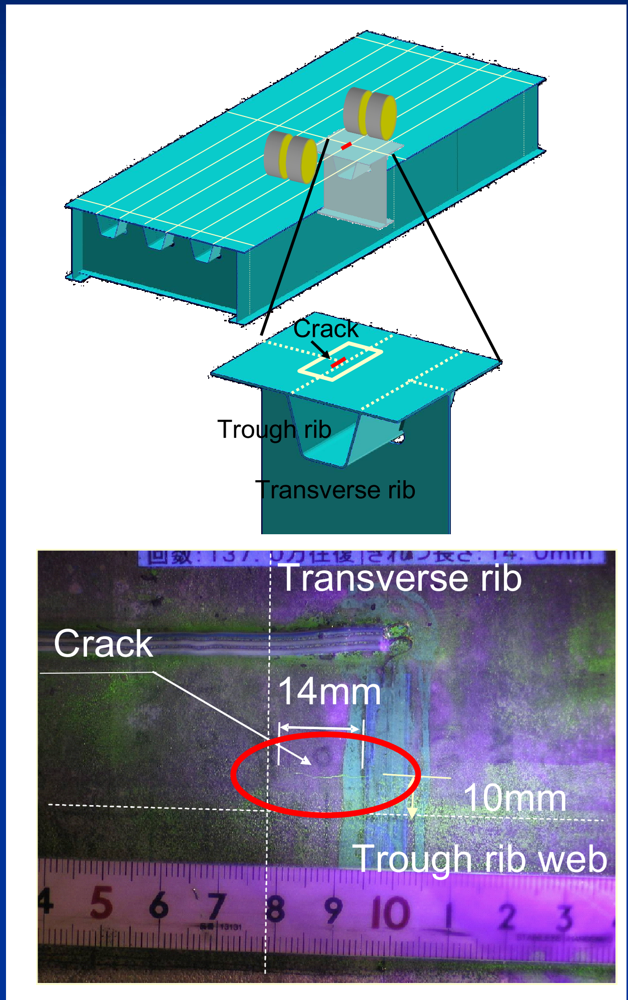
Corresponding to the rear wheels of 350kN class truck



