

令和7年10月3日

鋼橋の疲労研究55年

三木千壽

東京工業大学名誉教授
東京都市大学名誉学長

鋼橋の疲労研究55年

土木分野では関心の低かった溶接構造の疲労を研究して55年
大学の小さな実験装置と**本州四国連絡橋**の大型疲労試験の組み合わせから得られた知見は、国際的にも新しい疲労設計方法と品質管理の構築につながりました。

疲労研究の導入として始めた文献による事例研究は、東海道新幹線、東名高速道路、首都高速道路などでの疲労損傷の調査とその対策につながり、**レトロフィッティング工学**の展開につながりました。

橋梁用高性能鋼材からは、新たな橋梁構造の可能性が見えてきました。

小鳴門橋、1961年7月開通：実家の島に橋が架かりました。



同僚の皆さんと博士（52名）の研究テーマ

（課程博士30名、論文博士22名）

特任教授：市川篤司

助手：佐々木利視、森猛、舘石和雄、穴見健吾、佐々木栄一、田辺篤史、鈴木啓伍、関屋英彦

技官：鶴巻正行、河野雅、竹淵敏郎

学位論文の分野と数

疲労強度評価（亀裂発生と進展、破壊力学応用） 10

疲労強度改善（構造改善、止端処理、溶接材料） 6

変位と局部応力（3D変位、変位誘起疲労、実応力比） 3

鋼材開発（BHPS, 非磁性鋼、橋梁への適用） 3

耐震強度評価（Low cycle fatigue） 4

耐震補強（合成化、リブ補強、ダンパー） 3

腐食（測定、座屈、疲労） 2

メンテナンス計画（データベース、点検ソフト） 3

鋼床版（局部応力評価、構造改善、補修補強） 3

合成構造（パイプトラス橋、合成構造化） 2

橋梁振動（減衰係数評価、衝撃係数） 2

モニタリング（BWIM、ネットワーク、MEMS応用） 3

非破壊検査（超音波探傷、画像化、フェーズドアレイ） 3

大学教員20名 + α 、

東工大助手時代

鋼橋の疲労研究に入る

指導教官は**西村俊夫**先生

研究室設置に伴って購入した50トンの疲労試験機を使っての研究対象は問わない。

高力ボルト摩擦接合、軸力及び表面処理の影響

非常勤講師の**奥村敏恵**先生（東大教授）

疲労の研究はこれから重要となる。自分もIllinois 大学留学時代にやった。東大でもやろうと考えていた。でもだれもやってくれない。

損傷事例を学ぶと良い。先生が集められていた沢山の資料をいただく。

建築学科の**藤本盛久**教授

低サイクル疲労の試験方法のJIS 化をやりたいので手伝わないか。

飯田國廣先生（東大船舶教授、疲労研究の第1人者）をご紹介いただく。

疲労研究の師匠

土木学会誌の記事

当時は学会誌に論文的な記事
が登載されていました。

学位論文の第1章です。

事例研究はライフワークになっています。

- ・ 鋼橋の疲労と破壊、朝倉書店 2011
- ・ 橋の成人病入門、建設図書 2017
- ・ Retrofitting engineering for Fatigue Damaged Steel Structures, Springer 2025

引張応力に起因する鋼橋梁の変状

西村 俊夫

正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科

三木 千寿

正会員 工修 東京工業大学助手 工学部土木工学科

1. はじめに

鋼構造物中の引張応力を受ける部分に突然きれつを生じるぜい性破壊、あるいは長期間にわたる応力の繰返しにより起こる疲れ破壊は、従来土木技術者にとって、さほど関心の深い問題ではなかった。しかし、実際に鋼構造物に発生した破壊事故には、腐食によるもの、座屈によるもの、あるいは災害等によるもののほか、ぜい性破壊あるいは疲れ破壊に起因するものがときどき報告されている。なお、これらは鋼構造物の安全性を確保するうえで、かなり重要な部分を占めているものと考えられる。

本文は内外の鋼橋梁において比較的重大なこの種変状を生じたものについてその破壊性状を究明したもので、われわれが橋梁を設計、製作あるいは維持管理する場合に、この種変状の発生を防止し、あるいは発見する一助とするため、その参考資料を提供しようとするものである。引張応力に起因すると考えられる鋼橋梁の変状例で手もとにある資料のうち重要と思われるのが表1である。

2. 若干の変状例

表1に示した各種の変状例のうち若干のものについて、その破壊状況、原因等を要約し、以下に示す。

(1) Hasselt 橋

a) 事故の状況

本橋は図-1に示すような全溶接のフィレンディール橋であるが、溶接構造として最初の大きな破壊事故をうけ落橋した。溶接工法が構造物に本格的に取り入れられてまだ10年も経ない1938年の出来事である。

事故発生時、電車と数人の歩行者が橋の上にいるが全員避難し、人命は失われなかった。事故を目撃した人の証言などからまず横桁の一つが落ち、下弦材に大きなきれつが生じて口を開き、それにより上弦材にすべての荷重が働き、そのアーチ作用の推力が可動端側橋台をせん断破壊し、そのため上弦材にもきれつが生じ最初のきれつ発生後約6分後に全体が3つの部分に壊れて落ちたと

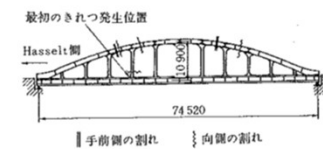


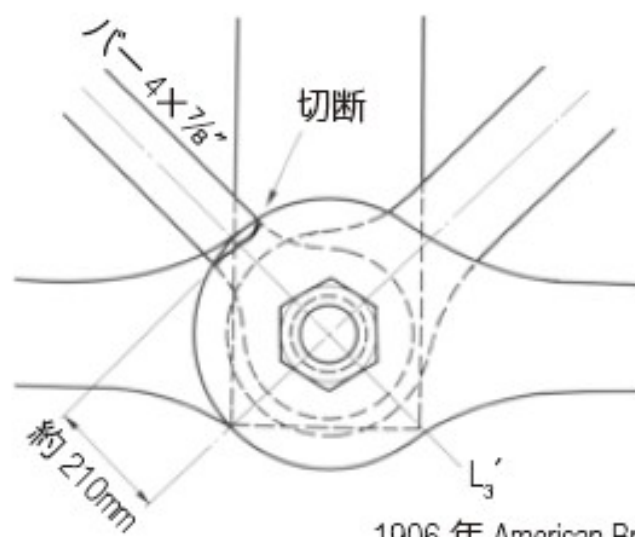
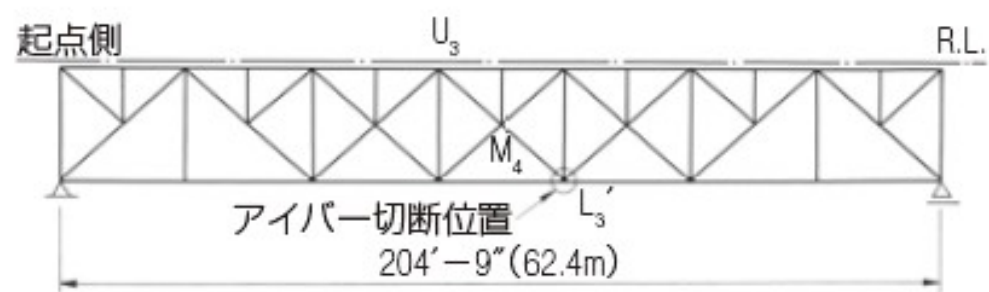
図-1 Hasselt 橋の一般図



