

第 1 1 回 鋼構造技術継承講演会

「経験豊富な先人に学ぶ次世代への継承技術」

配布資料

令和5年12月19日

土木学会 鋼構造委員会



## 疲労設計指針作成に携わって



もり たけし  
森 猛

1955年7月21日生  
長崎県西彼杵郡崎戸町  
(現在 西海市)

## 略歴

- 1978年 東京都立大学土木工学科 卒業  
卒業論文: 累積疲労被害に及ぼす平均応力の影響(堀川浩輔 先生)
- 1980年 東京都立大学大学院土木工学専攻 修了(伊藤文人 先生)  
修士論文: 疲労き裂伝播速度に及ぼす応力比および応力履歴の影響
- 1982年 大阪大学大学院溶接工学専攻 中途退学 (堀川浩輔 先生)  
疲労亀裂伝播速度に及ぼす溶接残留応力の影響  
破壊力学の勉強(線形破壊力学入門)
- 1982~1990年 東京工業大学工学部土木工学科 助手(三木千寿 先生)  
学位論文: 溶接橋梁部材の疲労亀裂進展寿命に関する研究(1987年)  
研究の進め方、まとめ方について学ぶ(たくさん・たくさん)の添削)

1990年4月~2018年3月 法政大学土木工学科 専任講師・助教授・教授  
小林正几 先生という言葉: 授業は手を抜かずに、研究室の学生の面倒見はしっかり  
(土木工学科⇒都市環境デザイン工学科 工学部⇒デザイン工学部)

学士:283名 修士:58名 博士:9名

(1996年4月~1997年3月 Monash 大学 客員教授)

Paul Grundy 先生の姿勢

2018年3月 早期退職(選択定年制)

東京 ⇒ 京都

2018年4月~ 法政大学 客員教授(62歳)

2021年4月~ 法政大学 名誉教授(65歳)

## 最終講義原稿の最後のスライド(2018年3月)

### 最近気づいたこと

- ・研究(わからないことをわかるようにすること)が好き
- ・論文にまとめる(行ったことを他人に伝える)ことが好き
- ・学生を含め他人と議論することが好き
- ・多少なりともわかったことを社会に役立てることが好き

### 今後の活動

- ・少しでもよいから好きなことを続けたい

## 印象深い社会活動

5

- <鋼構造協会> 1986年～  
疲労設計指針改定(2回)、既設構造物の耐久性評価、土木鋼構造診断士、……
- <土木学会> 1986年～  
鋼構造委員会(高力ボルト、鋼床版の疲労、標準示方書施工編、……)  
土木学会論文集、構造工学論文集、JABEE、……
- <鋼橋技術研究会> 1988年～  
施工部会、維持管理部会、技術委員会、……
- <首都高速道路> 1993年～  
点検・補修・補強、鋼製橋脚隅角部、鋼床版、……
- <溶接学会・溶接協会> 1994年～  
溶接疲労強度研究委員会(FS委員会)、……
- <国土交通省、道路協会、……> 1994年～  
橋梁委員会、落橋防止装置等の溶接不良、国道357号鋼床版疲労対策、  
新道路会議、鋼橋疲労設計WG、……
- <国際溶接学会IIW XIII委員会> 2001～2014年  
WG5(Life Extension of Welded Structures by Repair, Retrofitting and Structural Monitoring)  
……………

## 疲労設計指針

6

- 1986年～1993年 鋼構造協会(森:31歳～)  
疲労設計指針改定小委員会(委員長 三木千寿)  
「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」技報堂出版、1993年4月
- 1997年～2002年 道路協会(42歳～)  
疲労設計WG(主査 三木千寿)  
「鋼道路橋の疲労設計指針」丸善、2002年3月
- 2006年～2012年 鋼構造協会(51歳～)  
疲労設計指針改定小委員会(委員長 森 猛)  
「鋼構造の疲労設計指針・同解説 2012年改定版」  
技報堂出版、2012年6月



活動を始める前、最中、活動終了後に考えたこと・行ったこと

2つの鋼構造協会疲労設計指針の多くの内容は以下に記載

7

### JSSC 疲労設計指針・四方山話

Reminiscences about Fatigue Design Recommendation for Steel Structures by JSSC

法政大学 都市環境デザイン工学科  
Dr. Eng.  
Professor  
Department of Civil and Environmental Engineering  
Hosei University

教授  
森 猛  
Takeshi MORI



川田技報 Vol.32 2013年「寄稿論説」

## JSSC疲労設計指針との出会い

8

- 1974年「日本鋼構造協会疲労設計指針(案)」発行(19歳)
- 1980年 大阪大学博士課程時の学内勉強会(25歳)  
堀川研究室(鈴木博之さん)と前田研究室(大倉一郎さん、瀬良昌憲さん)  
瀬良さんの発表(鋼床版の疲労?)で指針の存在を知る

### 1980年ころ～

本四連絡橋関連で日本でも溶接橋梁の疲労に関する研究が大幅に進む  
鋼道路橋でも疲労損傷の問題

### 1986年～

疲労設計指針改定小委員会(鋼構造協会)

1974年「日本鋼構造協会疲労設計指針(案)」の作成メンバー(鉄道関係の方々を中心)