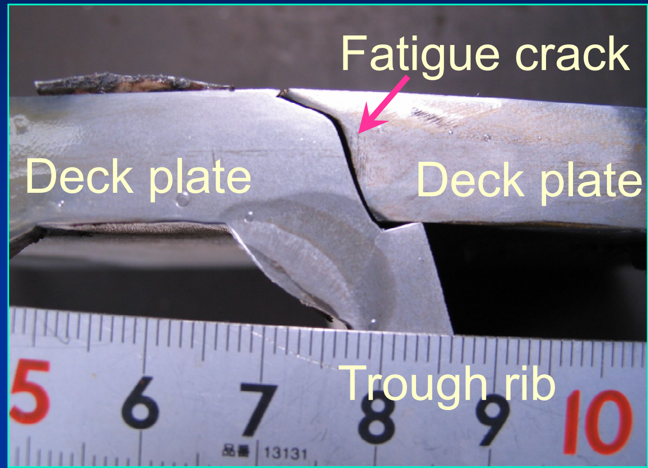


輪荷重疲労試験状況

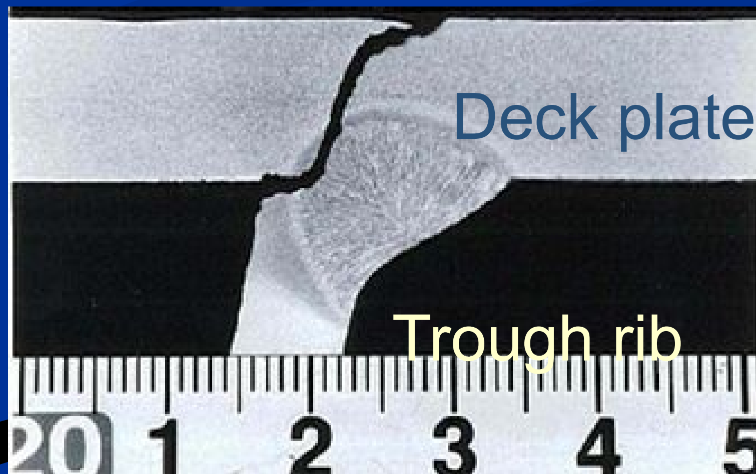
疲労試験による疲労亀裂の再現



試験体デッキプレート上面に現れた疲労亀裂