Toshio Nishimura



Chitoshi Miki



1906 年 American Bridge co. 製

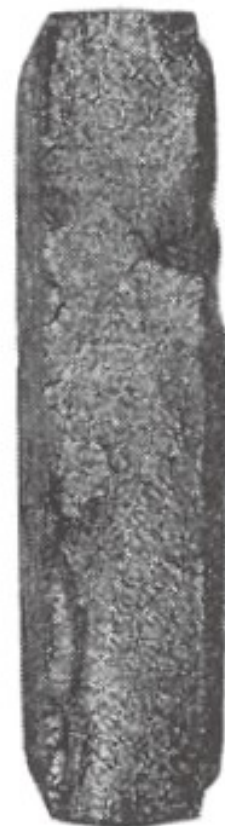


図-7.2 中央本線子野川橋梁のアイバー切断状況

講師、助教授時代(東大・東工大)の研究 別分野の研究が面白そうに見えた時期

東大では新しい分野の研究をするように。

疲労の研究はダメ（東工大某教授からの指示）。

奥村敏恵先生、西野文雄先生からは、疲労の研究を続けるようにとの指導
奥村先生が設置した50tonアムスラー型疲労試験機（堀川浩甫先生が使用）

飯田國廣先生からの、疲労研究への強いお誘い。

溶接構造の疲労研究についての指導者。

溶接学会、造船学会での活動。

土木学会年次講演会では独立した「疲労」のセッションはなし。
最終日の最後に「疲労・継ぎ手」あるいは「溶接・疲労」の
セッションが付けられるのが実態。

疲労研究に本格的に取り組む（東工大助教授/教授として）

飯田先生の疲労研究についての教え

疲労現象は疲労亀裂の発生、進展、破壊に分けて考えること

破壊力学が使える？

発生：局所的なひずみ

進展：Paris 則, $da/dN = C(\Delta K)^m$

破壊： K_c

疲労を説明するのは応力ではなく**ひずみ**（塑性ひずみと弾性ひずみ）

鋼橋技術研究会の活動：施工部会

道路橋示方書施工編の勉強（耐荷力は長谷川さん、外力系は藤野さん）

製作と架設の現場を学ぶー現場はね・・・

疲労と溶接の品質、製作精度との関係

International Institute of Welding(IIW)での活動1982-

研究発表及び基準類制定等につながる委員会活動

XIIIが疲労の委員会

疲労の研究者がほぼそろった場となる。

S. Maddox, P. Hargensen, P. Hobbacher, G. Marquis,……

年次大会と中間会議、年2回顔を合わせて議論することになる。厳しい場

本州四国連絡橋の疲労試験 疲労設計・施工管理

本四疲労との出会い 大変恵まれた環境での疲労研究

本州四国連絡橋公団が富士市の建設機械化研究所に400トンの疲労試験機を設置。
高強度鋼材の溶接部や鋼橋のディテールの疲労

トラス格点部モデルの疲労試験で、理解できない結果が続出した。

その一つが

試験部（**格点部**）からは疲労が発生せず、下弦材**角継ぎ手**から破壊。

これが真実ならトラスの設計ができなくなる。

設計部長の**田島二郎さん**から、一緒に研究しないかとのお誘い。

縦ビード溶接は荷重非伝達の継手。なぜ、それが問題になるのか？

疲労亀裂は角接手のルートに残された小さなブローホールであること。

小さいブローホールと溶接残留応力の影響が強いことを定量的に示した。

何れも、それまでの疲労研究では問題にされなかったこと

溶接欠陥、溶接残留応力、寸法効果、鋼材強度依存性(高張力鋼) など
まさに溶接構造の疲労研究の最先端に引きずり込まれた。

当時の疲労研究では、これらは考えていなかった。

本四大型疲労試験 動的400トン、世界最大

HT80、SM 58 溶接継ぎ手部の疲労強度
縦方向継ぎ手、リブ十字、ガセットなど

構造モデルの疲労

トラス格点：高疲労強度、コンパクト
吊橋ハンガー取り付け部、
斜張橋ケーブルアンカー部、
横トラスと鉄道縦桁の支承構造、
鋼床版、

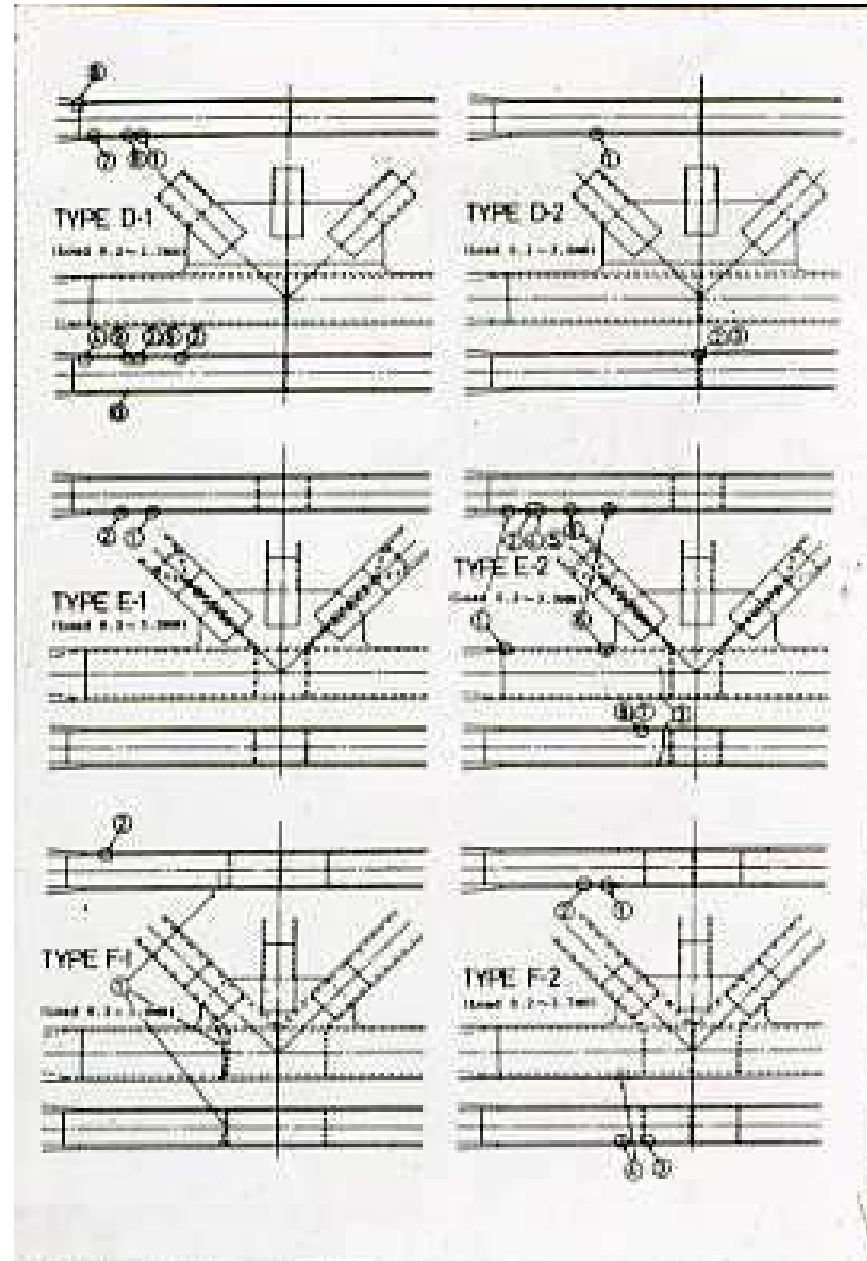


トラス格点の研究

目的は
コンパクトで疲労に強い構造

斜材の取り付けディテールと
格点内のダイヤフラムの配置
およびその取り付けに注目

ここでの経験が
東京ゲートブリッジの設計
につながる



トラス弦材角継ぎ手の研究

縦ビード溶接。

荷重非伝達の継ぎ手。

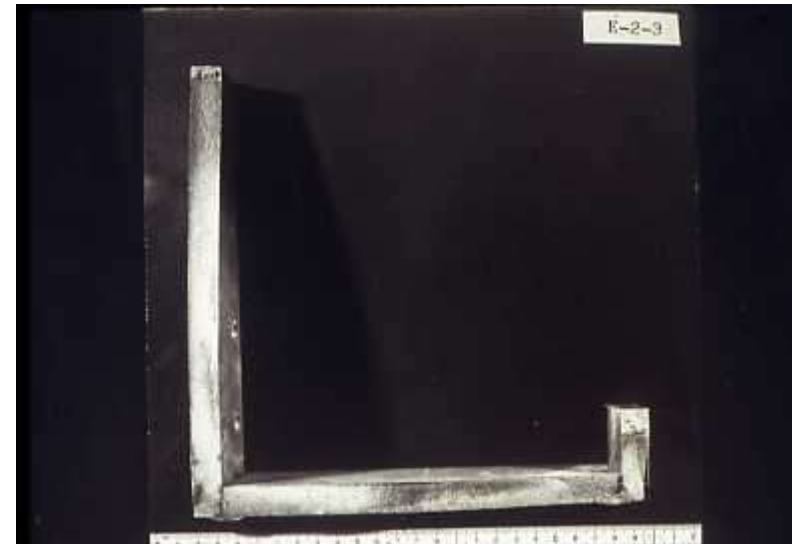
破面の観察と溶接線に沿っての欠陥の観察

サブマージ溶接ではブローホール

手溶接ではルート部の溶け込み不良、特に

棒継ぎ部で大きな凹凸

サブマージ溶接を採用



ブローホールの影響

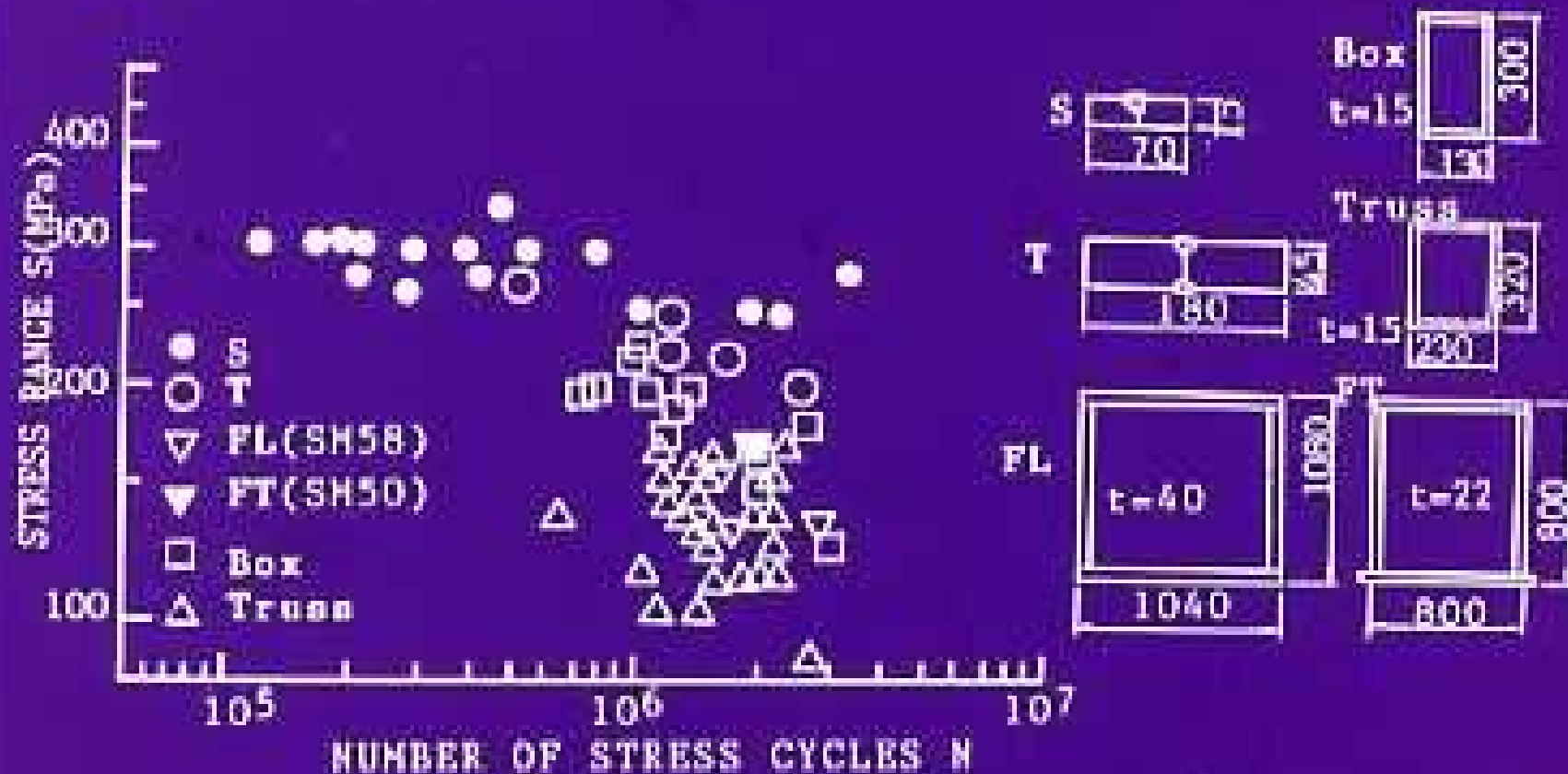
残留応力の影響

いずれも影響は小さいとされていた。



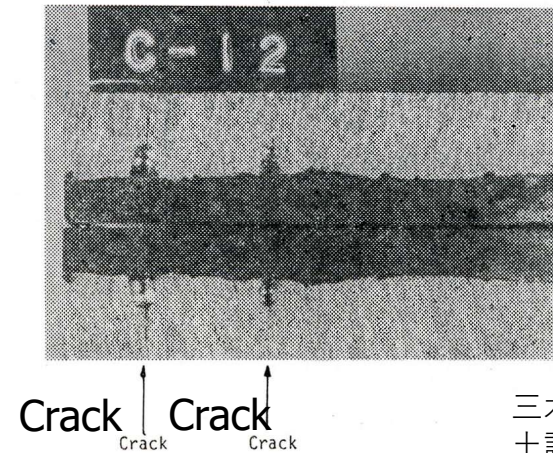
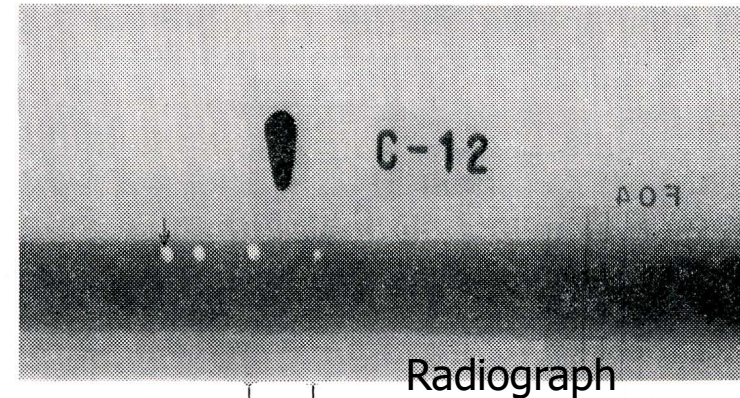
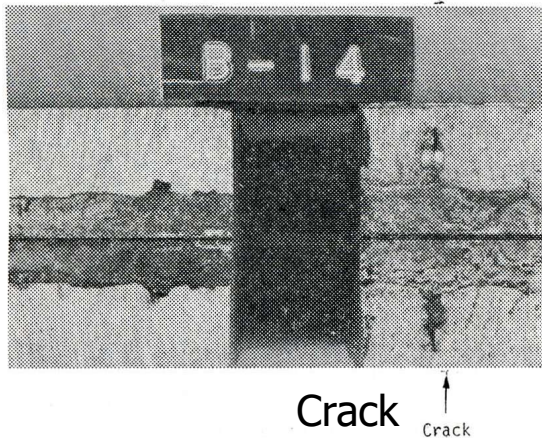
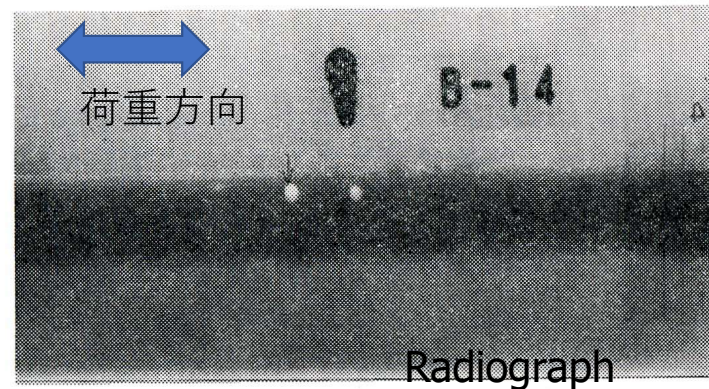
疲労試験結果の整理

小型の継手試験体とトラス弦材とで大きな差。
なぜ？



Longitudinally welded joints and corner joints

ブローホール内在の継ぎ手試験体の疲労試験。
ほしいサイズのブローホールの入った試験体をつくるのに苦労しました。
多くのブローホールから疲労亀裂が発生。



三木・西野、平林
土論1982

ビーチマーク試験の効果

疲労亀裂の発生と進展を観察したい。

応力状態が変わると破面にビーチマークが残る。

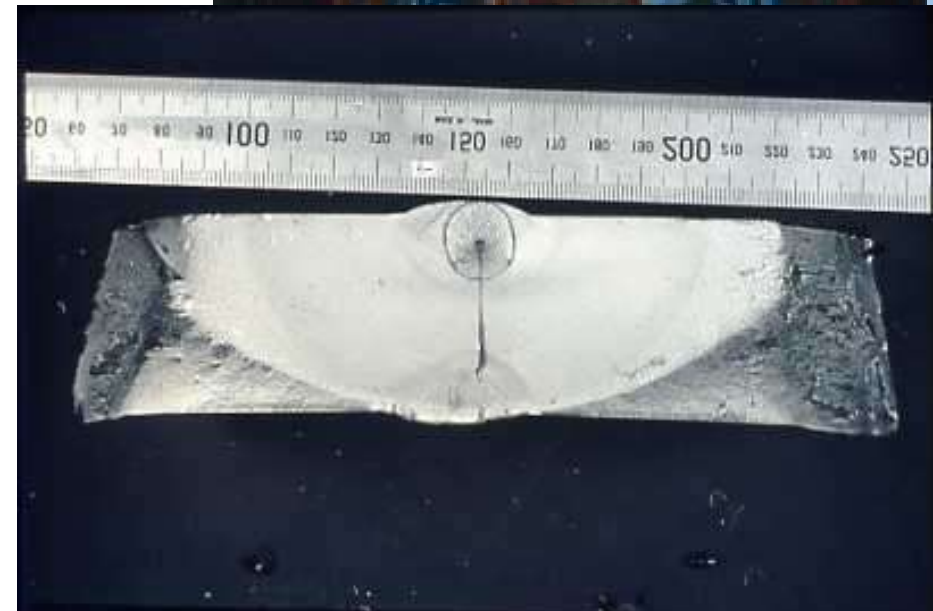
それでは意図的にビーチマークを残そう。

試験時間が倍増することから嫌われた。

多くのことがビーチマークから明確になった。

疲労亀裂の発生と進展寿命の分離
亀裂の進展挙動
亀裂の進展速度

大型縦ビード溶接試験体 (180 x 45mm)
34回の荷重の半減操作」 (ステップ)
32個のビーチマークが残されていた。
疲労寿命のほとんどが亀裂進展寿命。
これは驚き。破壊力学が使える。

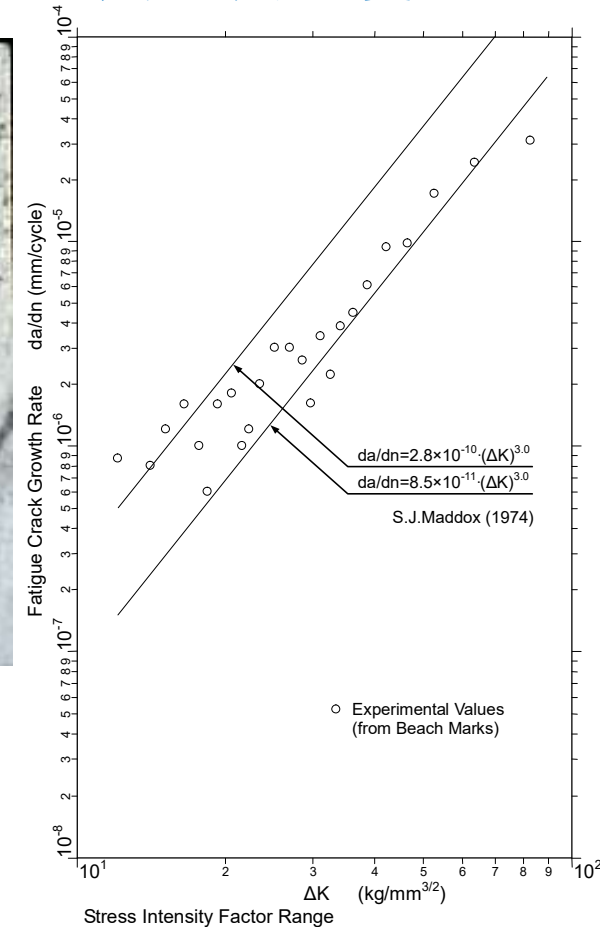


ビーチマークから求まる疲労亀裂進展速度と ΔK

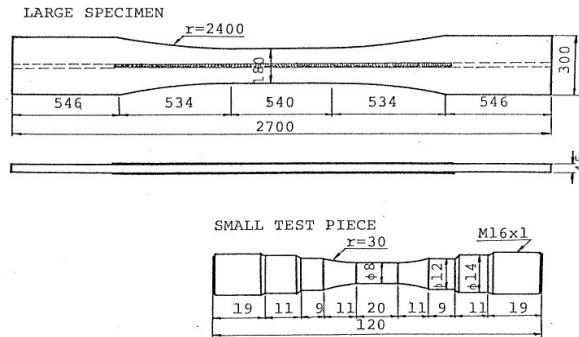


ビーチマークの間は同じ繰り返し数。
ビーチマークの間隔から進展速度がわかる。
寿命100万回の縦ビード溶接継ぎ手部でも
繰り返し数10万回程度から疲労亀裂は
進展し始めている。

疲労寿命のほとんどは亀裂進展寿命



残留応力の影響

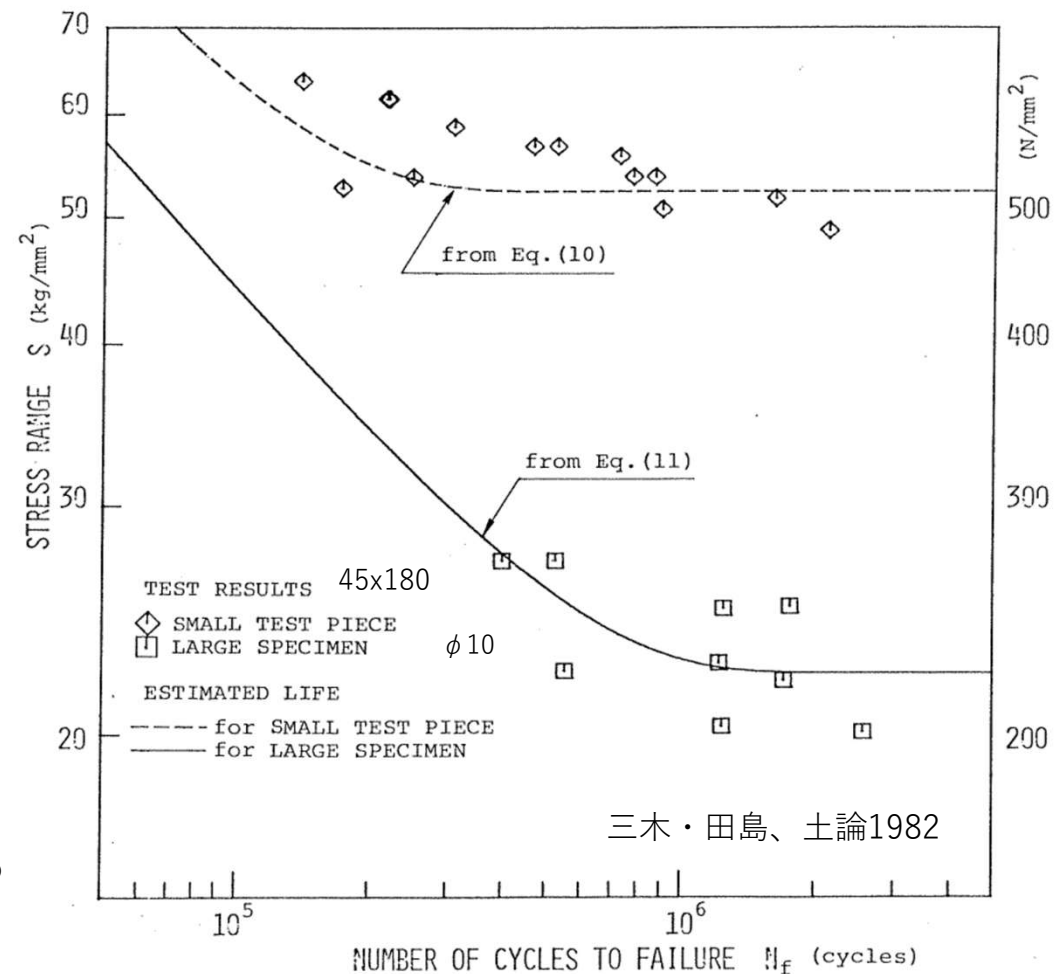


破壊刀字適用で寿命推定が可能
Paris則： $da/dN=C(\Delta K)^m$

疲労強度の差が残留応力。

大型試験体、小型試験片
(大型試験体の溶接部から切り出し)
とも縦ビード溶接ルートの
微小なブローホール(1mm程度)から
疲労亀裂が発生。

寿命のほとんどが亀裂進展
に使われる。
S-N線の勾配 $m=3$



Paris則から推定した寿命線
残留応力とブローホールサイズを考慮

da/dNに対する残留応力
ブローホール寸法 a_r
を取り入れた推定寿命は
トラスモデルの疲労試験結果
を良く説明する。

ブローホールと残留応力の影響
を取り込んだ破壊力学を応用した
疲労寿命予測が可能となった。

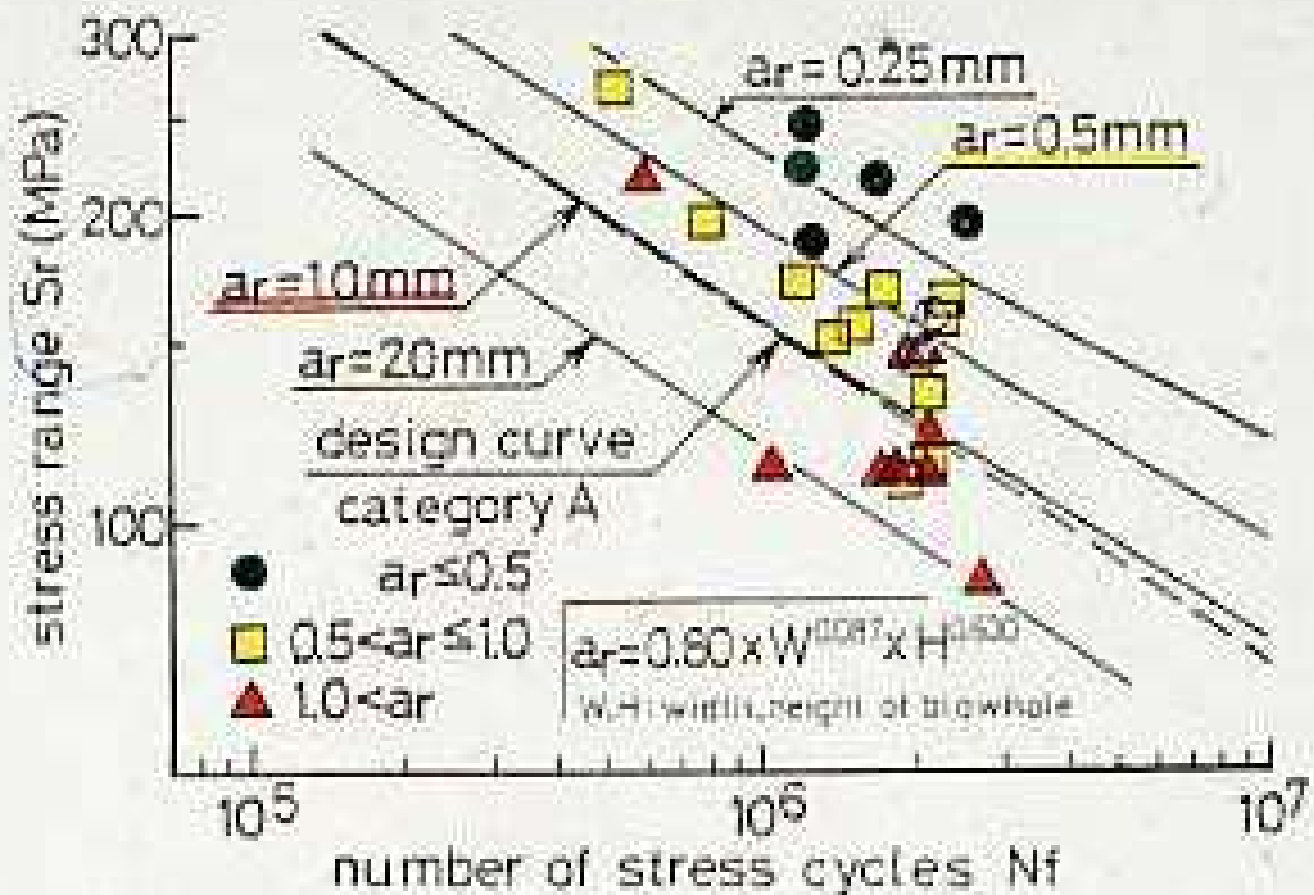
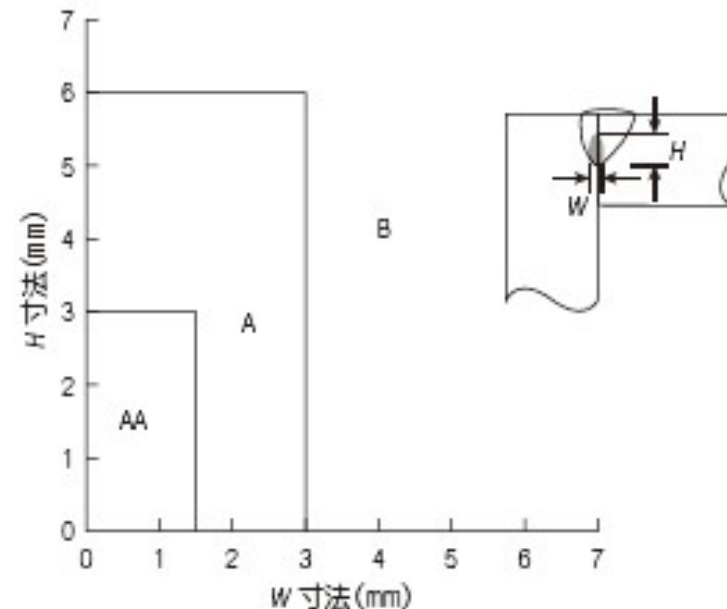


Fig. The effect of blowhole size on the fatigue strength of corner joint

部材の疲労に対する厳しさ (活荷重応力/死荷重応力) と溶接要求品質とのリンク

角継ぎ手部のルート部に発生する
ブローホールを対象として
疲労許容応力度と受け入れ限界欠陥の規定
世界初のFitness for Purpose design と評価