9

白石 隆義	㈱ダイクレ常務取締役 主査	鯉淵 興二	㈱日立製作所機械研究所第4部
伊藤 文人	東京都立大学工学部土木工学科教授	竹名 興英	日本国有鉄道盛岡工務局花巻工事区長
多田 美朝	㈱八千代製作所技術顧問	稲葉 紀昭	日本国有鉄道構造設計事務所主任技師
内野 和雄	石川島播磨重工業㈱技術研究所構造強度部	三浦 尚	東北大学工学部土木工学科助教授
福渡 一郎	㈱日立製作所笹戸工場運搬機部	井上 啓一	建設省土木研究所構造橋梁部橋梁研究室
大野 啓充	㈱日立製作所機械研究所第4部	中村 正平	首都高速道路公団工事検査担当調査役
藤原 稔	建設省土木研究所構造橋梁部橋梁研究室	原 公	石川島播磨重工業㈱技術研究所構造強度部
中村 義隆	石川島播磨重工業㈱技術研究所構造強度部		

<指針案の特徴(特定の構造物を対象しないモデルコード)>

- ・疲労き裂発生寿命 $N_c$ を基準(疲労き裂を発生させない)
- ・応力範囲 $\Delta\sigma$ で $N_c$ を整理(50万回疲労強度  $A \sim G$   $18 \sim 5 \text{ kgf/mm}^2$ )
- ・ $\Delta\sigma$ - $N_c$ 関係の傾きは5.56
- ・変動振幅応力から応力範囲頻度分布を求める際にレンジペア法を使用
- ・疲労照査には修正マイナー則を使用(き裂発生後にはマイナー測は成り立たない)
- ・疲労設計荷重の考え方(設計寿命、単位期間と稼働単位(荷重単位))
- ・部分安全係数(重要度係数、応力比係数、信頼度係数)を導入
- ・平均応力の影響(最小応力が0以上:補正無し、0以下:それに応じて補正)

目次

1. まえがき
2. 基本理念
3. 適用範囲
4. 用語
5. 材料および接合法
  - 5.1 材料一般
  - 5.2 使用鋼材
  - 5.3 接合用材料
    - 5.3.1 溶接用材料
    - 5.3.2 高力ボルト接合用材料
  - 5.4 接合法
  - 5.5 溶接部の検査
6. 継手および強度
  - 6.1 疲労を考慮すべき部材および継手
  - 6.2 疲労を考慮すべき構造部分
  - 6.3 応力の計算
  - 6.4 基本疲労強度

7. 設計寿命と応力頻度分布

- 7.1 設計寿命
  - 7.2 単位期間
  - 7.3 稼働単位
  - 7.4 設計断面力変動範囲
  - 7.5 等価断面力変動範囲
  - 7.6 等価断面力変動範囲のパラッキ
  - 7.7 等価断面力変動範囲の単位期間中繰り返し数
  - 7.8 設計断面力変動範囲の単位期間中繰り返し数
  - 7.9 設計寿命中予定当価繰り返し数
8. 許容応力範囲
    - 8.1 応力度の設計値
    - 8.2 許容応力範囲
    - 8.3 重要度係数
    - 8.4 応力比係数
    - 8.5 信頼度係数
  9. 腐食に対する考慮

10

1986年～改訂委員会 1989年疲労設計指針(JSSCテクニカルレポート)

11

委員長

三木 千寿 東京工業大学工学部土木工学科

委員

阿部 允	(財)鉄道総合技術研究所線路構造研究室
井野 幸夫	(財)日本海事協会技術研究所材料機装研究室
岩崎 紀夫	NKK(株)技術開発本部商品開発推進チーム
太田 昭彦	科学技術庁金属材料研究所環境性能研究部第5研究室
大橋 治一	本州四国連絡橋公団設計部設計2課
鹿野 顕一	三井造船(株)鉄構土木事業本部設計部
川井 豊	川崎製鐵(株)エンジニアリング事業部研究開発センター構造研究室
木内 晃	(株)神戸製鋼所機械研究所要素技術センター構造強度技術室
橋内 良雄	労働省産業安全研究所機械研究部
酒井 吉永	トビー工業(株)鉄構事業部設計部
征矢 勇夫	新日本製鐵(株)第二研究所厚板条鋼研究センター
中村 義隆	石川島播磨重工業(株)技術研究所構造強度部
西川 和廣	建設省東北地方建設局酒田工事事務所
堀井 秀之	東京大学工学部土木工学科
の場 正明	三菱重工業(株)長崎研究所強度研究室
森 猛*	東京工業大学工学部土木工学科
安本 孝	(株)宮地鐵工所技術開発部
山田健太郎	名古屋大学工学部土木工学科
横尾 正幸	(株)横河橋梁製作所研究所

\* 幹事

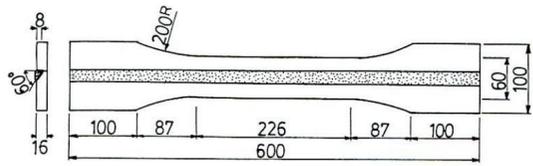
委員会活動

最初はフリーディスカッション  
KJ法(川喜田二郎法)議事録作成に多少の自信  
委員会のターゲットの設定

- ・き裂発生寿命 $N_c \Rightarrow$  疲労寿命 $N_f$   
小型試験体であれば破断寿命  
大型であれば板厚貫通寿命・表面き裂長さ例えば40mm
- ・ $\Delta\sigma$ - $N$ 関係の見直し(傾き、疲労限)
- ・各継手の疲労強度等級の見直し
- ・疲労強度に対する平均応力・板厚の影響