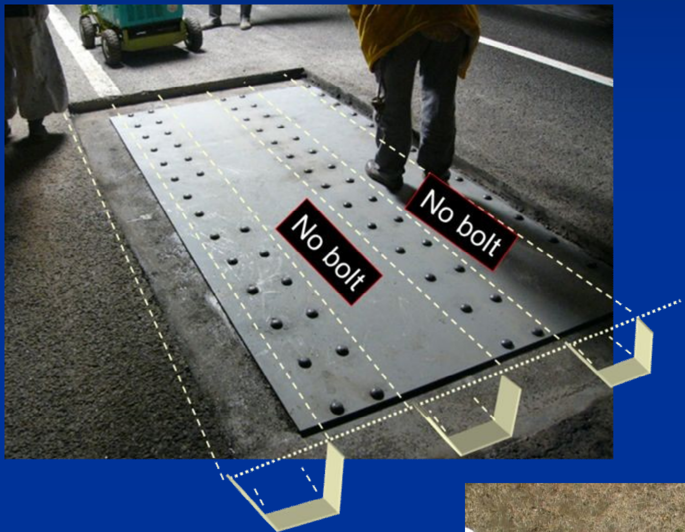
疲労試験で再現した疲労亀裂



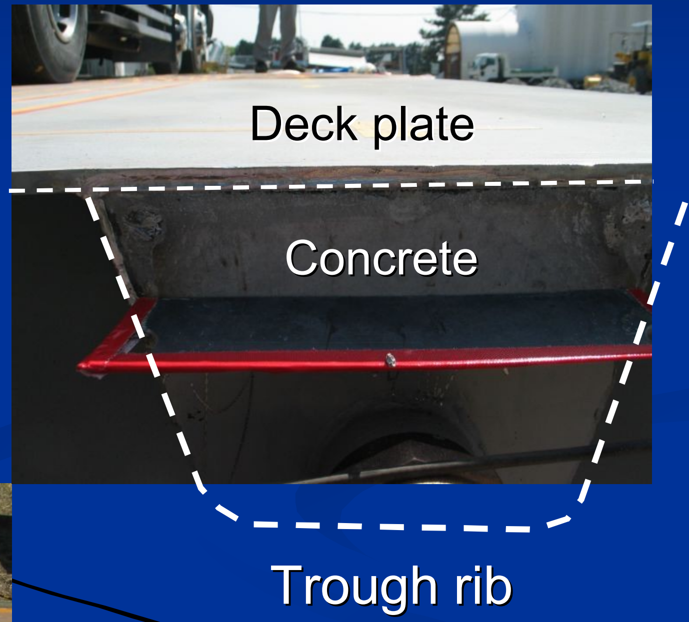
実橋で見つかった疲労亀裂

補強工法案

鋼板敷設