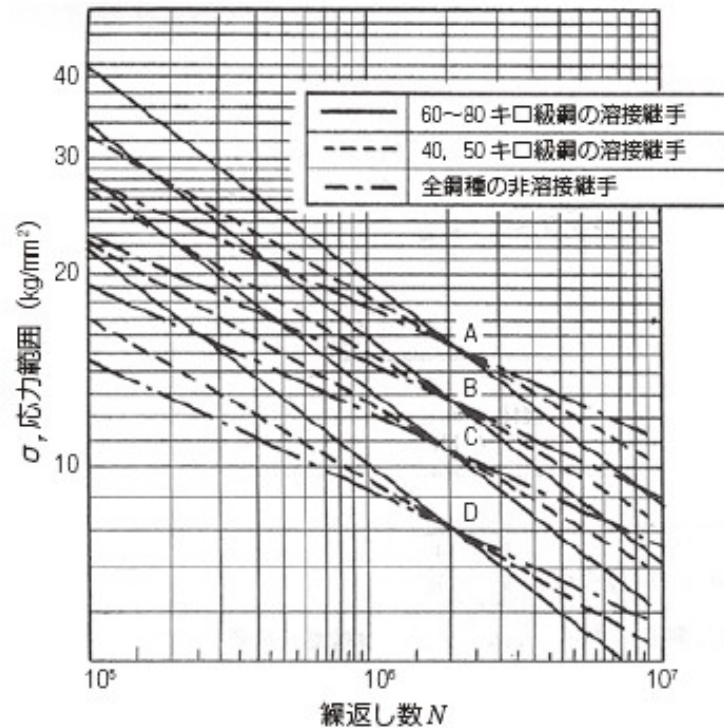
	S_r/S_a	受入れ限界欠陥の寸法	UTの検査率
最も厳しい：AA	$0.7 < S_r/S_a$	$W \leq 1.5, H \leq 3.0$	全体
厳しい：A	$0.5 \leq S_r/S_a \leq 0.7$	$W \leq 3.0, H \leq 6.0$	全体
普通：B	$S_r/S_a < 0.5$	//	20%

角溶接部に対する疲労の厳しさとそれに対応した受入れ限界欠陥

S_r ：活荷重に対する応力
 S_a ：死荷重と活荷重に対する応力
 S_r/S_a が 0.7 より大きい（全応力のうち活荷重応力の割合が 70% と高い）
 場合は AA 部材と分類され、その梁の受入れ限界欠陥は $W \leq 1.5\text{mm}$, $H \leq 3.0\text{mm}$ となる

図-8.9 トラス試験体に発生した疲労亀裂の分布

本四連絡橋 新しい疲労設計方法



	鋼種	等級分類	m	Constant
溶接継手	40・50キロ級	A	4	1.10×10^{11}
		B		5.20×10^{10}
		C		2.43×10^{10}
		D		8.19×10^9
	60・80キロ級	A	3	7.16×10^9
		B		4.10×10^9
		C		2.31×10^9
		D		1.02×10^9
非溶接継手	全鋼種	A	5	1.68×10^{12}
		B		6.61×10^{11}
		C		2.55×10^{11}
		D		6.55×10^{10}

$$(\sigma_r)^m \cdot N = \text{Constant} \quad \sigma_r : \text{kg/mm}^2$$

疲労許容応力度をS-N表示

鋼材の静的強度に逆依存

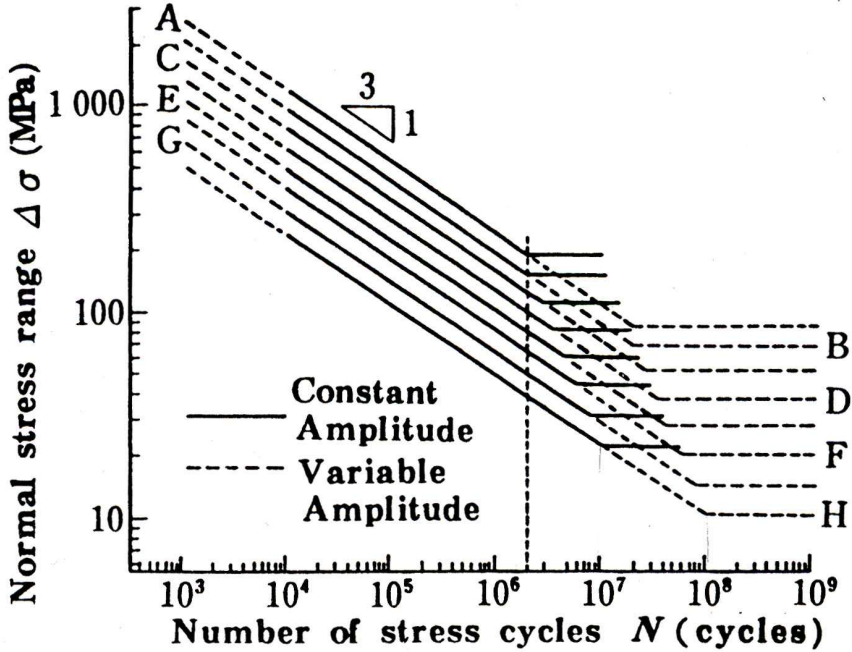
Nは1000万回：100年間での新幹線列車と総貨物列車通過トン数から決定

その後の鉄道橋設計標準、JSSC疲労設計指針、道路橋示方書疲労設計などのベース。

IIW Fatigue design recommendation、AASHTO codeなどにも影響

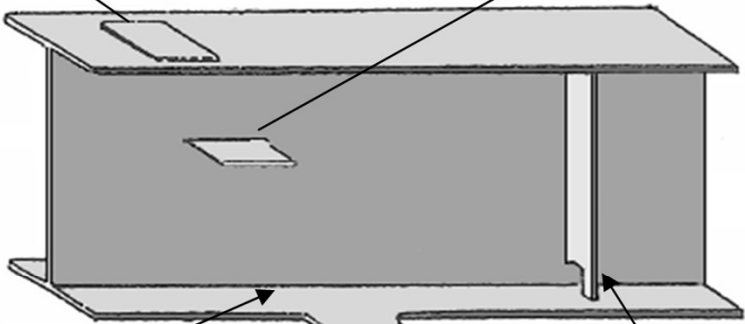
鉄道橋設計標準での疲労許容応力度の改訂 既存橋梁での対応、鉄道橋における既存不適格問題の出現

'60標準では疲労限界＝200万回強度を
 許容応力度としていた。
 新標準ではS-N based fatigue design



Sleeper pad		
Joint Type		
Code	Class	Fatigue strength at 2 million cycles (MPa)
Old code '60	D	120
Current code '92	F	65

Out-plane gusset (t=20mm)		
Joint Type		
Code	Class	Fatigue strength at 2 million cycles (MPa)
Old code '60	D	100
Current code '92	F	65

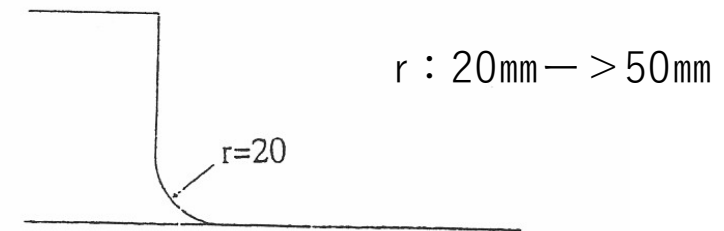
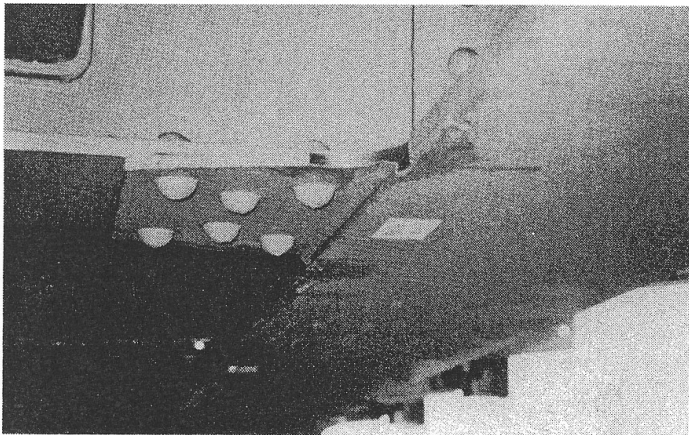
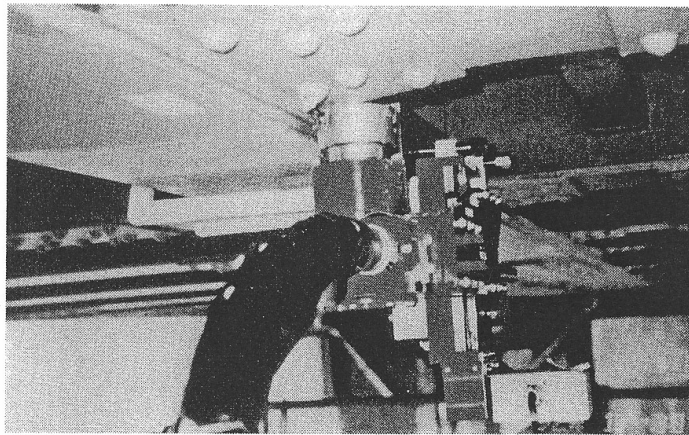


Longitudinal welding		
Joint Type		
Code	Class	Fatigue strength at 2 million cycles (MPa)
Old code '60	B	150
Current code '92	C	125

Cruciform weld		
Joint Type		
Code	Class	Fatigue strength at 2 million cycles (MPa)
Old code '60	D	100
Current code '92	E	80

In-plane gusset (t=20mm)		
Joint Type		
Code	Class	Fatigue strength at 2 million cycles (MPa)
Old code '60	C	126
Current code '92	F	65

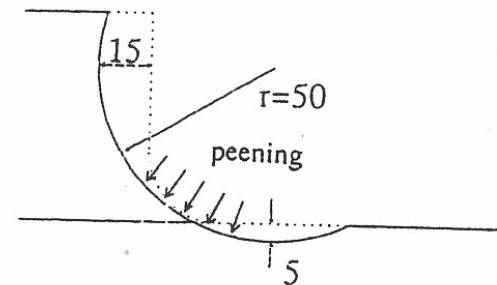
鉄道橋で既存不適格問題の発生ー＞予防保全対策 疲労改善：フランジガセット取り付け部



$r : 20\text{mm} \rightarrow 50\text{mm}$



Improve the figure
(gas-cut
machine-cut)



Unit [mm]



道路部材
併用部材
鉄道部材

品質基準に差がある

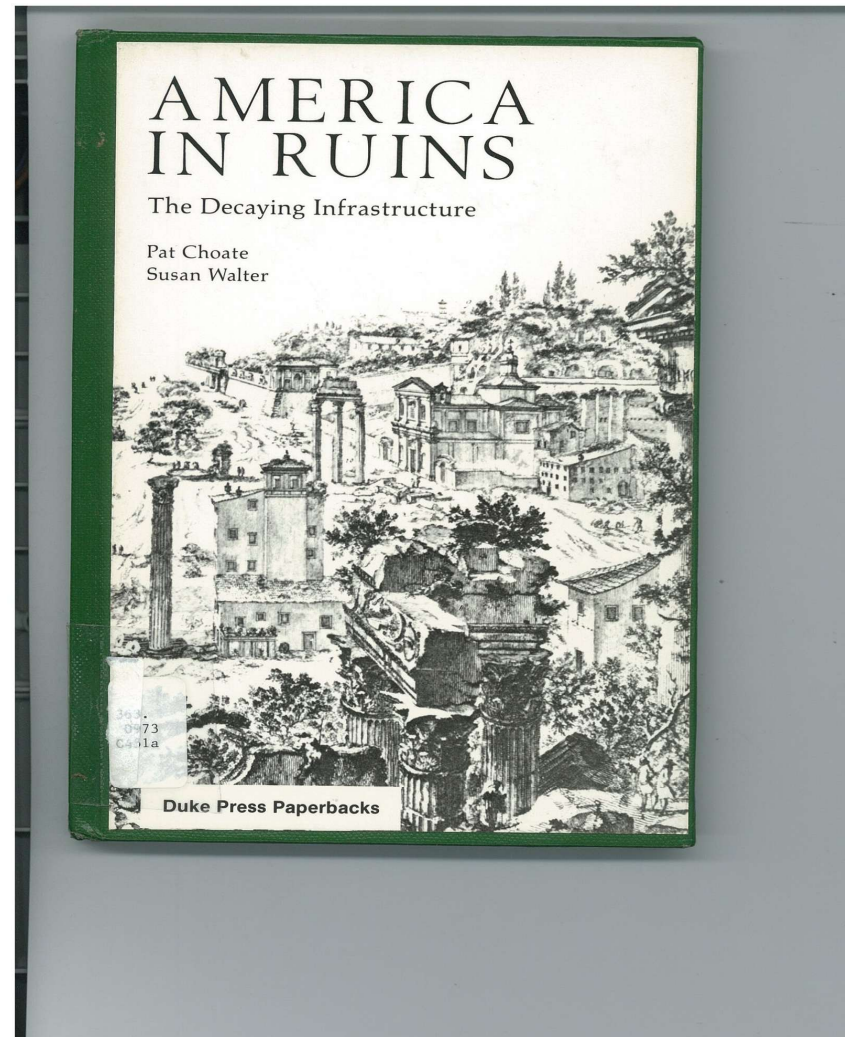
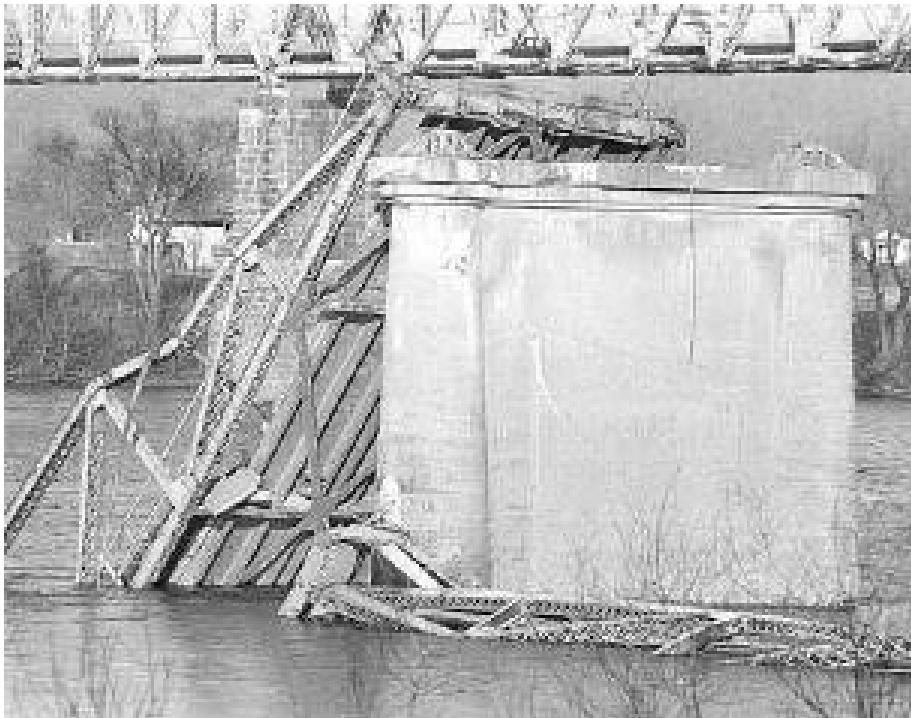
見るとすぐにわかる。

Retrofitting Engineeringの世界

Prof. J.W. Fisher との出会い 1981 -

Point-Pleasant Bridge Dec.1967

米国では、この事故をきっかけとして疲労への関心が高まり、疲労設計基準、点検制度、点検員の資格制度など



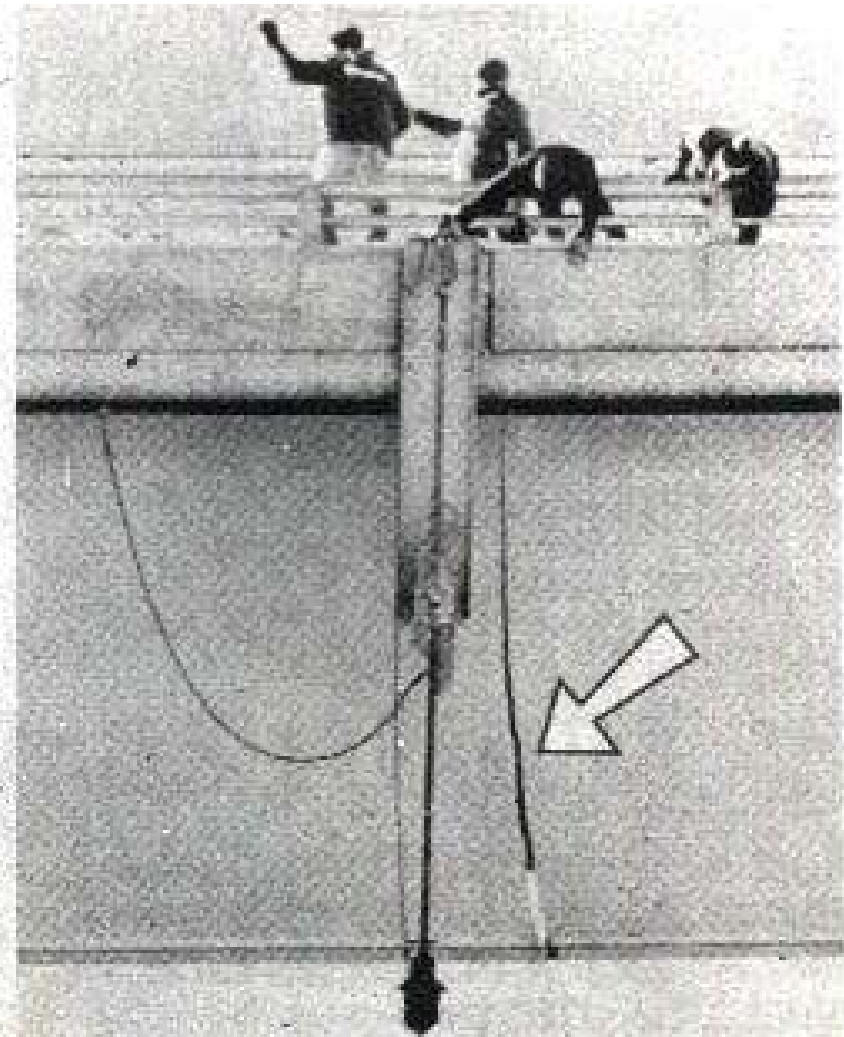
America in Ruins, by Pat Choate & Susan Walter,
1981

Chicago Dan Ryan 高架

ここでの経験が鋼製橋脚の疲労問題で活かされた。

原因は桁フランジが箱断面の橋脚横梁を貫通する継ぎ手での融合不良





Cracked girder on I-79 apparently began in electrosag flange weld.