12

# なぜ発生寿命から疲労寿命？(発生寿命の定義？)

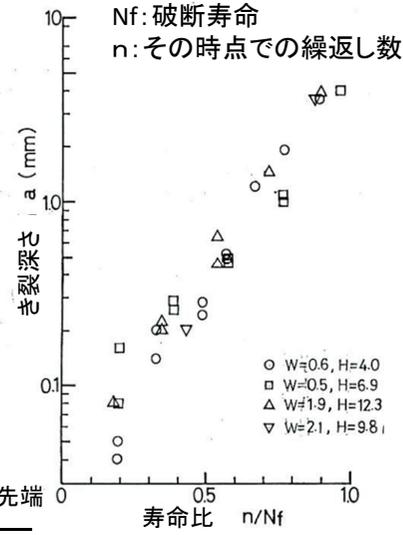
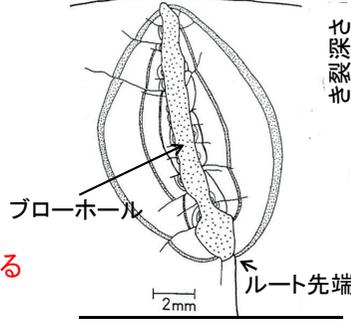


ルートブローホールを有する試験体

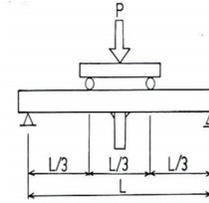
## ビーチマーク試験

発生寿命では安全側過ぎる

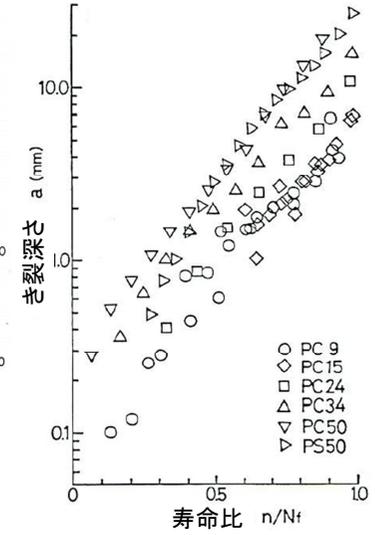
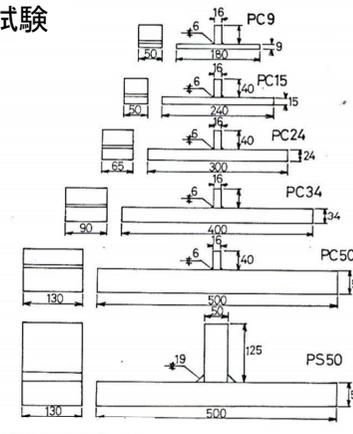
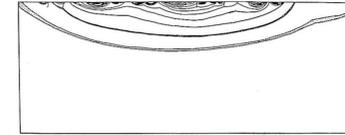
溶接継手ではき裂進展寿命が疲労寿命の大半を占める



# T字継手の疲労試験



## ビーチマーク

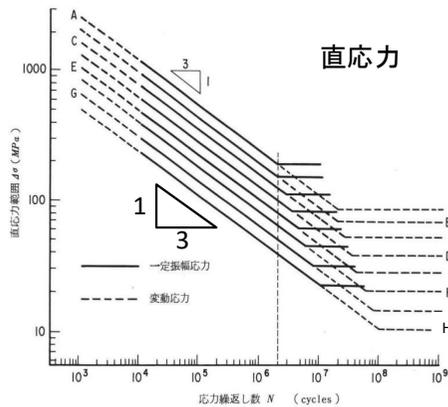


# 継手の疲労強度と $\Delta\sigma$ -N関係の見直し:

疲労試験データ(山田健太郎先生と川崎製鉄のデータ)を整理

8つの設計疲労強度曲線( $\Delta\sigma$ -N関係)を設定 (1ランクの違い 疲労強度20~25%)

A~H 190~40 N/mm<sup>2</sup> 200万回疲労強度 傾き3

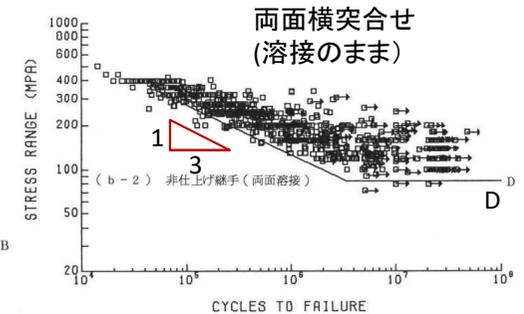
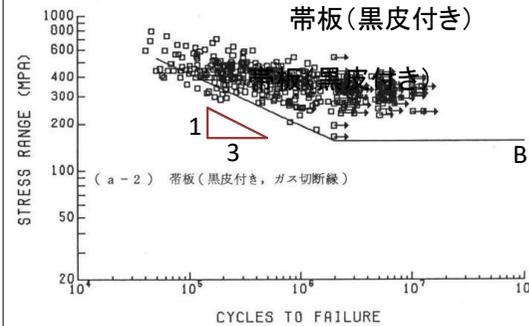