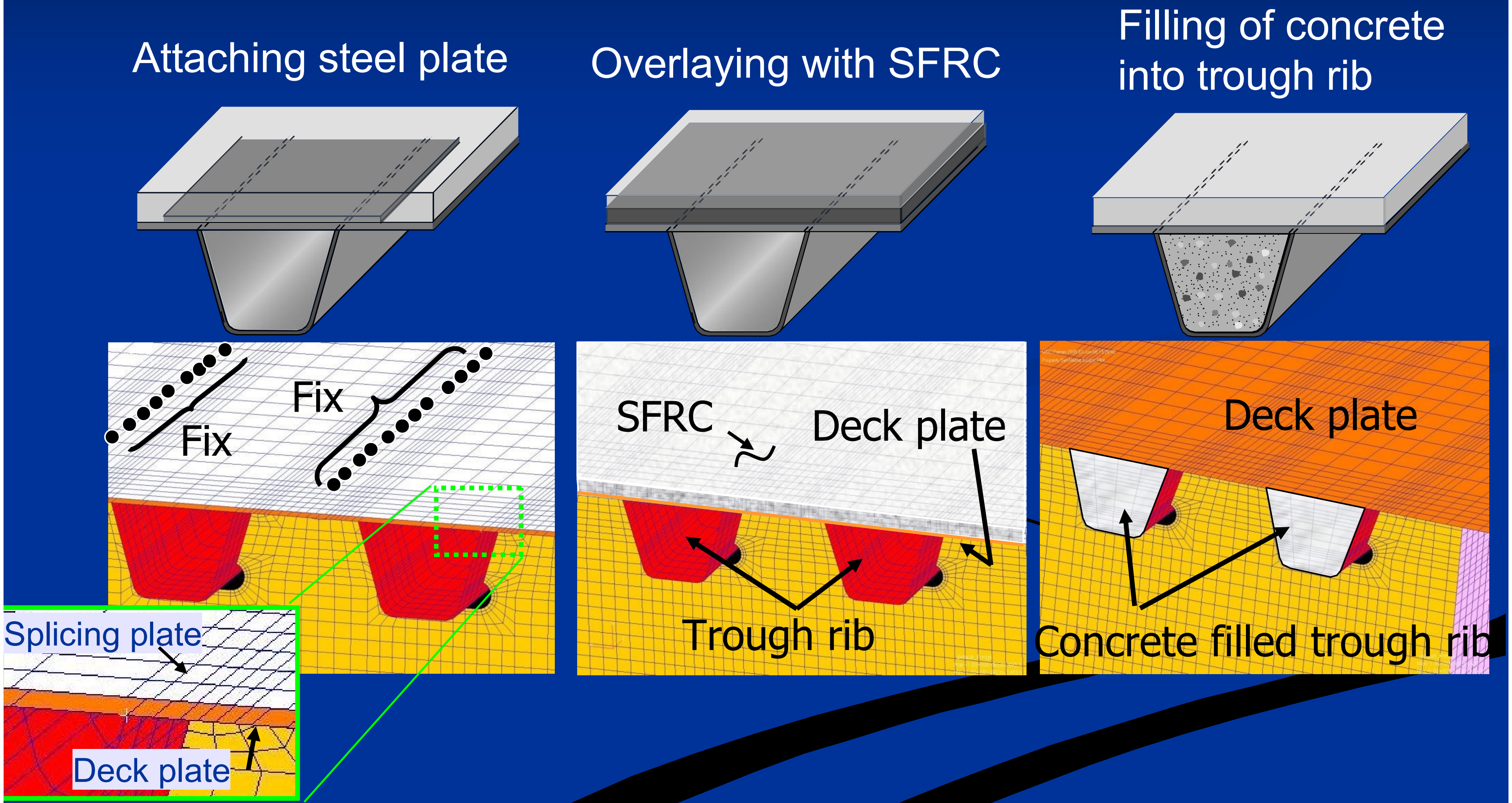


Uリブ内コンクリート充填



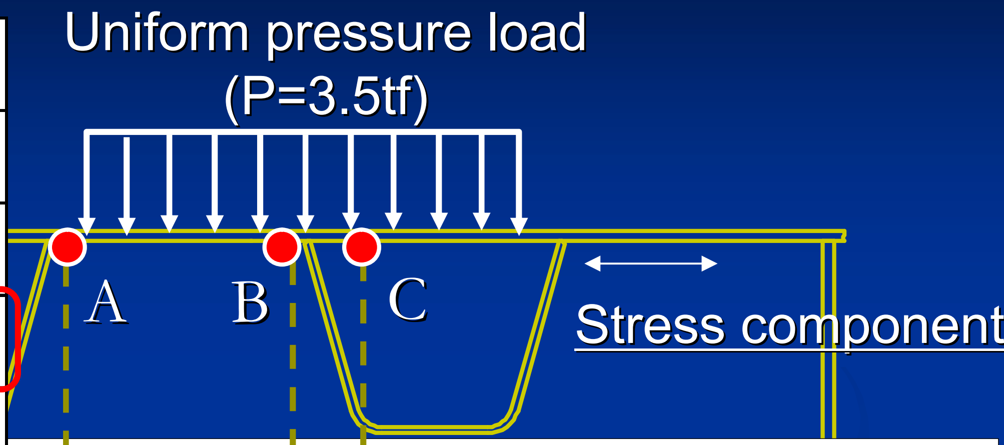
SFRC敷設

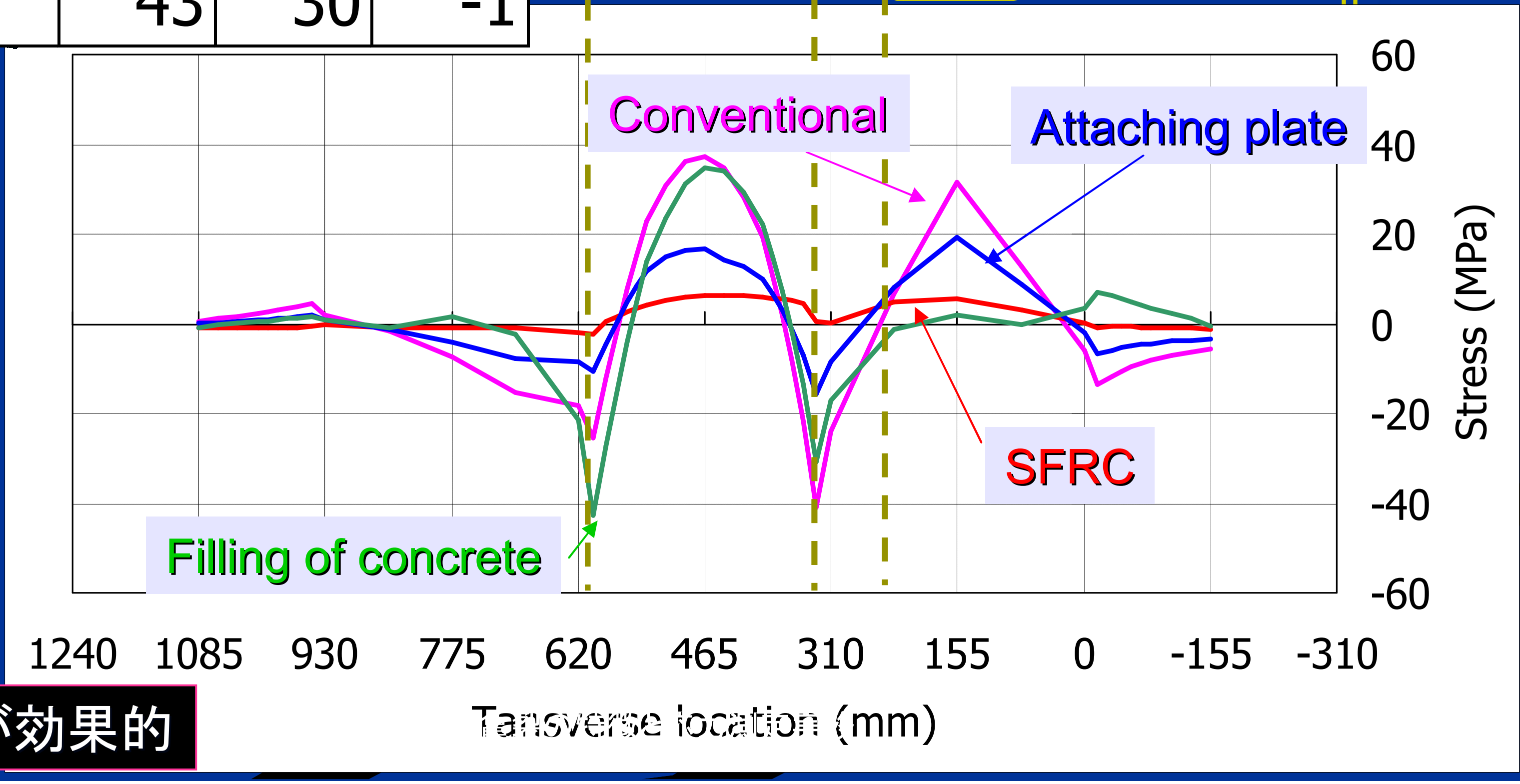
FEM解析による予備検討