切り出された亀裂

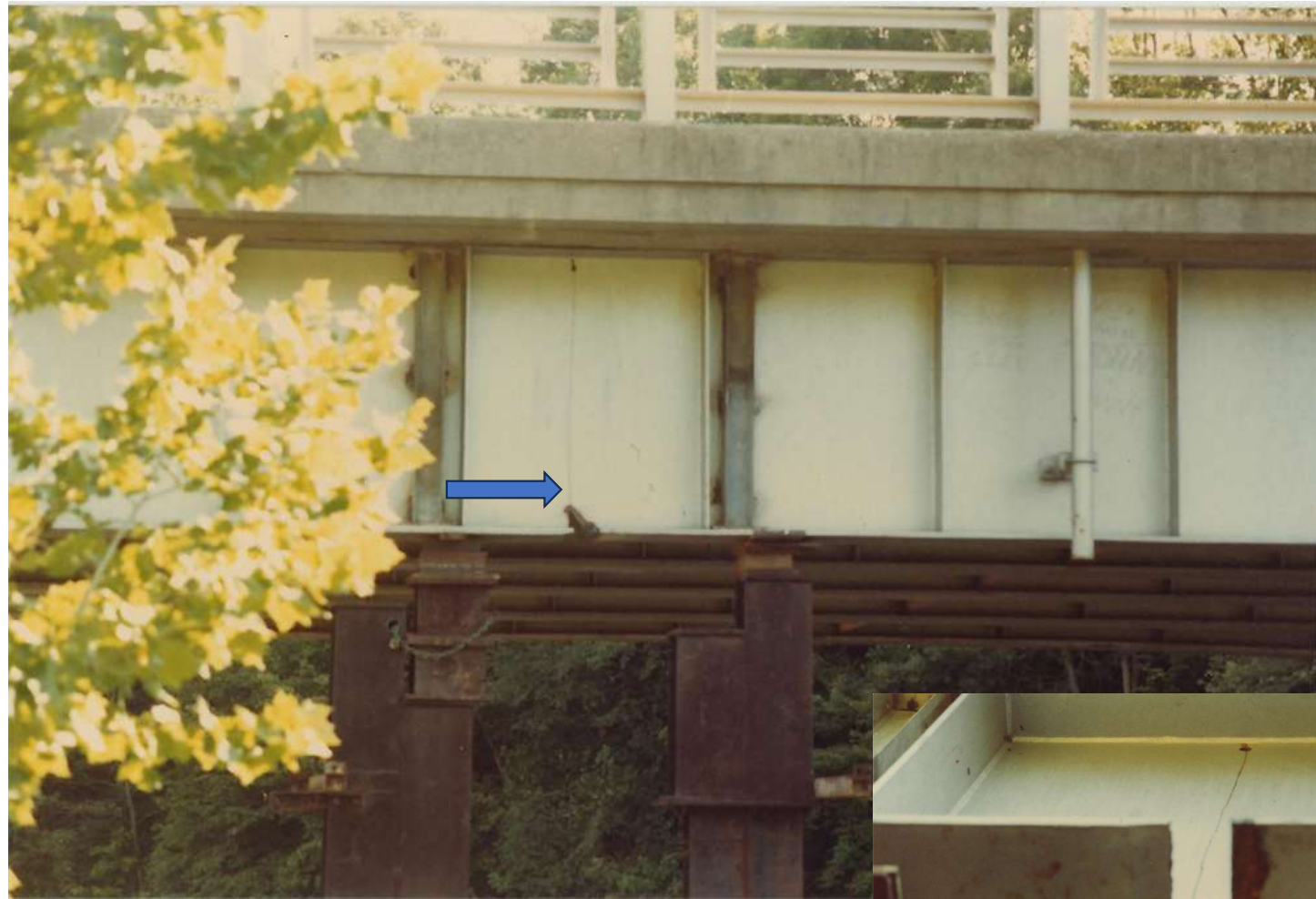
エレスラ溶接部の溶接割れ
から疲労亀裂が発生し、
脆性破壊

Lehigh University
Fritz Engineering Lab.に
切り出し部が放置されていた。
これはなに？の質問から
様々な情報が得られた。



実橋を対象と しての疲労研究 の始まり

Lehigh大学に滞在を
始めた直後に出会った
疲労損傷



疲労き裂とそれを起点とした
脆性き裂





現場での議論と調査方針の決定。指示を受ける。
Prof. Fisher, Prof. Pence. Prof. Robert
現場の大切さ

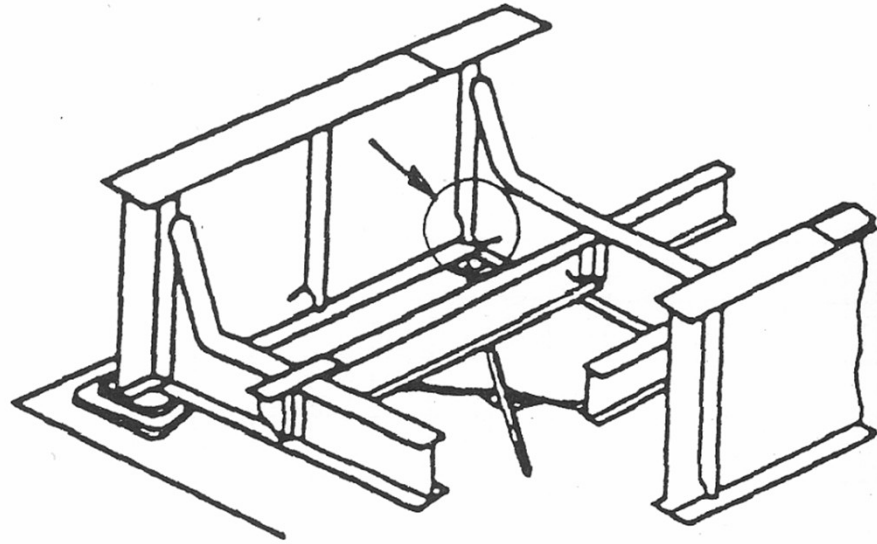
Quinnipiac River bridge

Snooper を用いての点検
写真は Prof. Ben T. Yen

橋梁の点検、亀裂の検知
など、現場で習得。



**日本の橋にも疲労損傷が見つかり始めた。
1980－**



開通後10年頃から
疲労亀裂
補修と補強を繰り返し
ながら現在まで
無事故できた

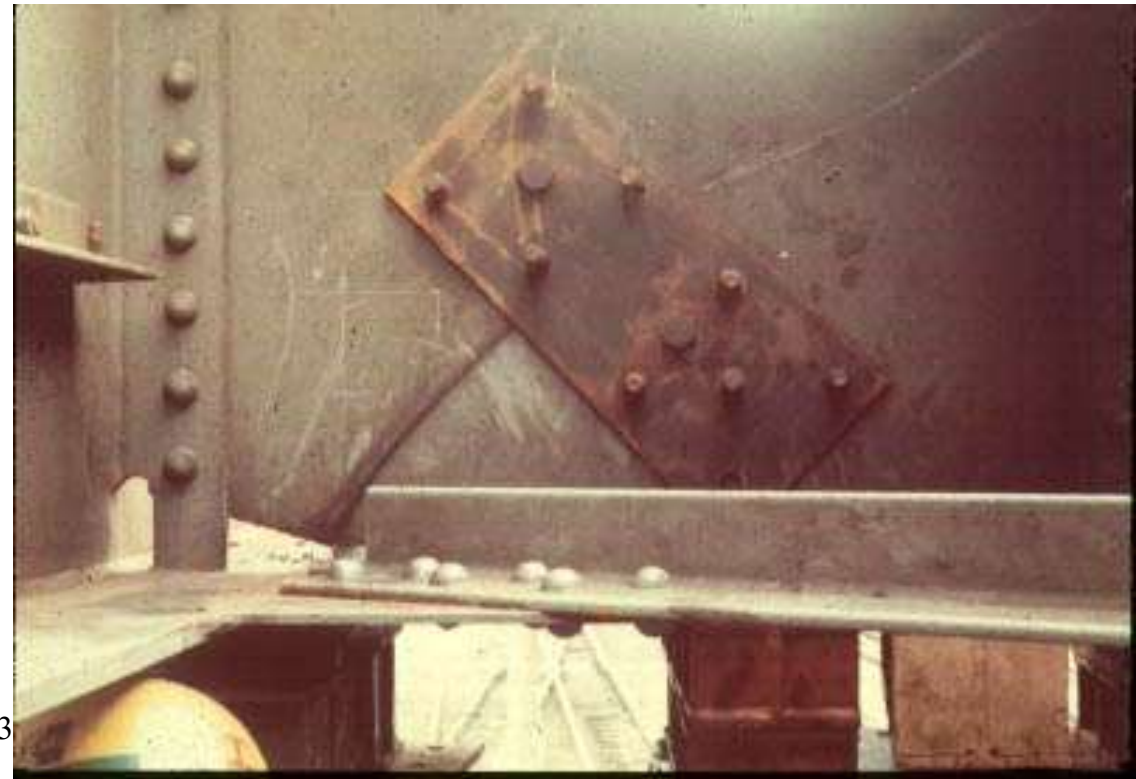
東海道新幹線

1964年開通:1960年のSpec.

供用期間70年で疲労設計

当初:定員乗車

列車本数の急激な増加



東名高速袋井管理事務所。見慣れない亀裂が見つかった、なんだろう、どうしよう。

ー>機械化研究所（三谷健所長）ー>東工大へー>現場

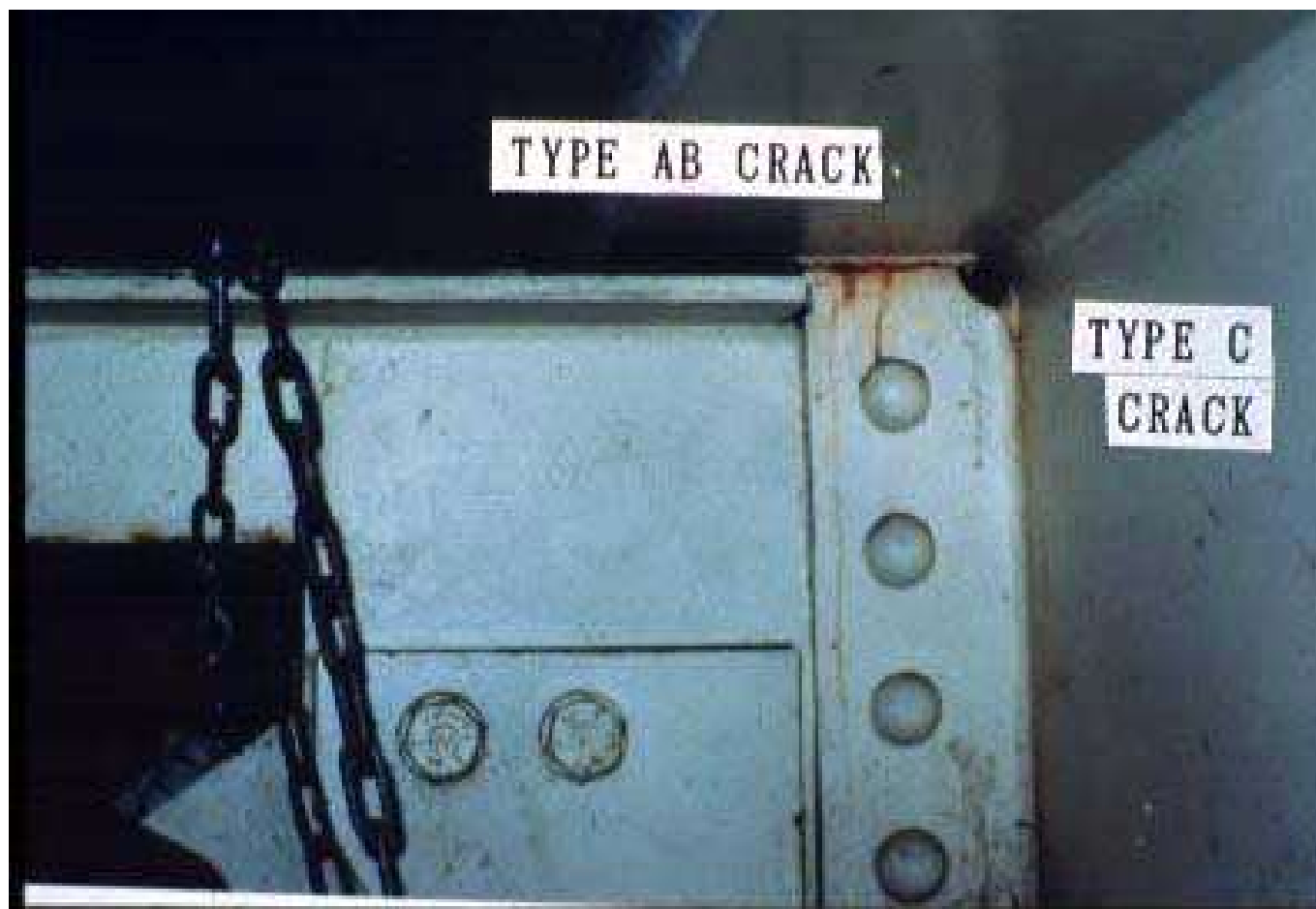
本社技術部長：わが社の道路橋に疲労など発生するはずはない。

道路橋に疲労など発生しない。2002年の道路橋示方書で疲労設計の導入を計画し準備。

しかし上部の委員会では「時期尚早との判断」。準備した「疲労設計案」は指針として発行された。

疲労設計の正式導入は

2012年の改定。



道路橋での疲労損傷は増加の一途。 トラス、主構上弦材と横トラスとの接合部（東名高速）

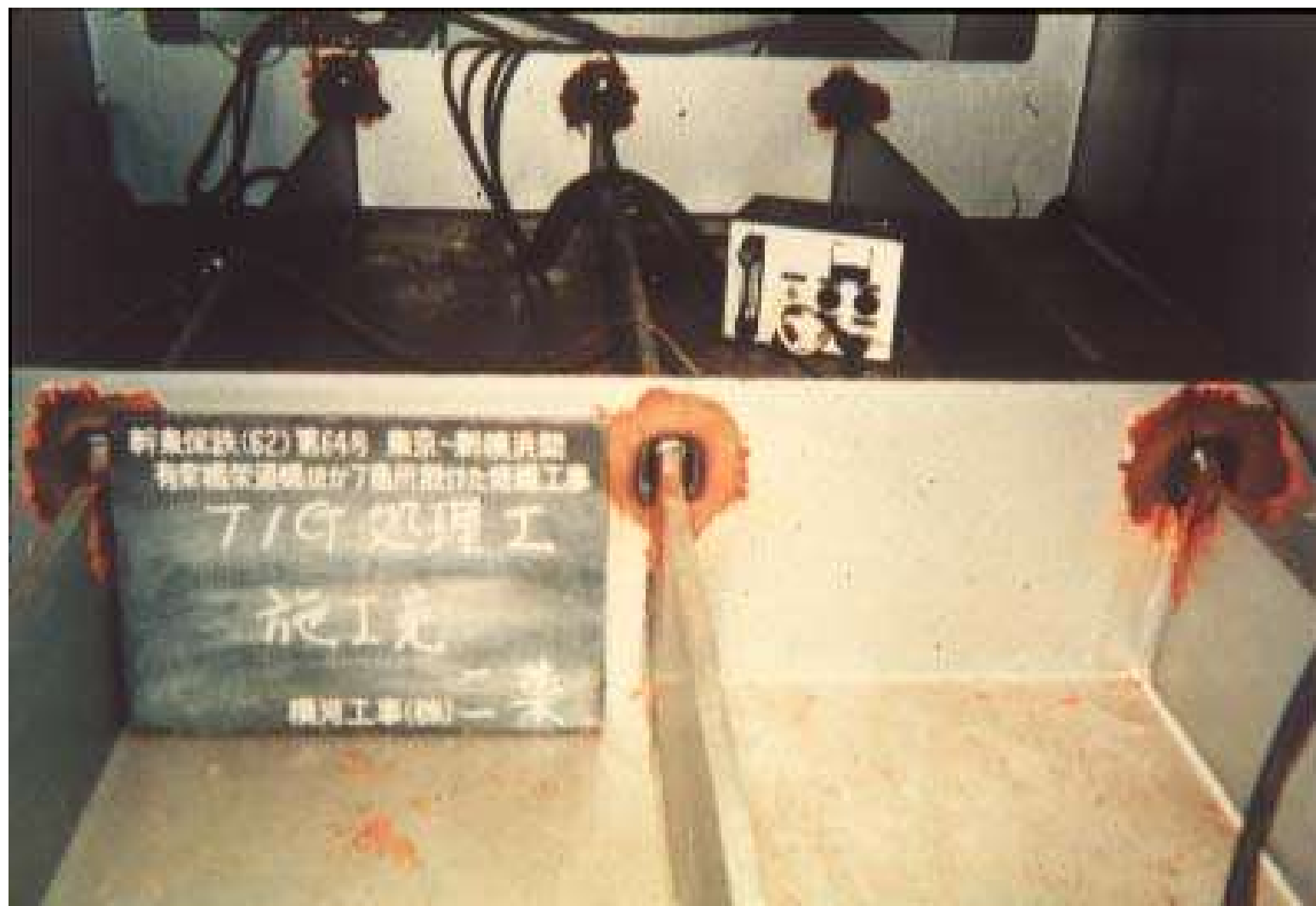


設計では横トラスは主構トラスに単純支持。
実際は溶接された接続板を介して
高力ボルトで固定。——固定端モーメント
フランジ間をつなげたディテールの橋もあり。
そのディテールでは亀裂の発生はなし。





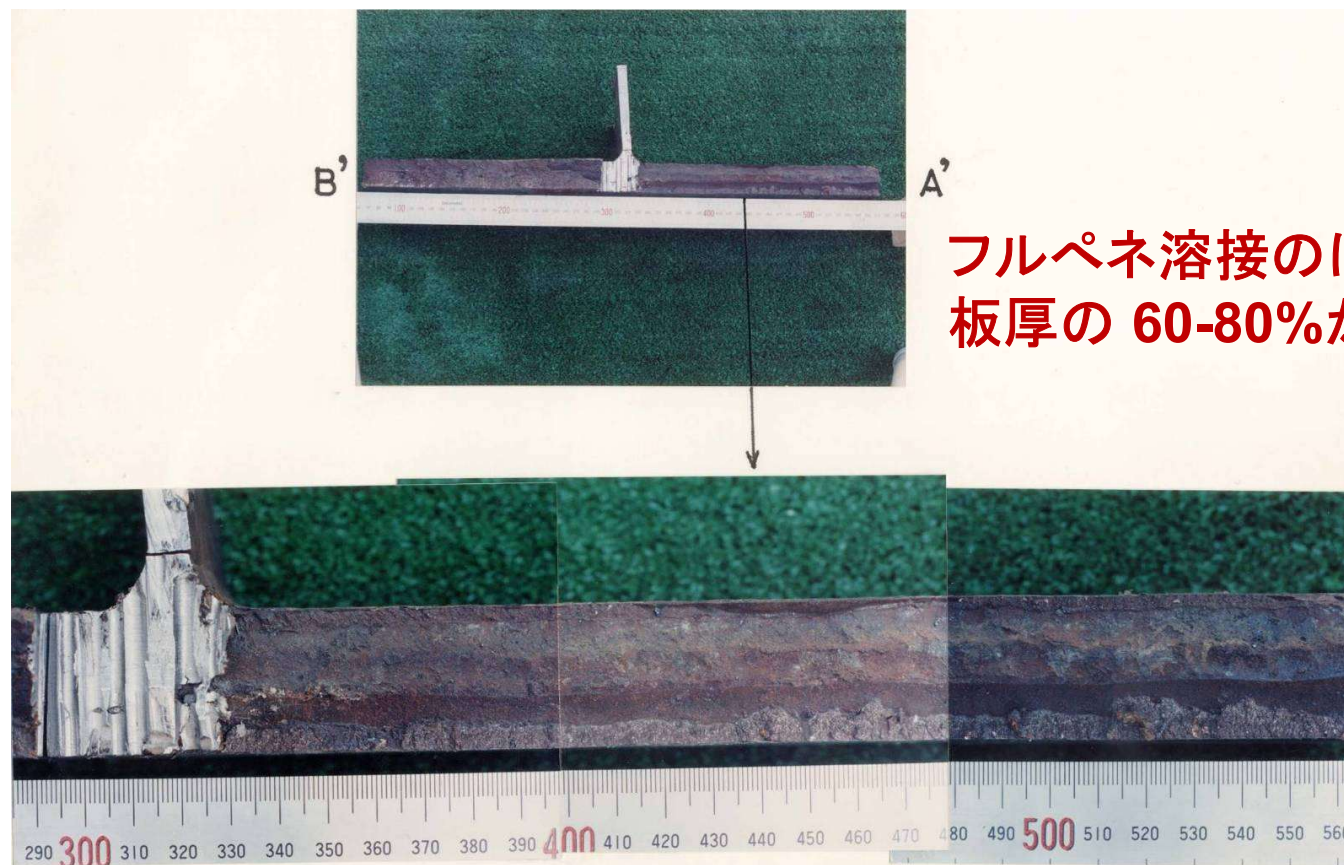
列車の高速走行による共振現象 一一補強対策 TIG dressing 30000か所