強度等級	200万回疲労強度
A	190 N/mm <sup>2</sup>
B	150 N/mm <sup>2</sup>
C	125 N/mm <sup>2</sup>
D	100 N/mm <sup>2</sup>
E	80 N/mm <sup>2</sup>
F	65 N/mm <sup>2</sup>
G	50 N/mm <sup>2</sup>
H	40 N/mm <sup>2</sup>

旧JSSC指針 き裂発生寿命 傾き 5.56  
50万回疲労強度 A~G 18~5 kgf/cm<sup>2</sup>

# 各継手の強度等級の決め方

データの下限を示すような $\Delta\sigma$ -N関係 (平均-2標準偏差) に対応



1974年指針  
き裂発生寿命 傾き5.56  
1993年指針  
+き裂進展寿命 傾き3.0

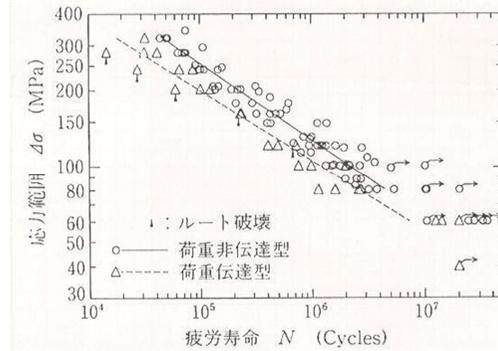
# 疲労強度等級

継手形式		疲労強度等級	
横突合せ溶接継手	止端仕上げ	C	
	非仕上げ	D	
縦方向溶接継手	余盛除去	B	
	非仕上げ	C	
十字溶接継手	非伝達型	止端仕上げ	D
		非仕上げ	E
	伝達型	止端仕上げ	E
		非仕上げ	F
ガセット溶接継手	面外ガセット	止端仕上げ	E
		非仕上げ	F
	面内ガセット	止端仕上げ	G
		非仕上げ	H

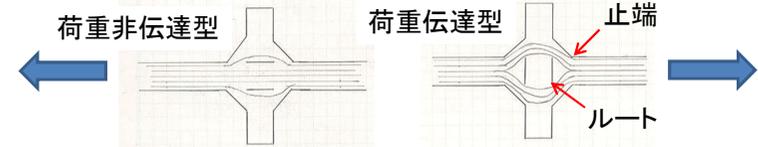
応力集中が高い  
↓  
疲労強度等級が低い

鋼材の静的強度の影響なし  
後で

# 荷重非伝達型と荷重伝達型十字すみ肉溶接継手



応力集中係数の相違  
荷重非伝達型  
止端破壊: E等級  
荷重伝達型  
止端破壊: F等級  
ルート破壊: H等級



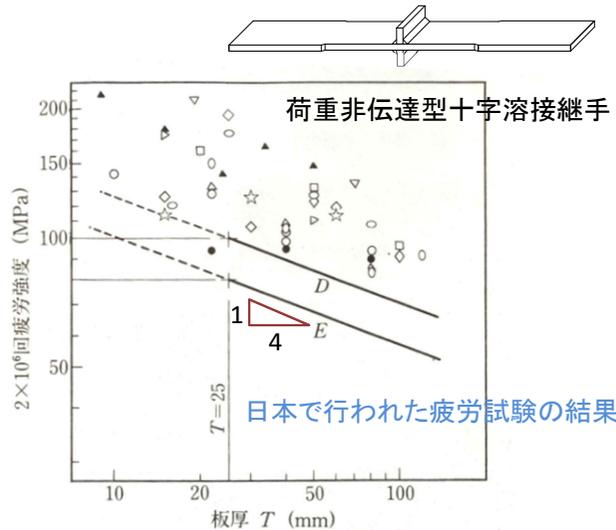
# 板厚の影響

$$C_t = \sqrt[4]{25/t}$$

t: 板厚(25mm以上)

Gurney 1979年  
十字すみ肉溶接継手

Berge 1981年  
海洋構造物  
(t=12.5~80mm)

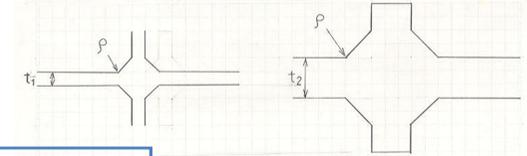


# 板厚効果が生じるメカニズム

疲労強度の支配因子:  
亀裂が生じる位置の応力集中係数  
亀裂が進展する断面の応力分布

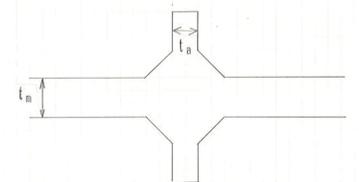
継手形式や  
板の組合せにより  
板厚効果は異なる

応力集係数は  
t/p に依存する



主板の厚さt<sub>m</sub>に比べて付加板の厚さt<sub>a</sub>がある程度小さくなると応力集係数はt<sub>m</sub>の影響をさほど受けなくなる。