FEM解析による補強工法の検討

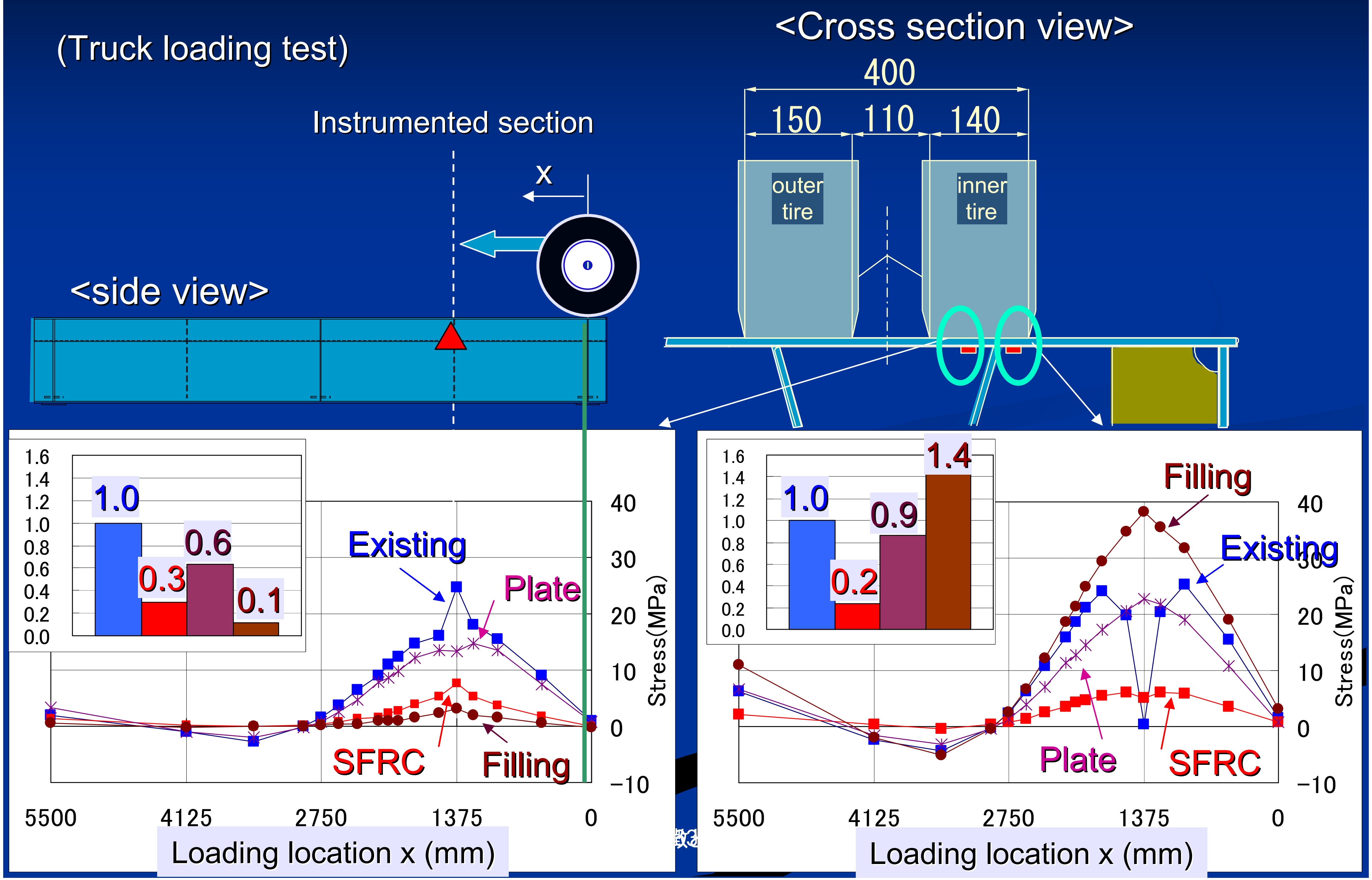
	A	B	C
Conventional	25	41	7
Plate	2	15	8
SFRC	10	1	5
Conc.Fill	43	30	-1