下フランジ板継ぎ溶接に残された
未溶接部からの疲労亀裂

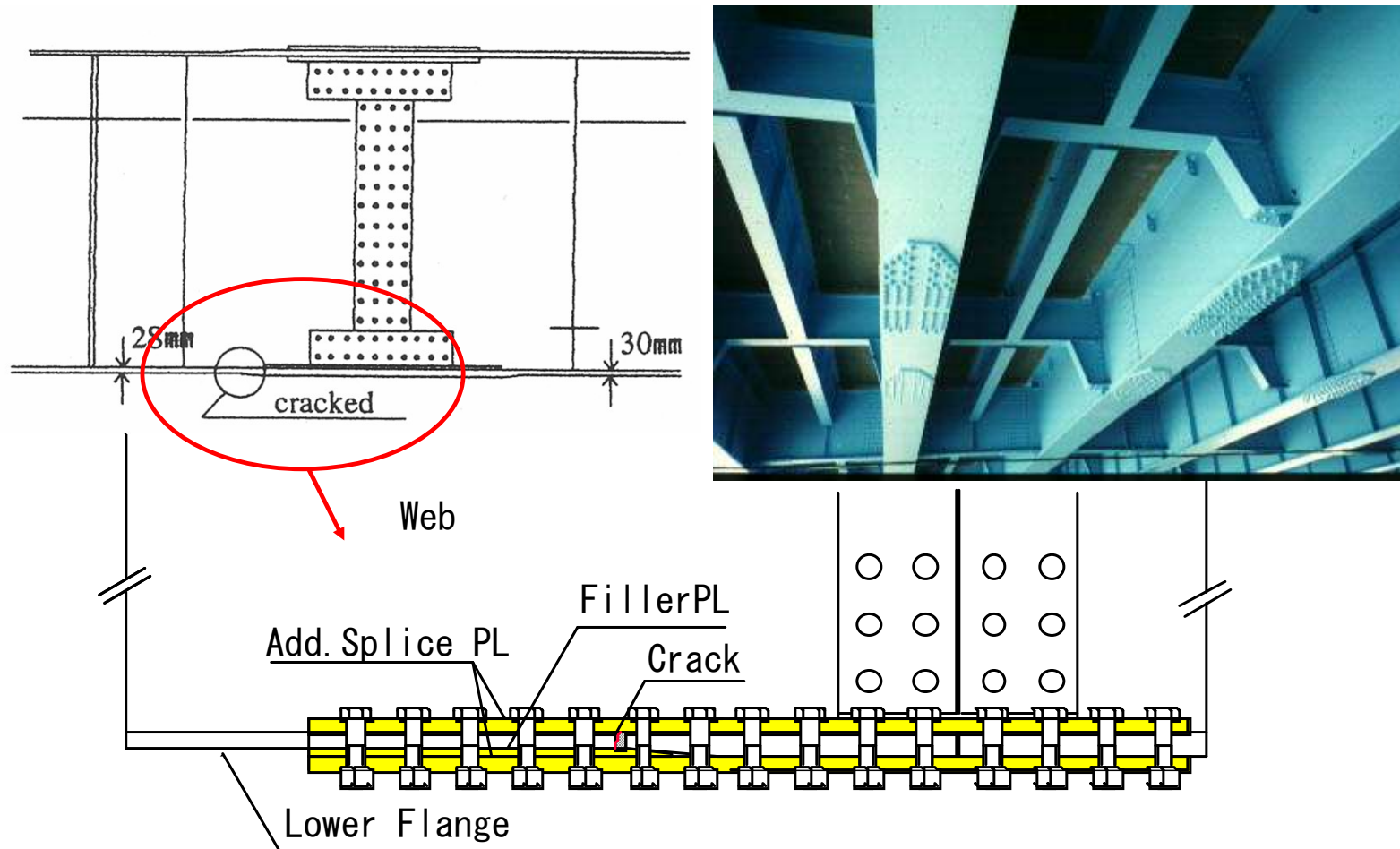
切り出し破面の観察



フルペネ溶接のはずが
板厚の 60-80%が未溶融！！

同一工場で同時期に溶接された継ぎ手の検査により多くの欠陥と
それから発生した疲労亀裂が発見された

Repairing by bolted splice



鋼桁橋、ソールプレート前縁の亀裂、
亀裂は下フランジを切断し、ウェブまで侵入



疲労改善：ソールプレート取り付け部の構造改善

- ・ ソールプレートのサイズアップ、
- ・ 溶接→高力ボルトによる取り付け、
- ・ 端補剛材の数と板厚のアップ

鉄道橋、道路橋で共通



鋼製橋脚隅角部の疲労対策（首都高速）

きっかけは神戸地震、
阪神高速の1技術者より、

「橋脚隅角部コーナーによくわからない亀裂状のものが見つかった。見てほしい」
疲労亀裂を起点として、地震時に脆性破壊した橋脚もあった。
首都高速にも同種の亀裂がある可能性——首都高速と対応について相談。

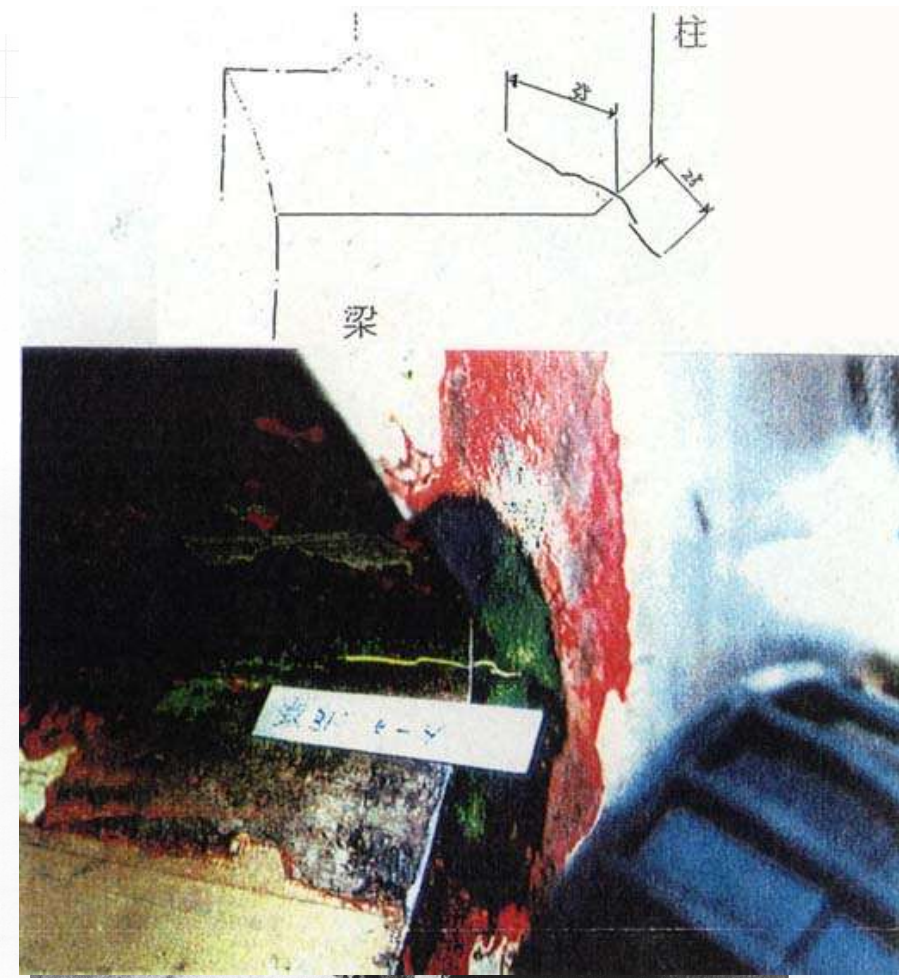
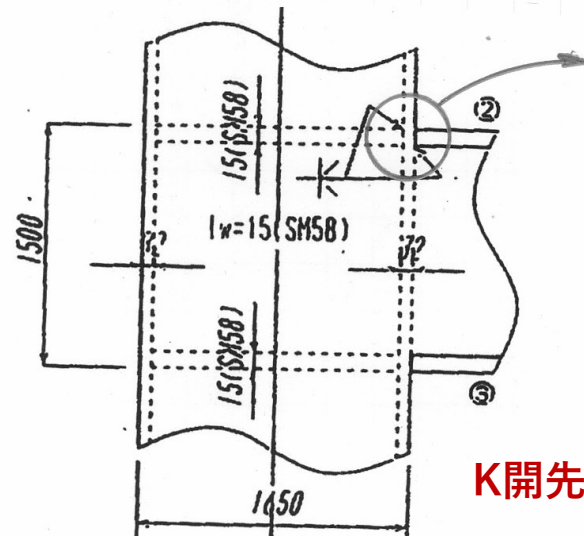
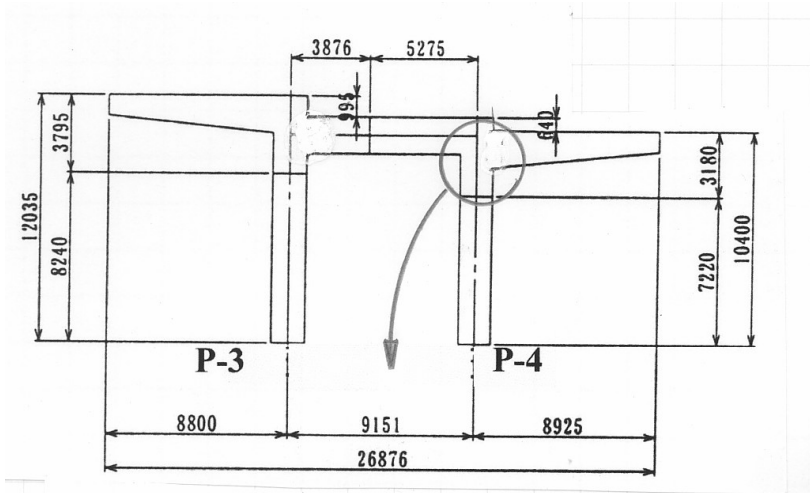
2001－2005年、
組織（疲労対策室）を作り対応
2000基の橋脚のうちの
700基に何らかの異常
300基については補強対策。

➡ 他機関の橋脚も同様
設計と製作の問題

首都高速3号池尻

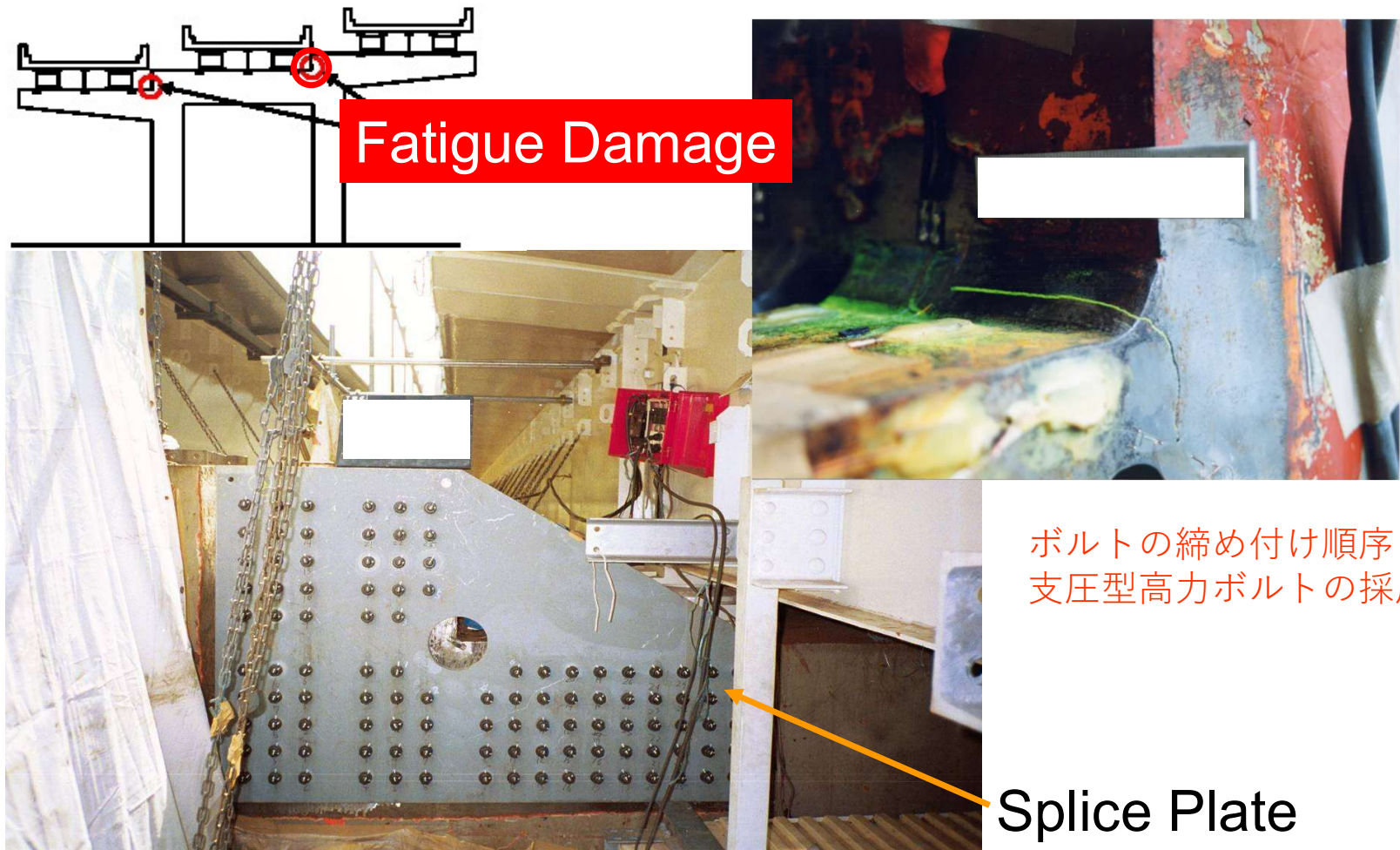


設計では完全溶け込み溶接、表面は仕上げられている。
なぜ表面にこのような亀裂？



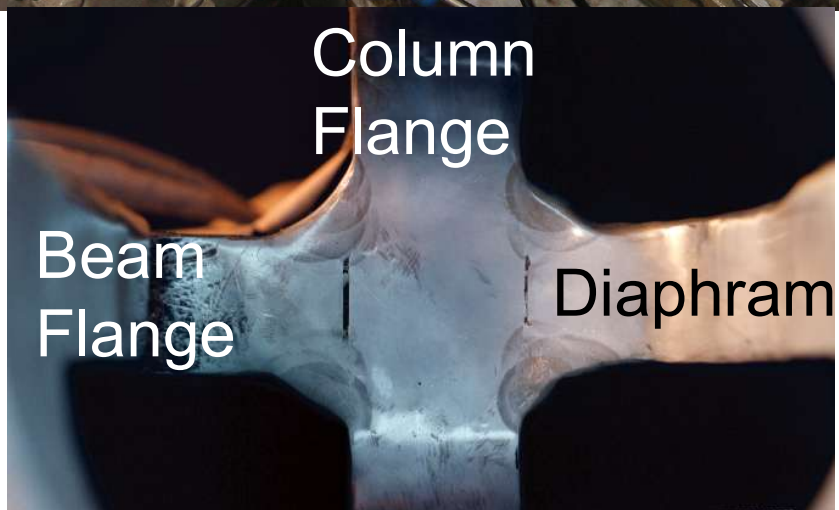
K開先、ただし寸法（フェースなど）が入っていない

補修・補強：高力ボルト添接、コア抜きによる亀裂の除去

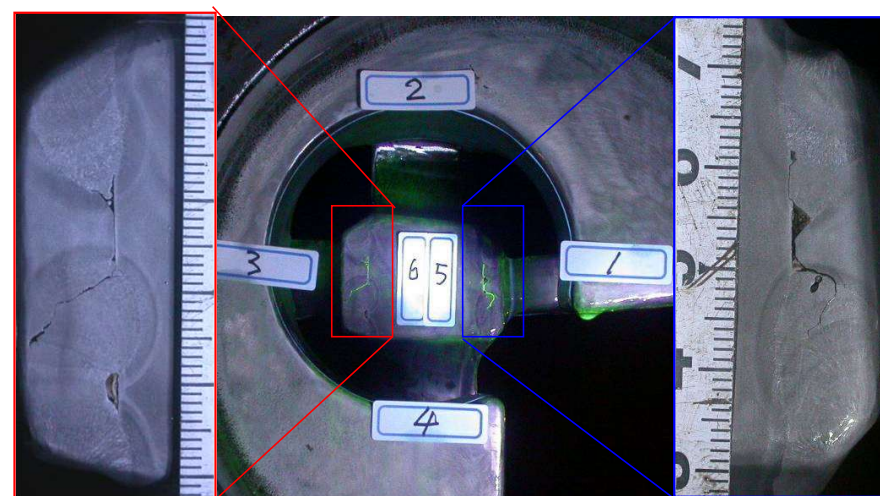
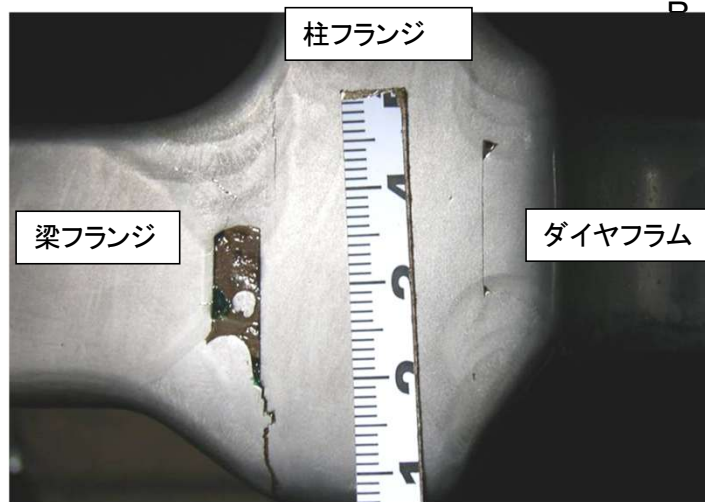
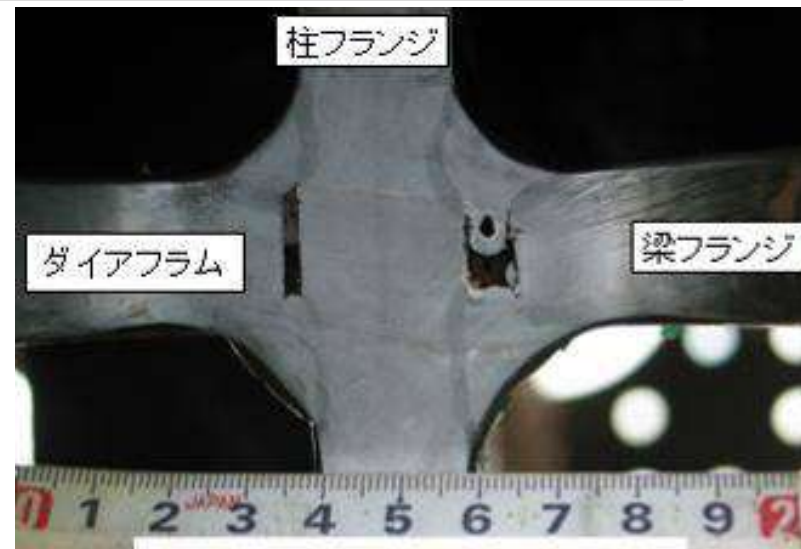
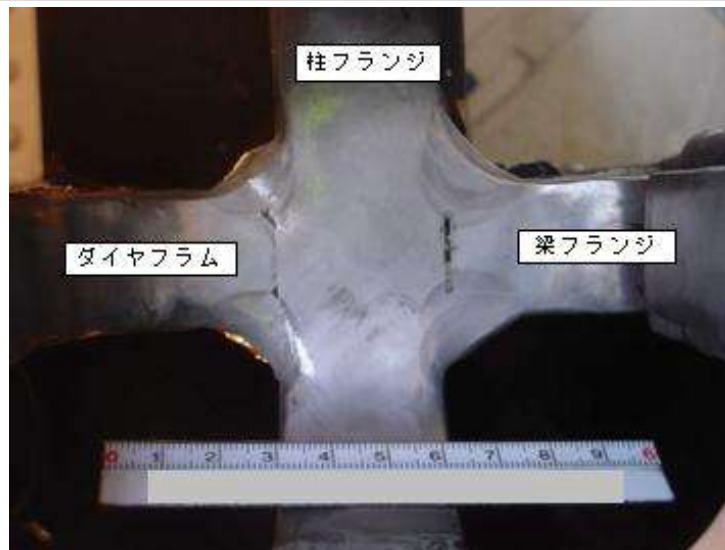