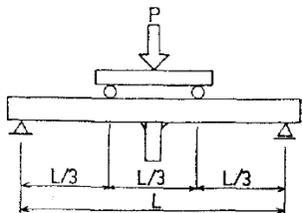
t<sub>a</sub> ≤ 12mm 板厚補正なし



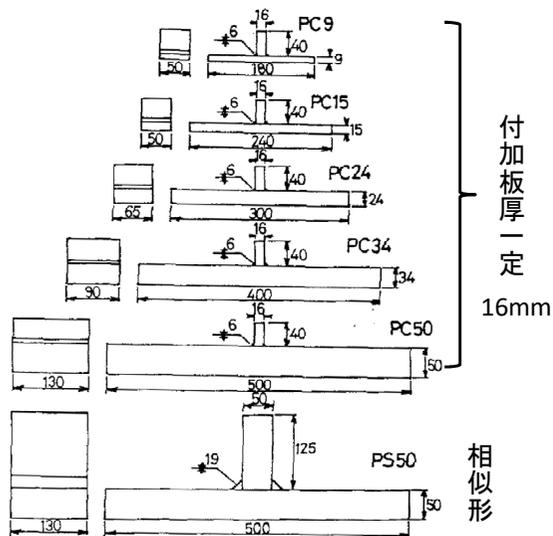
$t_a \leq 12\text{mm}$  板厚補正なし

試験体

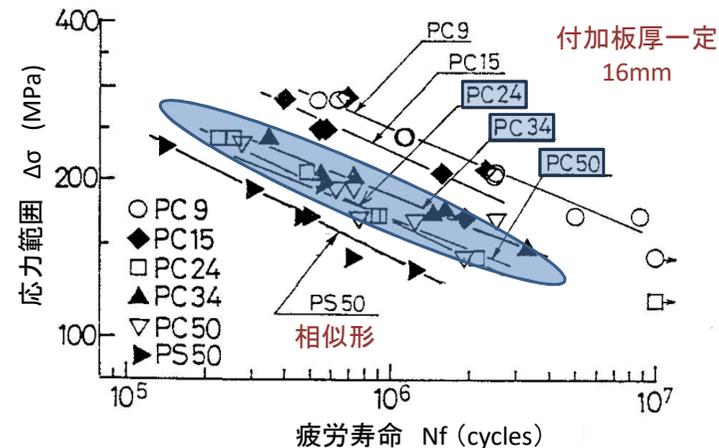
板曲げ疲労試験



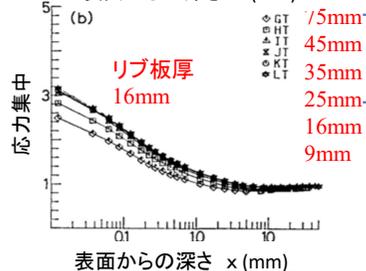
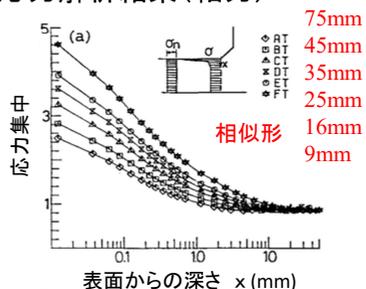
T.P.	L (mm)
PC 9	150
PC 15	210
PC 24	270
PC 34	360
PC 50	450
PS50	450



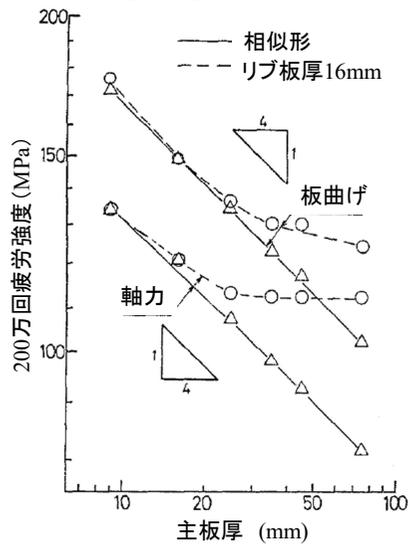
疲労試験結果



応力解析結果(軸力)



疲労き裂進展解析結果



疲労強度:

亀裂が生じる位置の応力集中係数  
亀裂が進展する断面の応力分布

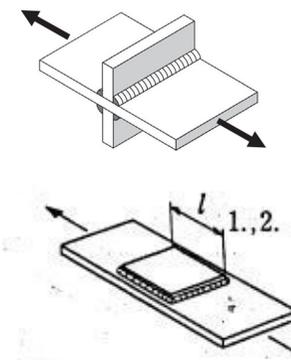


継手形式や  
板の組合せにより  
板厚効果は異なる

板厚の影響を考慮する継手

十字溶接継手 (溶接のまま)

カバープレート継手 (溶接のまま)



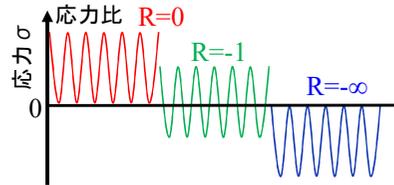
### 平均応力(応力比)と残留応力の影響

- ・原則として平均応力の影響はないものとする。
- ・平均応力が圧縮領域にある場合、すなわち応力比Rが-1以下の場合には、以下に示す補正係数 $C_R$ を基本疲労強度に乘ずることにより疲労強度を求めてもよい。