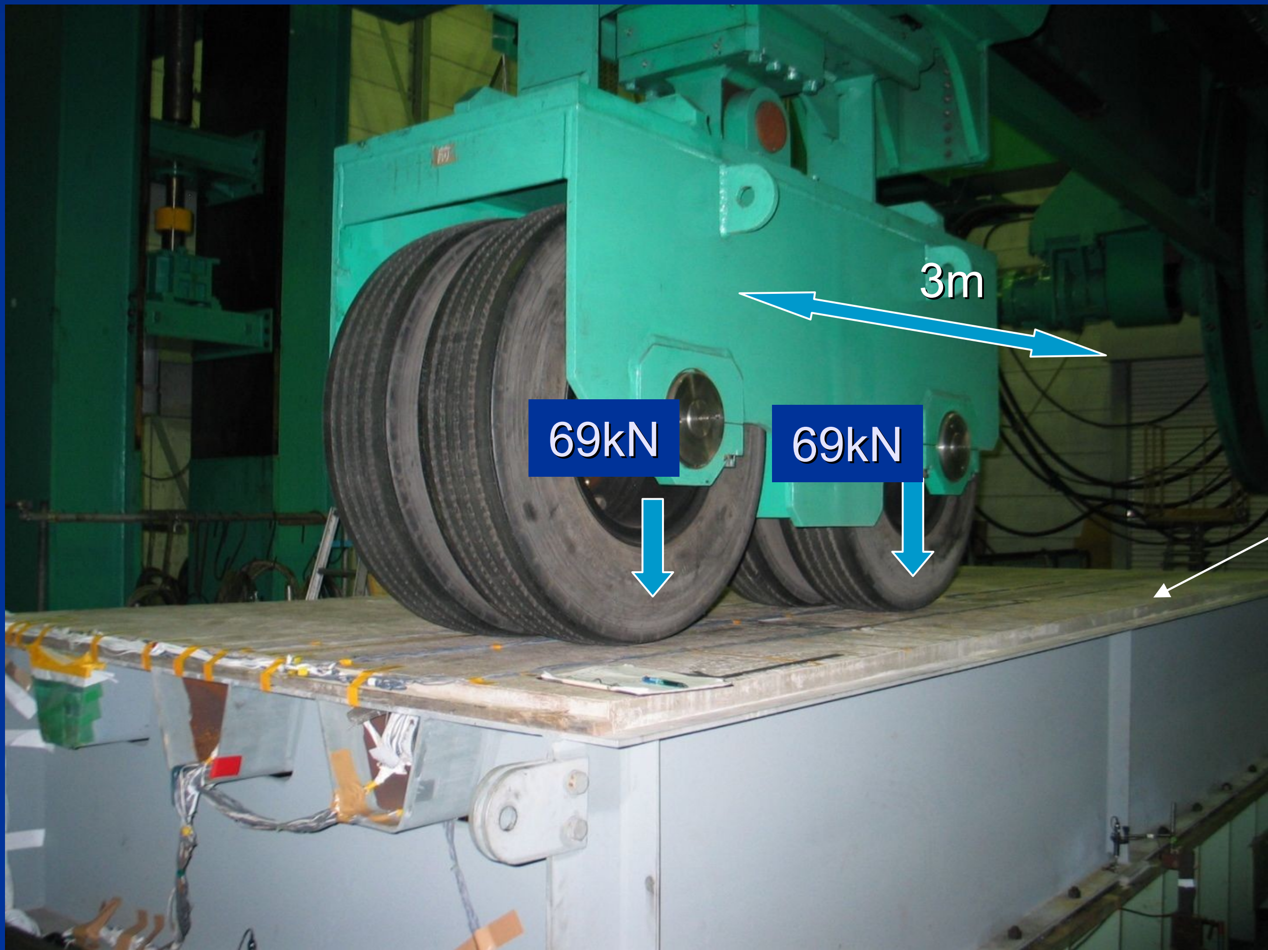


SFRC補強が効果的

実載荷試験による補強効果の確認



輪荷重疲労試験による
SFRC補強効果の検証

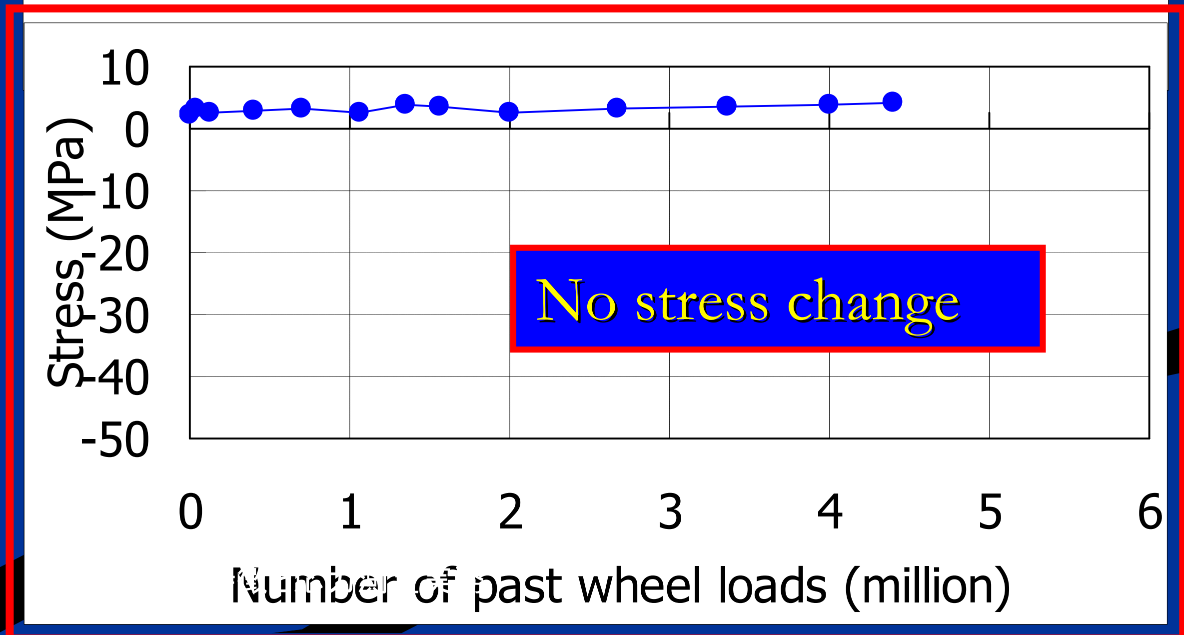


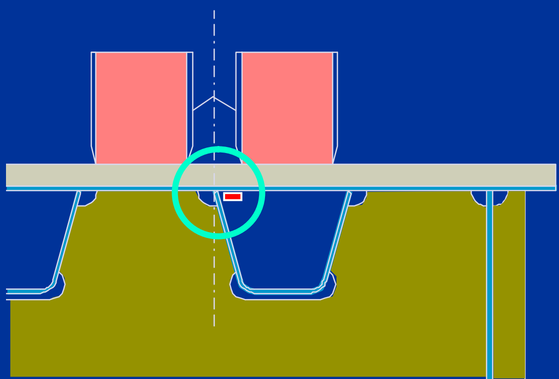
SFRC舗装

疲労試験結果

Conventional

Retrofitted





まとめ（損傷対策の流れ）

- 原因の特定
  - 実構造の応力変形挙動を詳細かつ正確に把握
    - 実橋測定、実橋調査、FEM解析、再現試験など
- 対策の効果確認
  - 事前の詳細な検討
    - FEM解析、基礎実験、資料収集・分析
  - 実物大試験体での効果検証
    - 載荷試験や疲労試験
  - フォローアップ

ご清聴ありがとうございました