疑わしい箇所はコアをとり検査



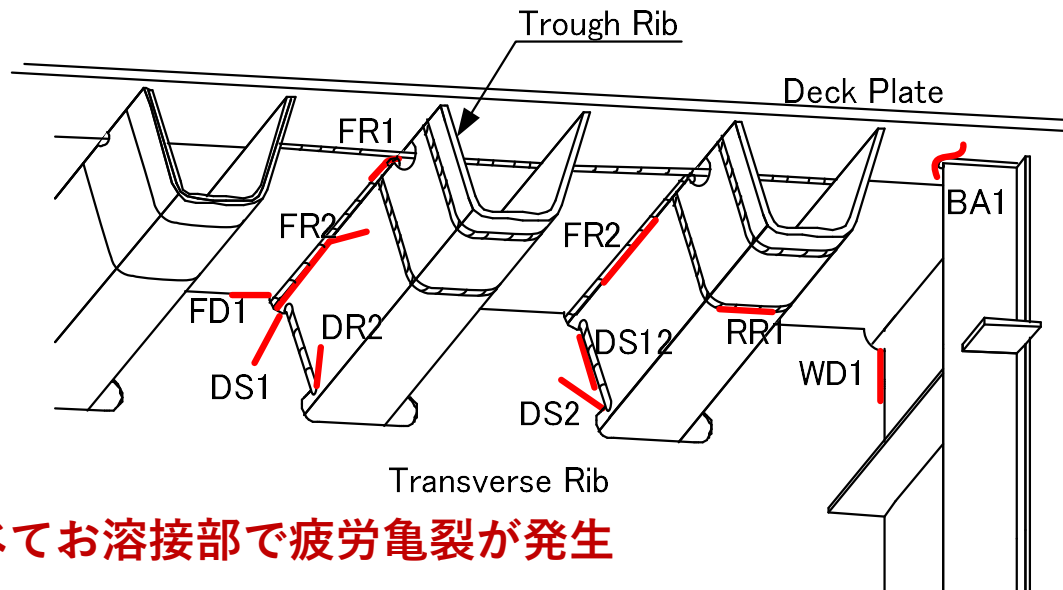
コア抜きで見た溶接ルートト部の状態



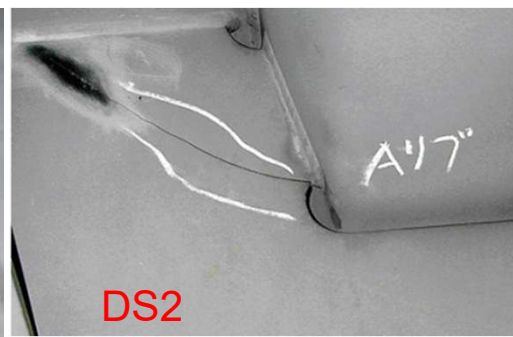
鋼床版の疲労

1990年頃から多発

世界で最も多く鋼床版を採用しているのでは



ほぼすべてお溶接部で疲労亀裂が発生

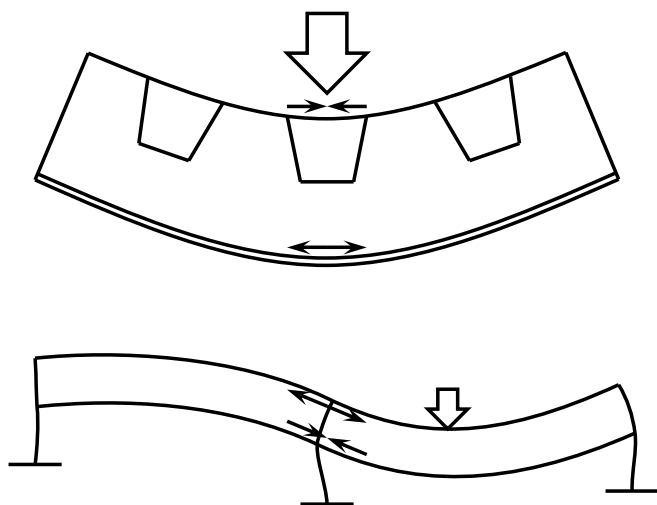


縦リブ横リブ継ぎ手部の変位と変形

- 縦リブ、横リブとも面内、面外方向に変位する→複雑な変形

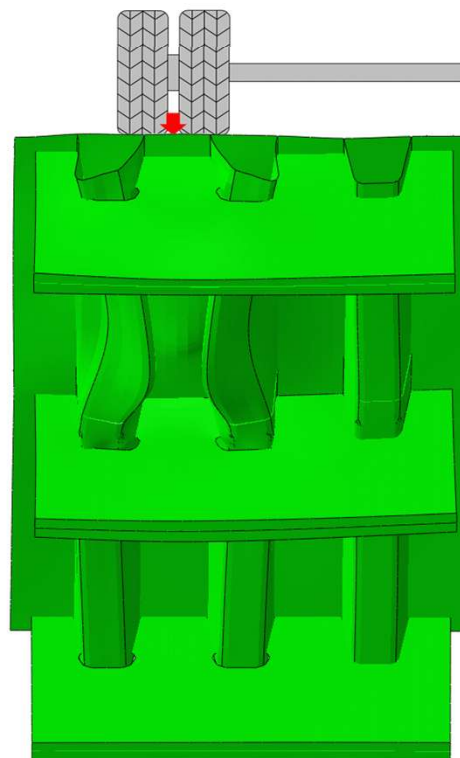
設計での照査

横リブ面内の曲げに対するリブ
十字継ぎ手として設計 (2002)
標準ディテールで設計 (2002~)

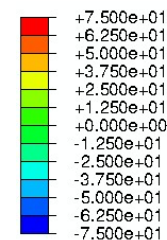
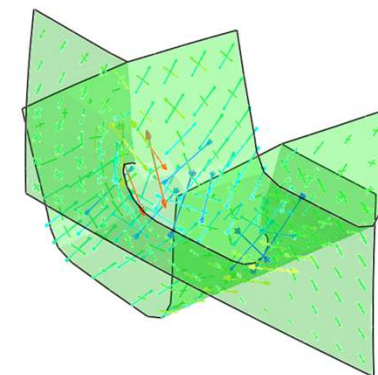


FEA result

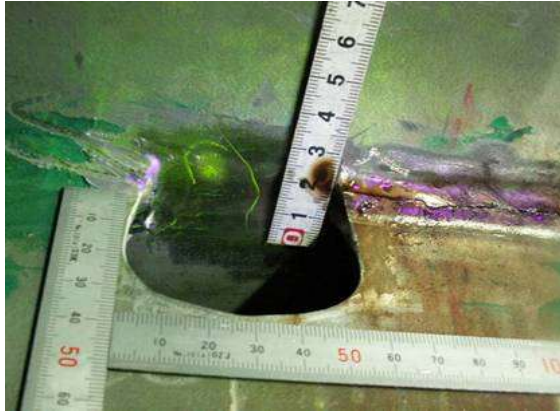
Three dimensional deformation



Connection, principal stress



Temporary repairing works



Stop-holes for FR



Patching steel plate



Partial replacement of trough rib
For DS, FR cracks



Bolt splicing for FR

載荷台での実験：

ディテールを変えた試験パネルを取り付け、トラックを用いて載荷



Retrofit Works の候補

Original detail

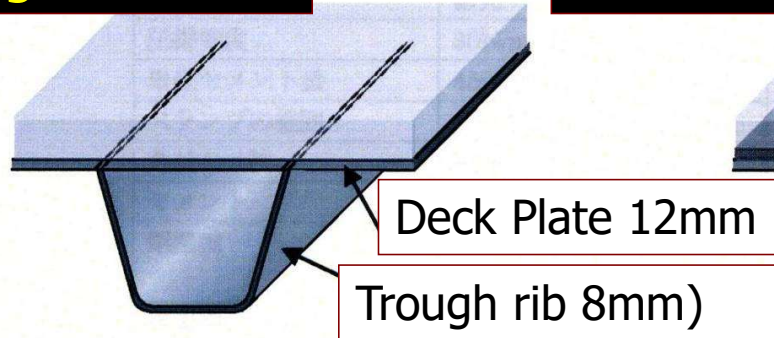
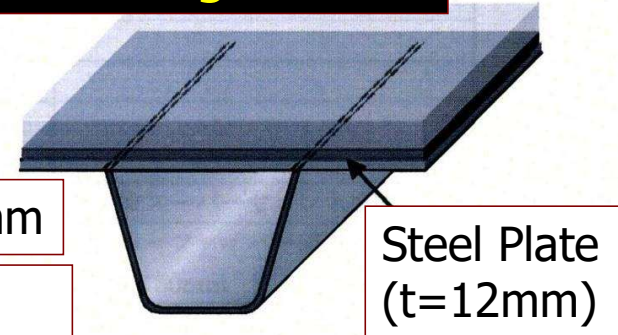
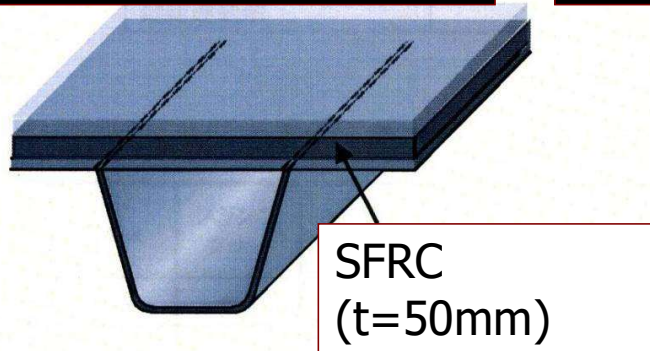