$$C_R = 1.3 \times \frac{1-R}{1.6-R} \quad (R \leq -1)$$

- ・最大および最小応力とも圧縮領域にある場合には、 $C_R=1.3$

応力比R  
 $R = (\text{下限応力}) / (\text{上限応力})$



溶接部は高い残留応力場(鋼材の降伏応力程度)  
 →溶接部に生じる実変動応力  
 降伏応力を上限とした繰返し応力に近い状態



- き裂発生寿命 or き裂が小さい間のき裂進展速度に対する応力比の影響は非常に小さい

引張応力が卓越  $R = -1$  以上 → 応力比によらず疲労強度を一定

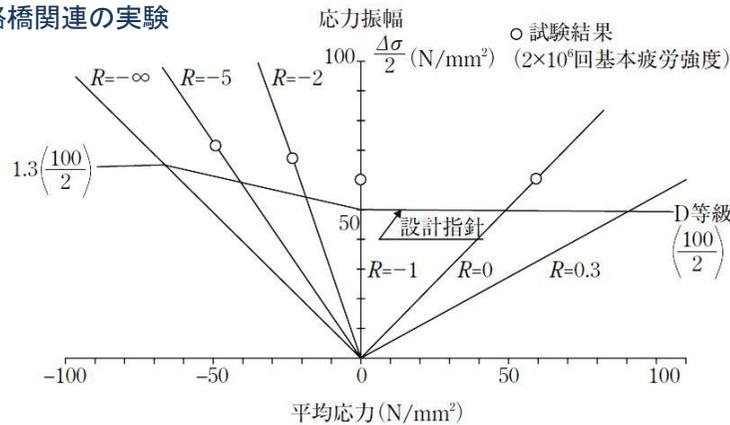
- 疲労き裂がある程度以上に進展すると残留応力が解放  
 → 応力比が進展速度に影響

特に、圧縮応力が卓越する場合に顕著  
 圧縮応力成分が卓越  $R = -1$  以下 → 疲労強度を割り増し

非常に高い引張残留応力を有する継手の試験結果 →  $R = -\infty$  で30%増し

非溶接継手では応力比の影響が顕著であるが、  
 簡略化のため、溶接継手と同じ扱い

#### 本州四国連絡橋関連の実験



### 信頼性・安全性

#### 安全性指標βの試算例

#### 部分安全係数

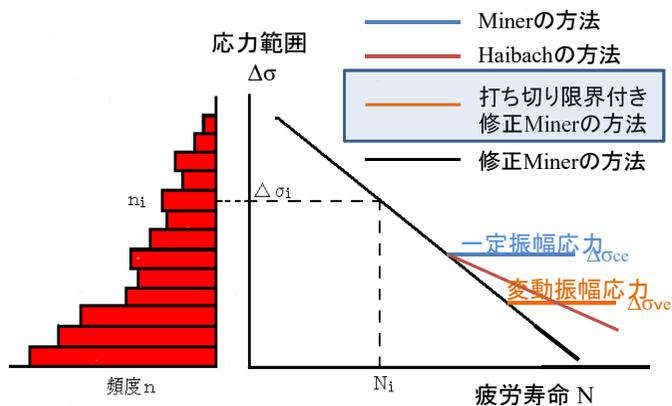
- ・冗長度係数 $\gamma_b$  1.00~1.10  
 (対象部分の疲労破壊が構造物全体の安全性に及ぼす影響)
- ・重要度係数 $\gamma_b$  0.80~1.00  
 (構造物の破壊が及ぼす社会的影響)
- ・検査係数 $\gamma_i$  0.90~1.10  
 (検査の有無)

#### 資料編 6章「安全性の考え方」

部分安全係数の数値と構造物の安全性のレベル(安全性指標β)との関係

$\gamma_w = 0.90$			
	$\gamma_b = 0.90$	$\gamma_b = 1.00$	$\gamma_b = 1.10$
$\gamma_i = 0.90$	-	1.52	2.23
$\gamma_i = 1.00$	1.52	2.30	3.01
$\gamma_i = 1.10$	2.23	3.01	3.72
$\gamma_w = 1.00$			
	$\gamma_b = 0.90$	$\gamma_b = 1.00$	$\gamma_b = 1.10$
$\gamma_i = 0.90$	1.52	2.30	3.01
$\gamma_i = 1.00$	2.30	3.09	3.80
$\gamma_i = 1.10$	3.01	3.80	4.51
$\gamma_w = 1.10$			
	$\gamma_b = 0.90$	$\gamma_b = 1.00$	$\gamma_b = 1.10$
$\gamma_i = 0.90$	2.23	3.01	3.72
$\gamma_i = 1.00$	3.01	3.80	4.51
$\gamma_i = 1.10$	3.72	4.51	-

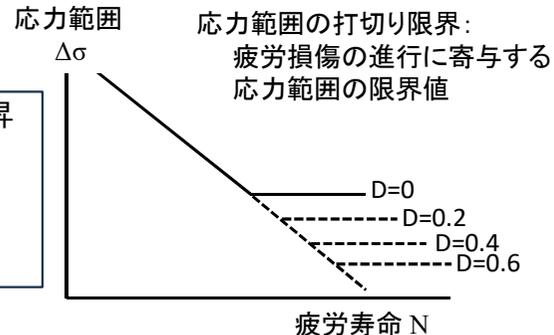
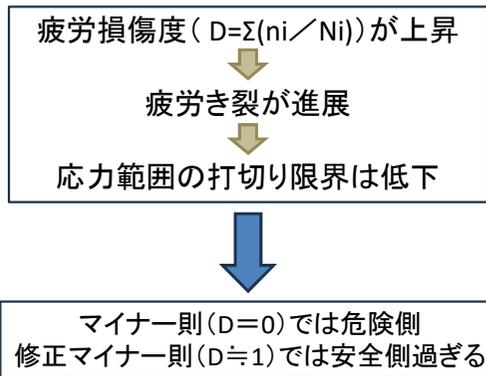
線形累積被害則(マイナー則)の見直し