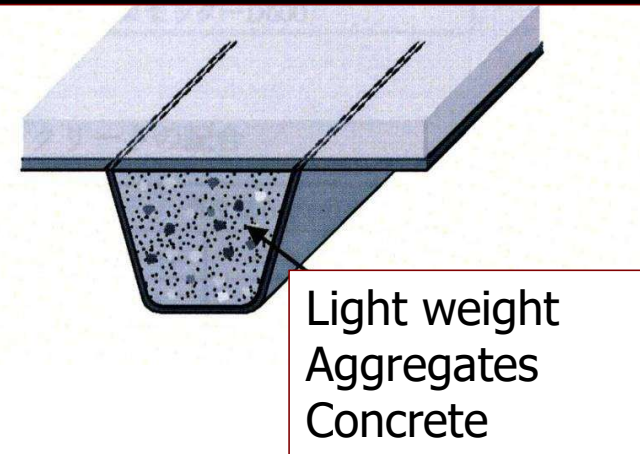
Plate Attaching Method



SFRC Covering Method

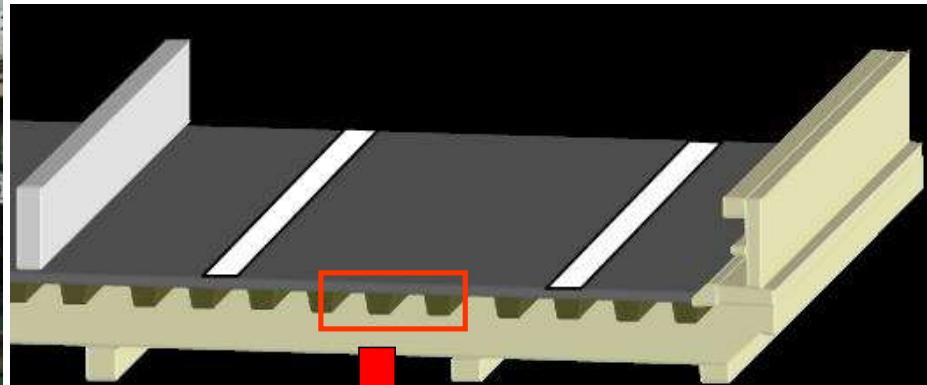


Concrete Filling in Trough Ribs



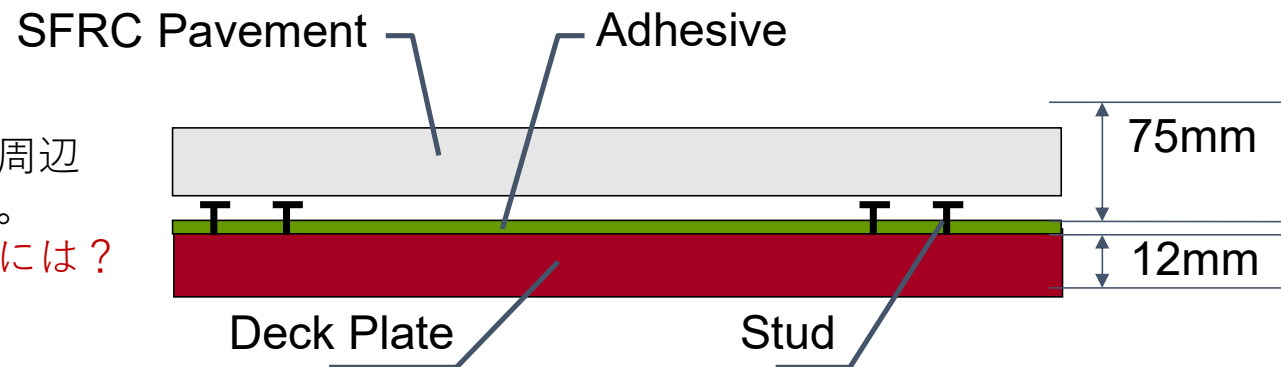
疲労対策 合成鋼床版化 SFRCの適用

横浜ベイブリッジ下層部（国道357号）、予防保全としての措置
合成鋼床版：名古屋高速の実績、SFRC：湘南大橋でTry

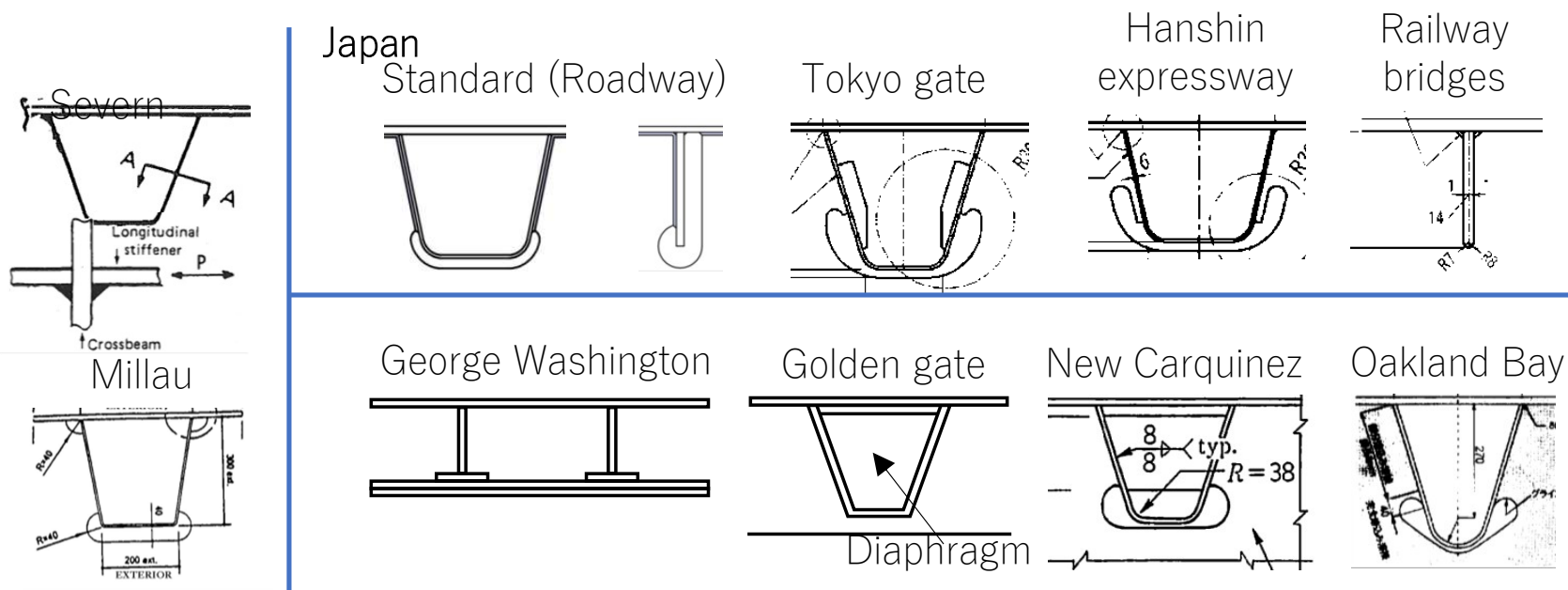


三木、鈴木ほか、土論2006
小野、三木ほか、土論2009

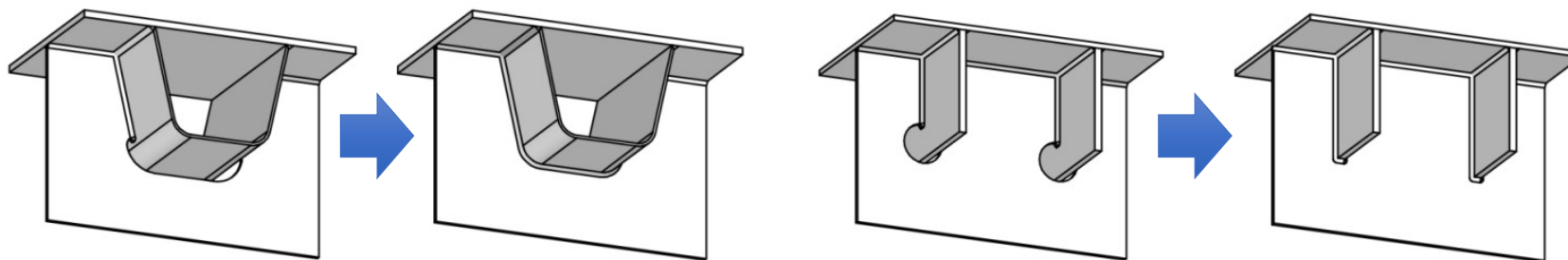
デッキプレート周辺
の疲労には有効。
下スリット近傍には？



疲労のポイント：縦リブ、横リブの交差構造

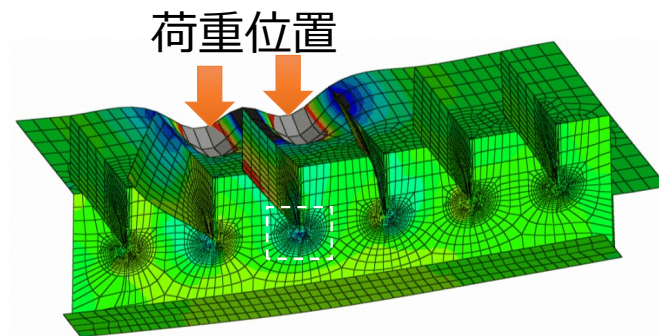


■ Non-slit connection is possible by devising fabrication

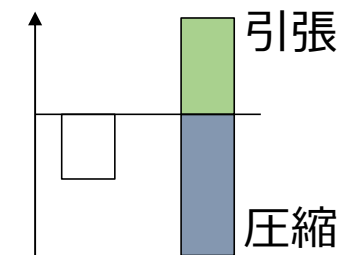
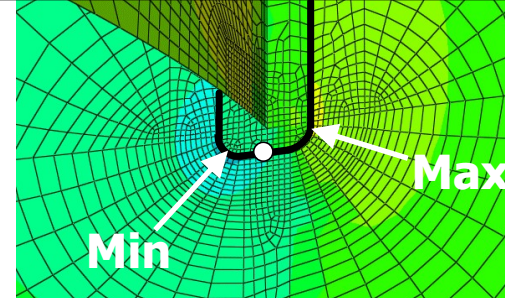
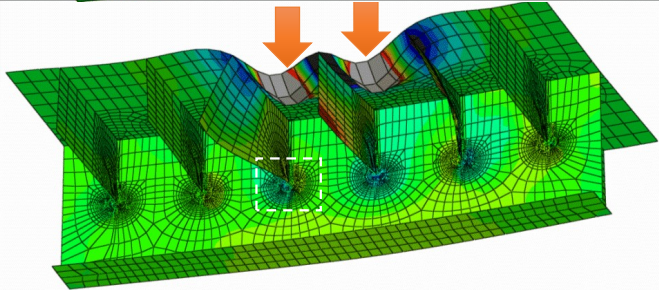
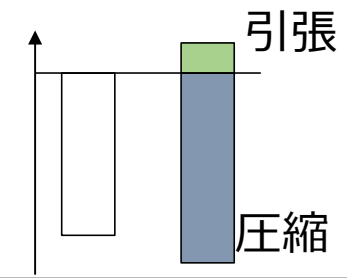
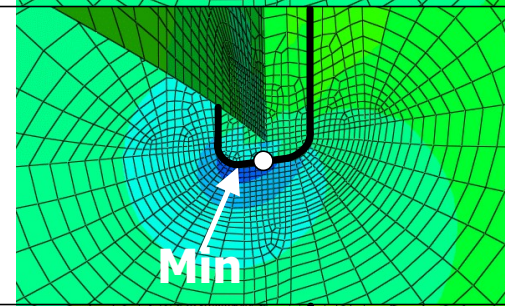
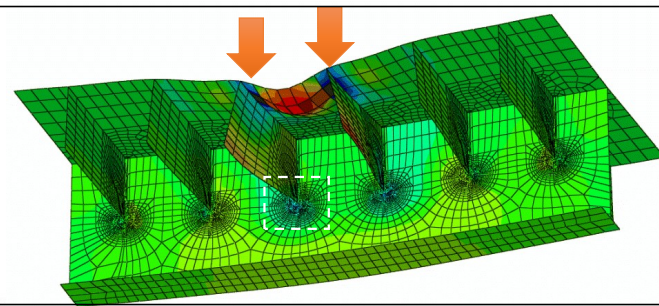
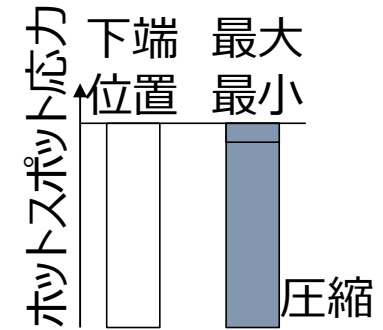
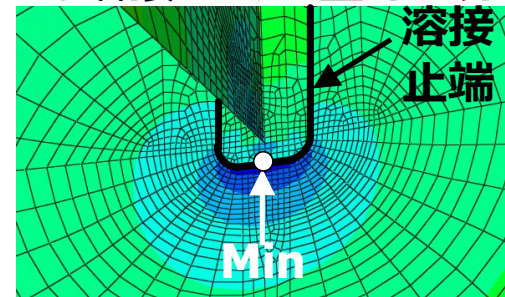


ホットスポット位置移動の考慮

- 溶接止端沿いに全点でHSS算出, 最大・最小値を代表値とする
平リブ・スリット無交差部でのホットスポットの移動

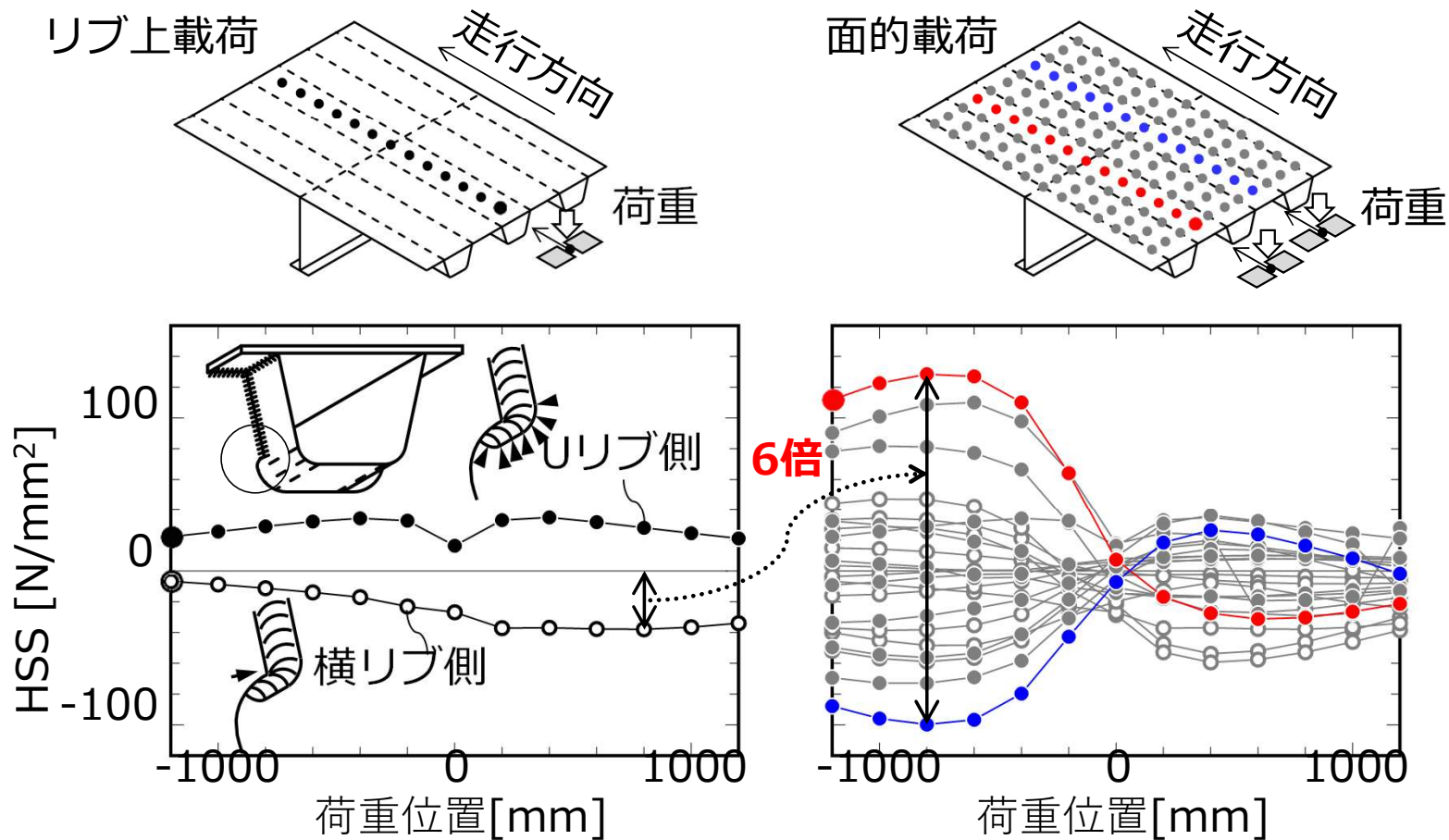


まわし溶接まわりの主応力分布



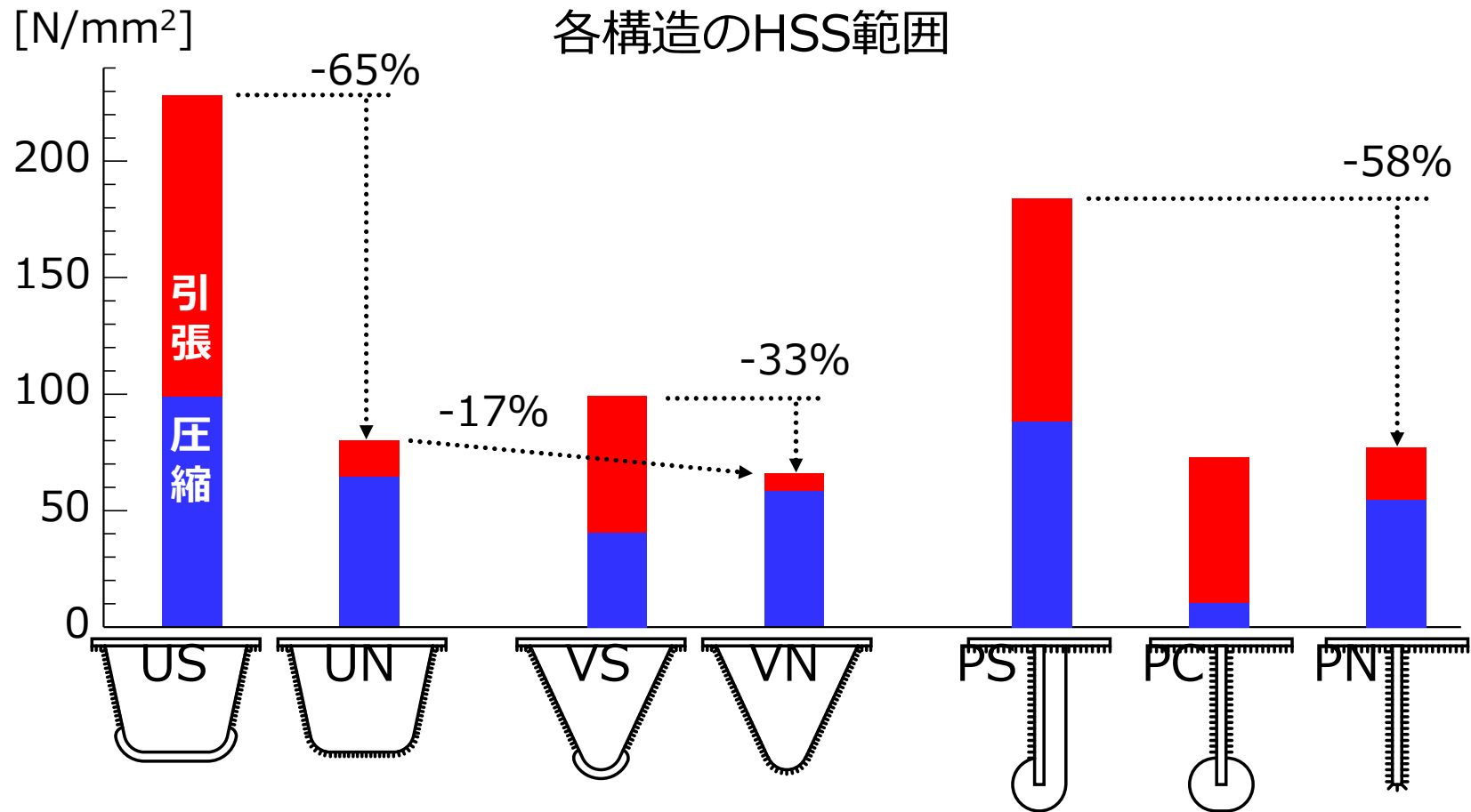
リブ上载荷では最大HSSを見逃している

- 設計想定のリブ上载荷に比べ、面的移動载荷は**6倍**の応力範囲
Uリブ・スリット有交差部のHSS



スリット無交差部は疲労耐久性に優れる

- ・ スリット無は有に比べHSS範囲減少,かつ引張応力発生が少ない
- ・ V・スリット無はU・スリット無に比べてHSS範囲が-17%



鋼橋の疲労問題、総括すると

- 溶接構造への転換—— 1960年代
- 供用期間（設計寿命の概念）は設定せず。
- 疲労設計なし（鋼床版を除く）—— 疲労強度の低いディテール、
- 施工不具合からの疲労亀裂発生—— 品質管理体制
- 過大な交通荷重、過積載

- 5年毎の定期点検の実施—— 実態が見えてきた、疲労の検知は？
点検と診断の差、データの蓄積とそれを反映した点検

**問題はRetrofittingへの関心の低さ、ビジネス化の難しさ。
技術開発と投資**

**メンテナンスからマネジメントへの転換—— 対症療法型から予防保全型へ。
ソフト面からのアプローチ、**

的確な点検と診断の重要性の例

疲労などの損傷の進行は対数的

亀裂に対する十分な知識がないと早期発見は極めて難しい。



表面での亀裂長さ20mm、
寿命の60%
グラインダーで削ればOK
費用は0円



表面で60mm程度の貫通亀裂、
寿命の90%



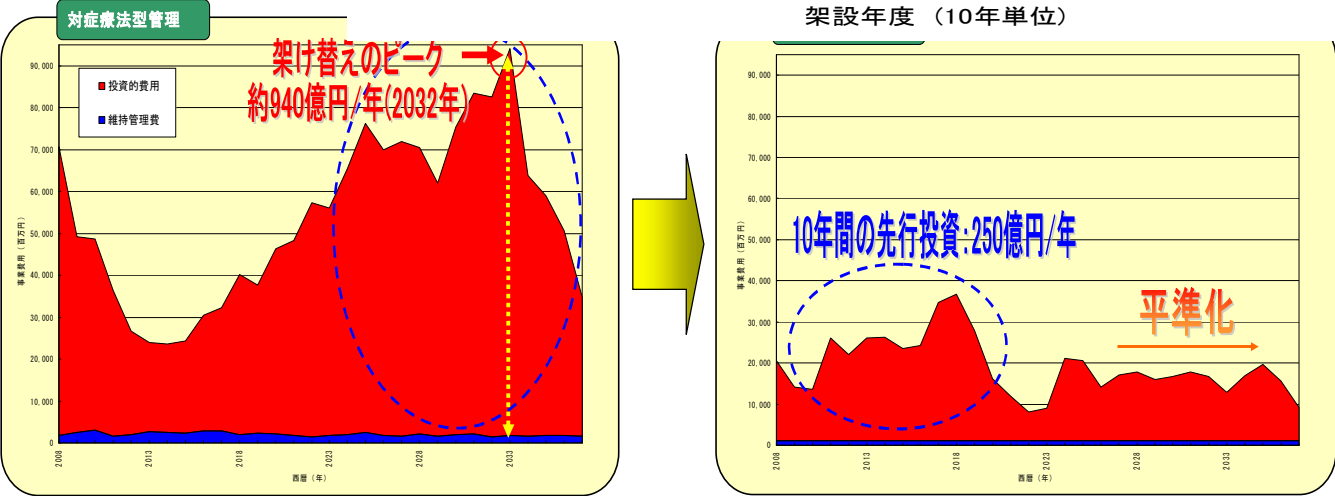
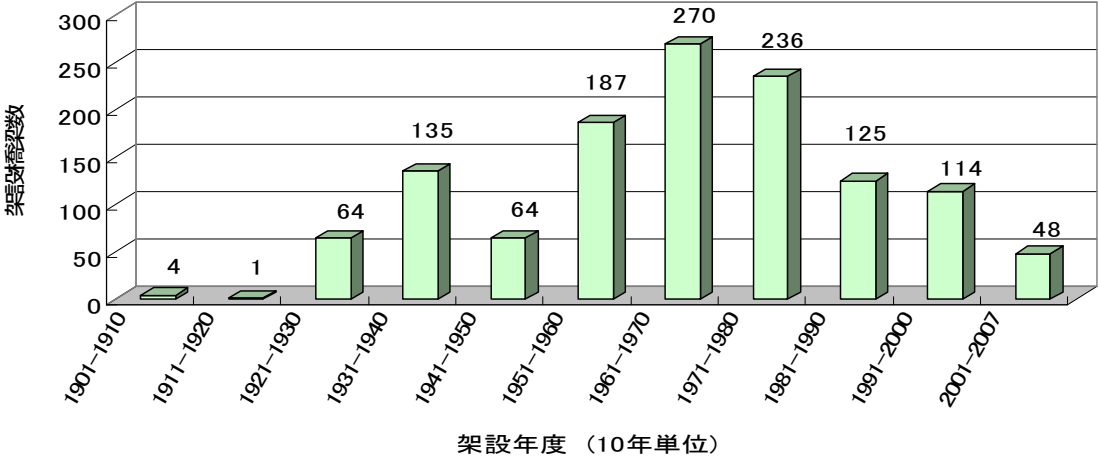
ボルト添接で補修、
20-30万円程度



Game over

対症療法型から予防保全型管理への転換
(橋梁関連経費試算例：東京都の管理橋梁)

東京都建設局：橋梁の管理に関する
中長期計画、平成21年3月より



30年間橋梁総事業費 1兆6000億円 → 縮減額: 1兆円 → 30年間橋梁総事業費 6000億円

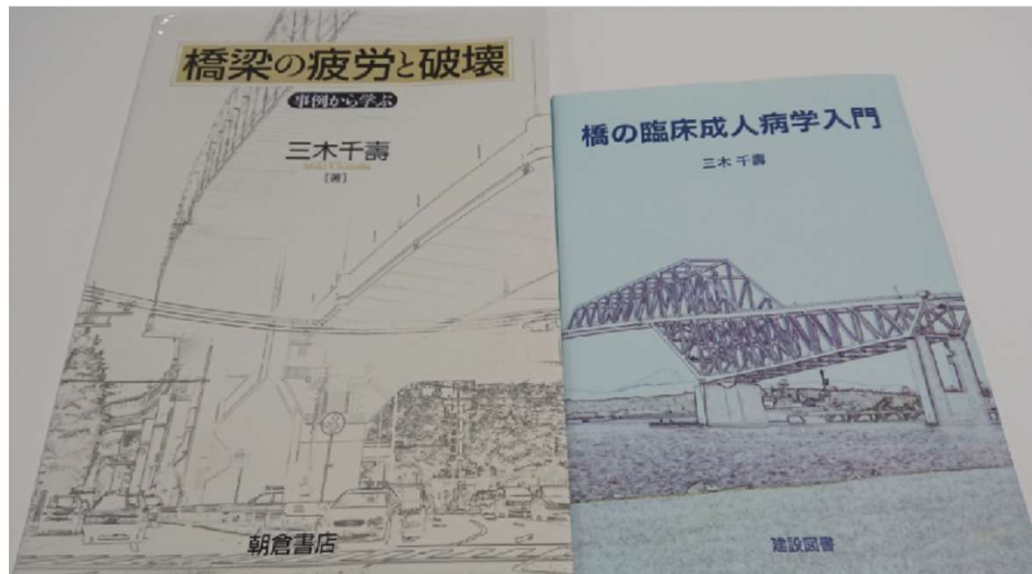
橋梁の疲労事例についてはData-Baseと

データベース: 206 cases

多分、世界最大のData-base、
世界中からアクセス
日本からはほとんどなし
関心が低い、それとも英語のため
使ってください！！



鋼橋の疲労に関する
著書



IIW Collection

Chitoshi Miki

Retrofitting
Engineering
for Fatigue
Damaged Steel
Structures



橋梁用高性能鋼材BHPSの開発

初めてのJIS規格橋梁用鋼材

橋梁用高性能鋼材BHPSの開発 (Bridge High-Performance Steel)