線形累積被害則  $\sum (n_i / N_i) = 1$   
疲労破壊

- Minerの方法
- Haibachの方法
- 打ち切り限界付き修正Minerの方法
- 修正Minerの方法
- 旧JSSC指針 修正マイナーの方法
- AASHTO 修正マイナーの方法
- ヨーロッパ ハイバツハの方法
- JSSC指針1993年 打ち切り限界付き修正マイナーの方法

打ち切り限界の実際



ハイバツハの方法  
打ち切り限界付き修正マイナーの方法  
三木千寿, 坂野昌弘: 疲労亀裂進展解析による疲労設計曲線の検討, 構造工学論文集, V01-36A, pp 409 416, 1990.

JSSC疲労設計指針:モデルコード

- 各種構造物に共通の疲労強度
- // 共通の疲労安全性照査
- // 共通の荷重の考え方

構造物を特定した指針では具体的な疲労設計荷重が必要

1980年ころから多くの鋼道路橋で疲労損傷

「鋼道路橋の疲労設計指針」の作成

1997年～

鋼道路橋用の疲労設計荷重の設定(メインの目的)  
その他、いくつかの変更・追加

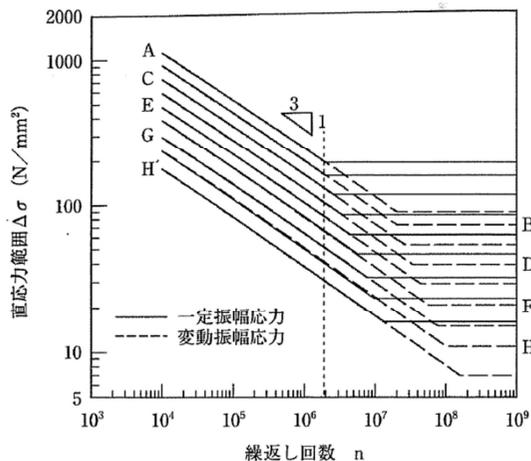
鋼橋疲労設計WG 名簿

- |     |       |           |       |          |
|-----|-------|-----------|-------|----------|
| 主査  | 三木 千寿 | 東京工業大学    | 玉越 隆史 | 建設省土木研究所 |
| 副主査 | 坂野 昌弘 | 関西大学      | 中谷 昌一 | 建設省土木研究所 |
| 委員  | 青木 敬幸 | 首都高速道路公団  | 中村 聖三 | 長崎大学     |
|     | 芦塚憲一郎 | 日本道路公団    | 名取 暢  | 横河ブリッジ   |
|     | 石川 博基 |           | 本間 宏二 | 新日本製鐵    |
|     | 上東 泰  | 日本道路公団    | 町田 文孝 | 川田工業     |
|     | 川端 淳  | 本州四国連絡橋公団 | 村井 康生 | 神戸製鋼所    |
|     | 杉本 一郎 | 日本鉄道建設公団  | 森 猛   | 法政大学     |
|     | 高木千太郎 | 東京都建設局    | 劉 銘崇  | 日本技術開発   |
|     | 高橋 実  | 建設省土木研究所  |       |          |
|     | 竹口 昌弘 | 本州四国連絡橋公団 |       |          |

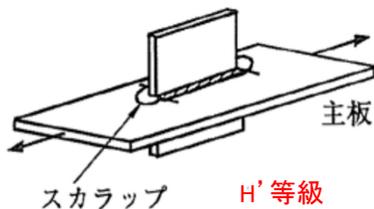
(2002年3月現在)

その他の変更・追加点

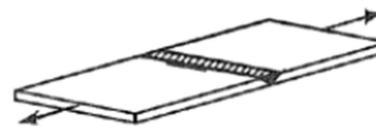
継手形式の追加・疲労強度等級の追加



A~H ⇒ A~H'  
 H: 200万回疲労強度 40 N/mm<sup>2</sup>  
 H': 200万回疲労強度 30 N/mm<sup>2</sup>

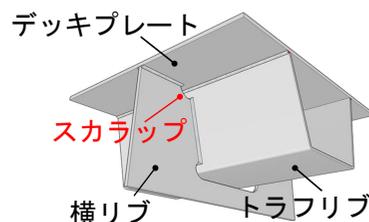


横突合せ継手のきず寸法の規定

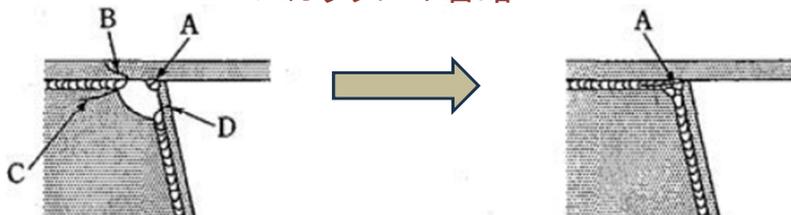


板厚 $t$	きず寸法
$t \leq 18\text{mm}$	3mm 以下
$t > 18\text{mm}$	板厚の 1/6 以下

鋼床版横リブ交差部のディテール規定の追加



スカラップの省略



A~D: 疲労き裂発生懸念力所

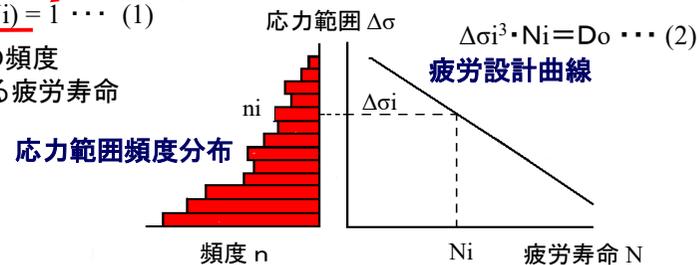
疲労設計荷重の前に (累積) 疲労損傷度

線形累積被害則(マイナー則)