高強度のみならず、溶接施工性や種々の材料品質・機械的性質
の向上を含めた優れた特徴を有する橋梁用の革新的鋼材

- (1) 高強度（降伏点500,700 N/mm²）（効率的な部材断面設計，鋼材重量低減に効果）
- (2) 予熱省略，予熱温度低減，溶接大入熱化、溶接パス間温度規定緩和
（溶接施工性・効率の向上）
- (3) シャルピー吸収エネルギーや破壊じん性値の改善
（ぜい性破壊に対する安全性の向上）
- (4) 歪時効脆化を考慮した冷間曲げ加工の適用範囲拡大
- (5) 耐ラメラテア性向上（板厚方向の特性改善）
- (6) 圧延直角方向の特性改善（板取りの自由度向上，歩留まり向上）
- (7) 耐候性能の付与

鋼橋の設計や製作施工においてもメリットの生じる
種々の改善が図られた鋼材

きっかけは米国Lehigh大学のHPS開発への参加の呼びかけ(1992)

BHPS in USA

米国での鋼橋のシェア拡大のKey Technology

きっかけは日本が提供したTMCPの高強度鋼

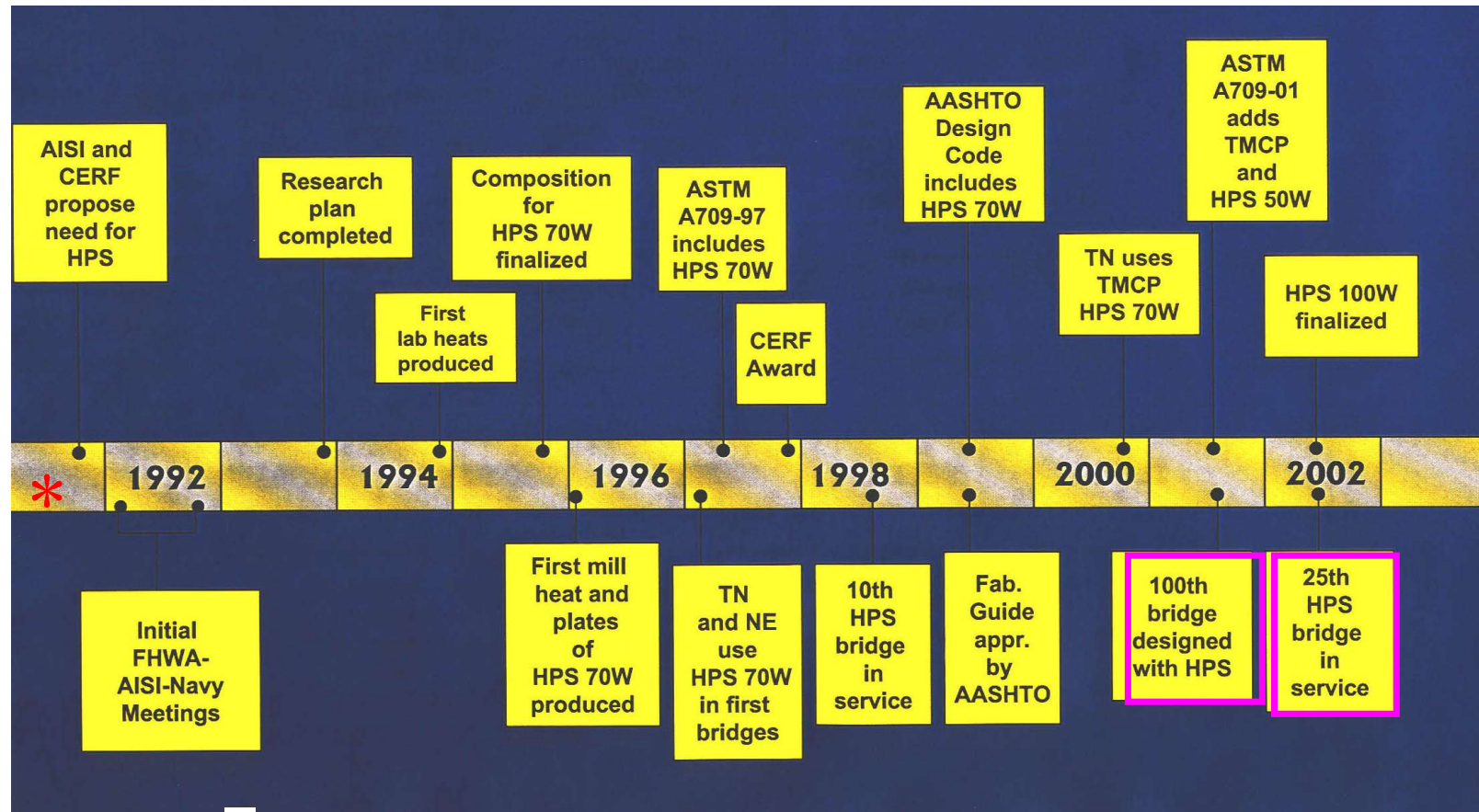
**この時点で米国では高性能の鋼材は製造できなかったと考えらる
海軍の軍艦用――>橋への適用**

インフラの荒廃への認識と21世紀に向けての基盤整備

High-Performance Construction Materials and Systems

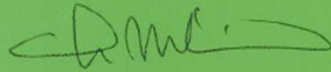
Building an Infrastructure for the 21st Century

HPS Development Timeline



* Navy F.F. project: 日本製TMCP高強度鋼材の利用。橋梁への転用の可能性。
1994年：東工大創造研究プロジェクト（高性能鋼材の橋梁への利用）スタート
2008年：橋梁用高性能鋼材 JIS
2010：米国では450の橋梁

Structural Engineering Documents



8

Use and Application of High-Performance Steels for Steel Structures



International Association for Bridge and Structural Engineering IABSE
Association Internationale des Ponts et Charpentes AIPC
Internationale Vereinigung für Brückenbau und Hochbau IVBH

University of Stuttgart が編集
Oct. 2005

Contents:

HPS in USA
HPS research in Canada
HPS in Japan
HPS in Europe

国際的な橋梁用高性能鋼 の開発競争環境

- 橋梁用高性能鋼の開発は世界各地域で進行中（国際競争環境）
- 我が国高性能鋼材BHSに比較し低グレードながら，米国では新設橋梁で圧倒的なシェア、韓国でも鋼材開発済みで実橋展開中
- 日本の高性能鋼材BHSは，橋梁の要求性能に対して優れた鋼材性能のバランス，優れた溶接性，加工性など国際的にも橋梁用鋼材として最先端の技術

		YP(MPa)	TS	P _{CM'}	Ceq	シャルピー(J)
米国	HPS345W	345	485		0.5	48 (-20℃)
	HPS485W	485	585-760		0.5	48 (-20℃)
	HPS690W	690	780-930		0.6	
日本	SBHS500(W)	500	570～720	≦0.2		100 (-5℃)
	SBHS700(W)	700	780～930	≦0.3 (0.32※)		100 (-40℃)
韓国	HSB500(L,W)	380	500	0.2(0.22)	0.40(W0.47)	47 (-5℃)
	HSB600(L,W)	450	600	0.2(0.22)	0.42(W0.47)	47 (-5℃)
	SM570		570			

Wintergreen Gorge Bridge



- 77+142+115m
- November 21, 2003
- 6 I-girder

BHS鋼材の適用 東京ゲートブリッジ

BHSの良さを
引き出す



東京ゲートブリッジ、2012年完成、中央径間440m

BHPSを活かす構造体

高強度：LRFD設計

トラスでは効果大

高溶接性：全溶接構造

設計面での工夫

鋼材が高強度であること

および溶接性が良いことから

このような格点構造が実現



トラス格点構造の設計

1. 根拠のハッキリしない設計式 (Dimension?) を無視
するところから出発 (このような設計式の存在が恥ずかしい)
 $t=20 \times (P/b)$

2. トラスはピン結合と仮定。実際は？
そのためにトラスの骨組み軸線と構造部材の軸をあわせている。
そんなことは必要か？
施工性を考えた内面ダイアフラムの配置
局部応力の低減

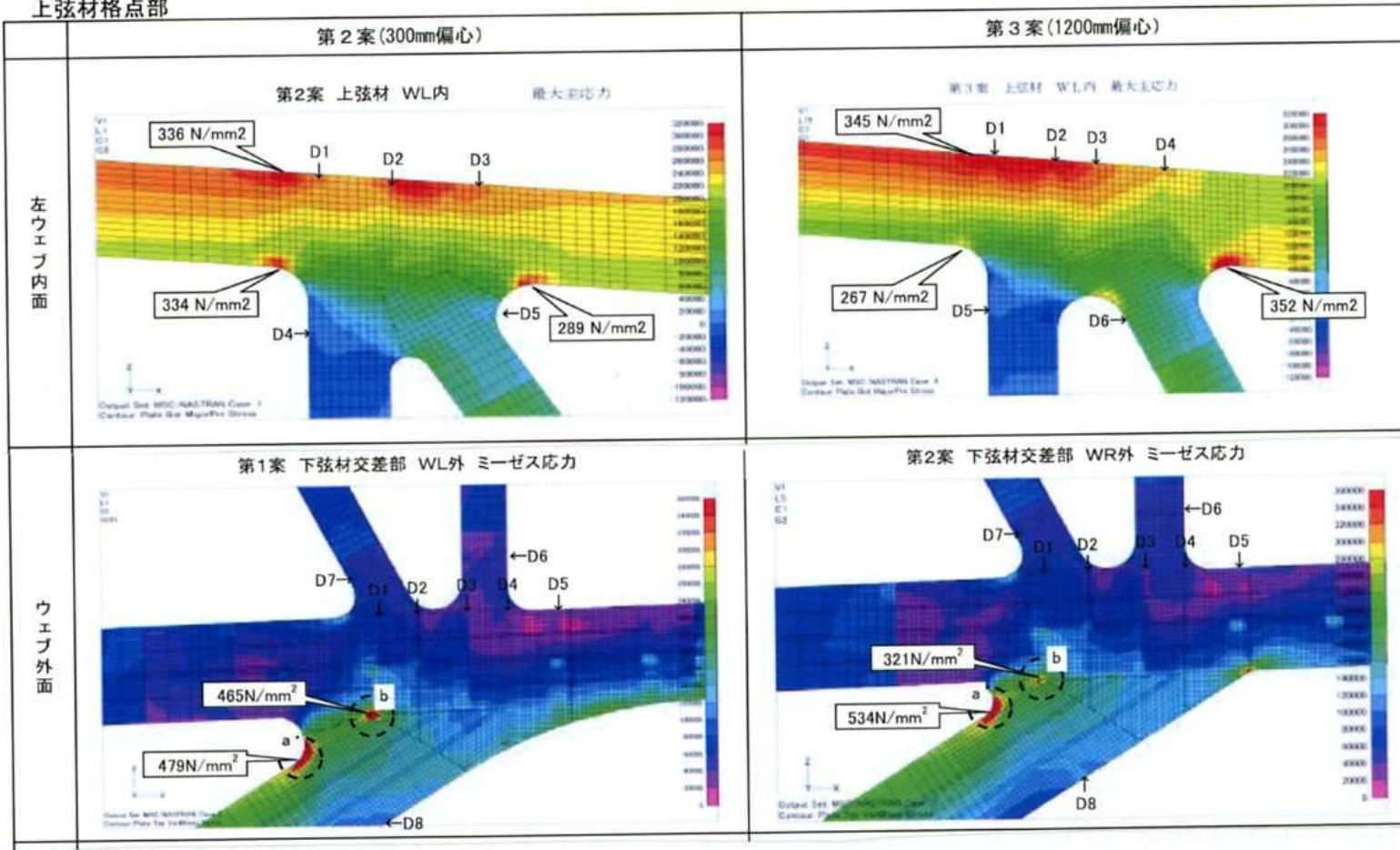
3. そもそもガセットの概念は？

この課題は本四連絡橋での格点部の疲労試験での目的
様々な格点構造ディテールが提案され、疲労試験。しかし角接手問題で埋も
れてしまった。ーリベンジ

FEM解析ベースで構造体を設計しよう

基本的には格点での板厚増はなし。形状と内部のダイアフラム配置より

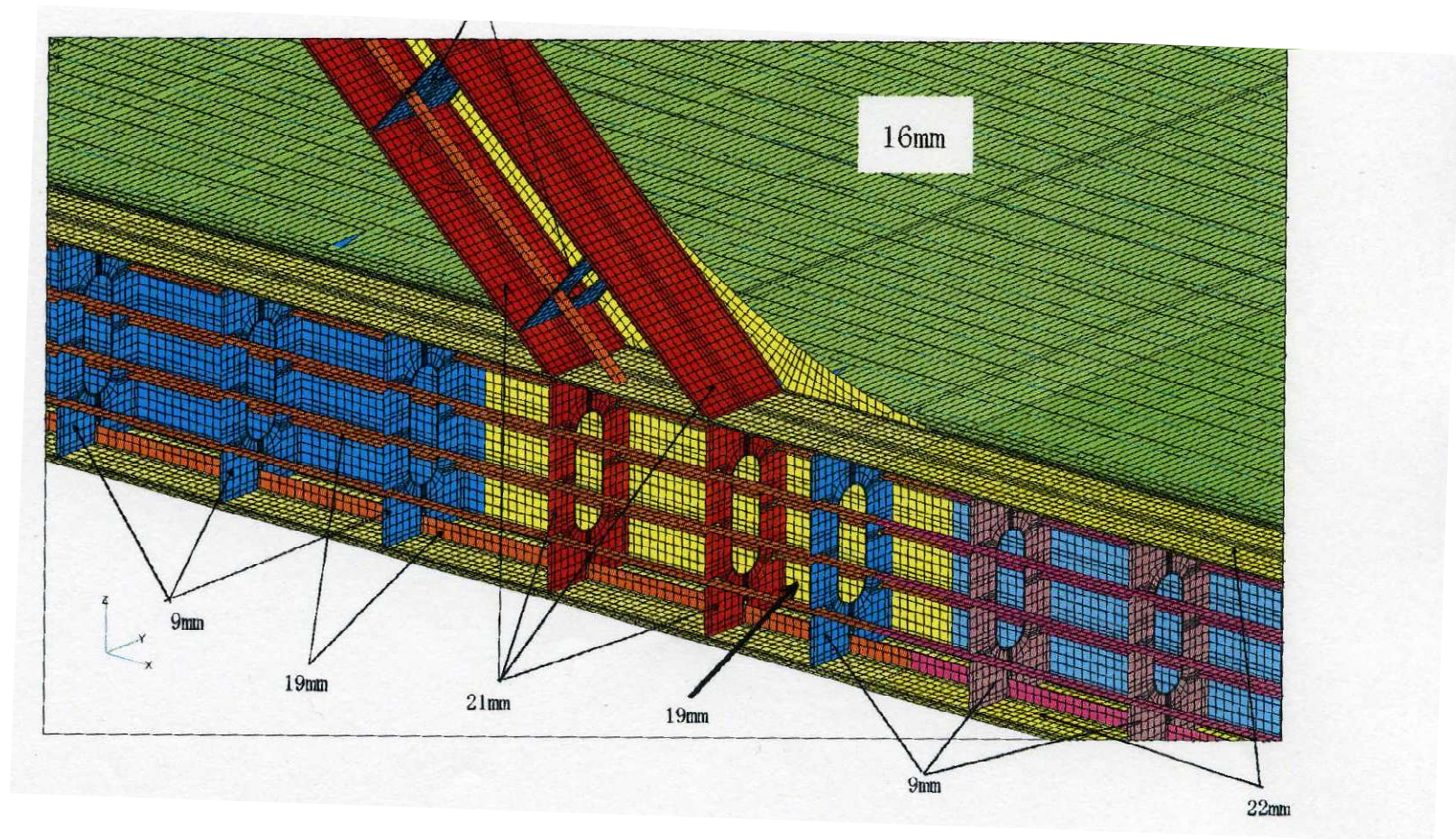
FEM解析結果
上弦材格点部



トラスの軸線をずらすことにより構造ディテールが単純になる。

トラス軸線をずらすことによる応力の上昇は？

FEMで求まる応力(局部応力)からどのように板厚決定をするのか？



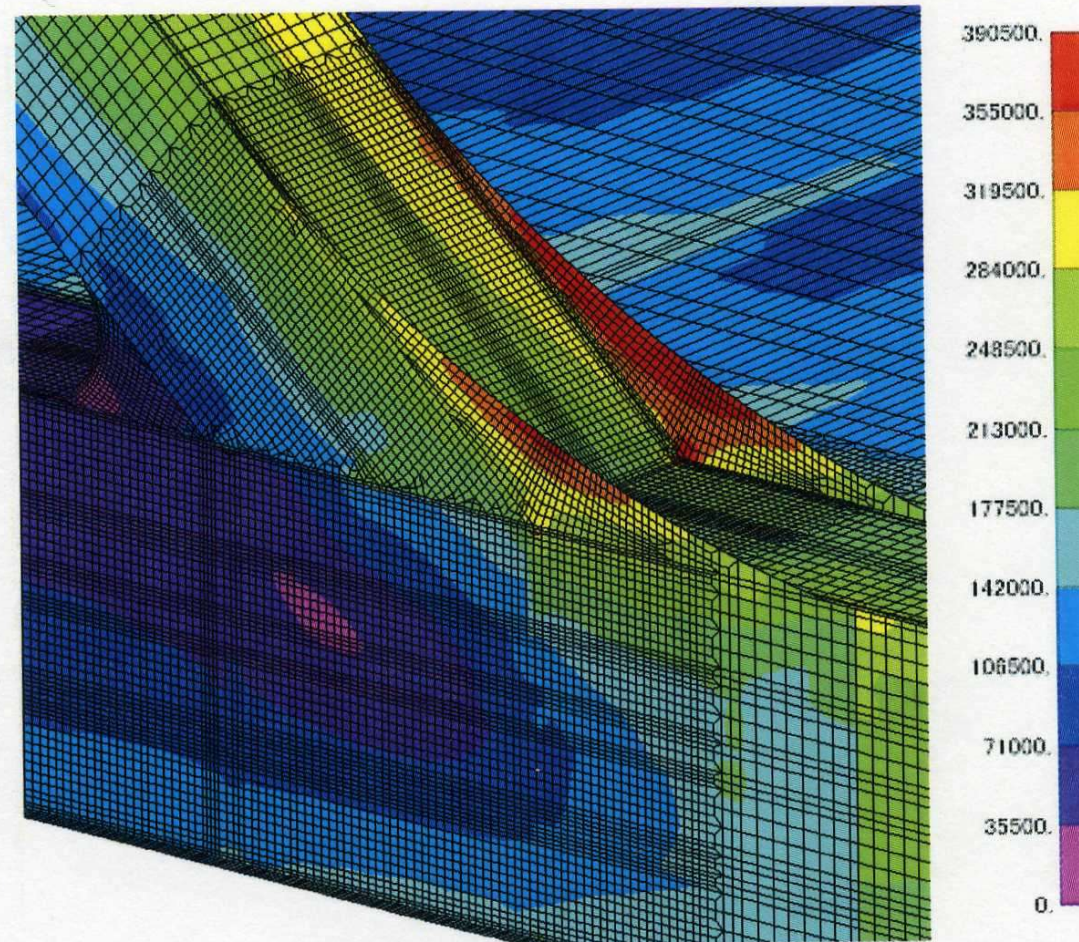


図-2. 2. 10. 20 トラス先端格点 応力コンター図（ミーゼス応力の例示）

おわりに



研究をご一緒した
市川教授、助手、技官、卒研究生、修士学生、博士学生、研究生、研究員、秘書の皆様に感謝します。

ご清聴、ありがとうございました。