(累積) 疲労損傷比 疲労破壊

$$\sum (n_i / N_i) = 1 \dots (1)$$

$n_i$ : 応力範囲  $\Delta\sigma_i$  の頻度  
 $N_i$ :  $\Delta\sigma_i$  に対応する疲労寿命

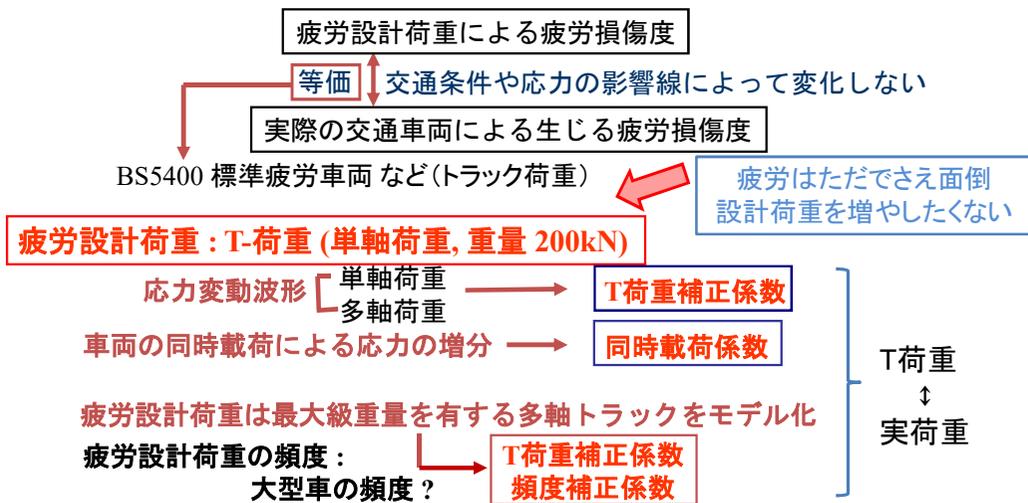


(2)式より  $N_i = D_o / \Delta\sigma_i^3 \dots (3)$

(3)式を(1)式に代入  $\sum (\Delta\sigma_i^3 \cdot n_i) = D_o \dots (4)$

(累積) 疲労損傷度

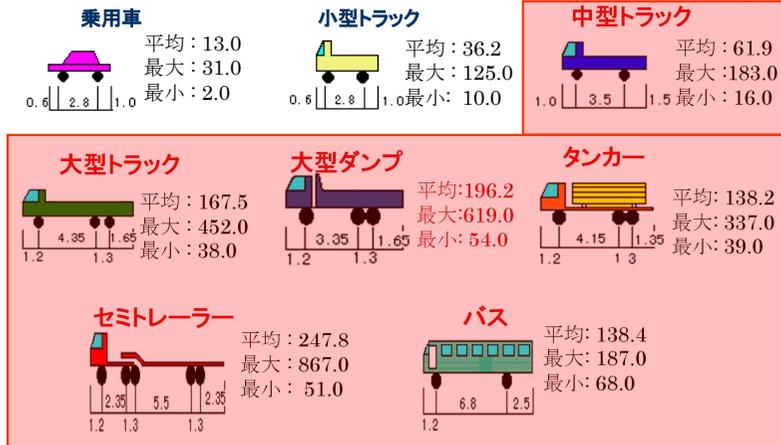
### 疲労設計荷重の考え方(疲労に影響を与えるのは大型車による応力変動)



### T 荷重補正係数 (T-荷重と実車両の相違、最大級重量の車両を想定)

#### 車両の形式と重量(昭和59年有明 国道357号線)

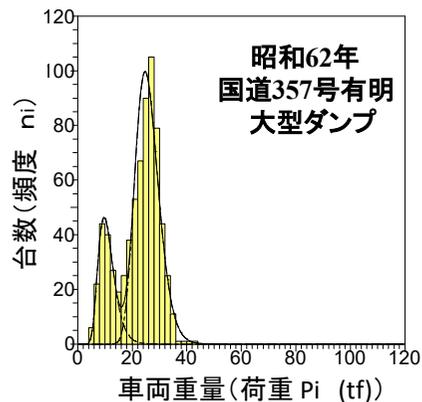
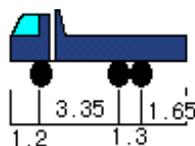
(重量: kN)



大型車

### 車両重量の測定例

#### 大型ダンプ



$$\text{等価荷重 } P_{ei} = \sqrt[3]{\frac{\sum (\text{荷重 } P_i^3 \times \text{頻度 } n_i)}{\sum \text{頻度 } n_i}} = 24.45 \text{ tf}$$

### 荷重の特性値

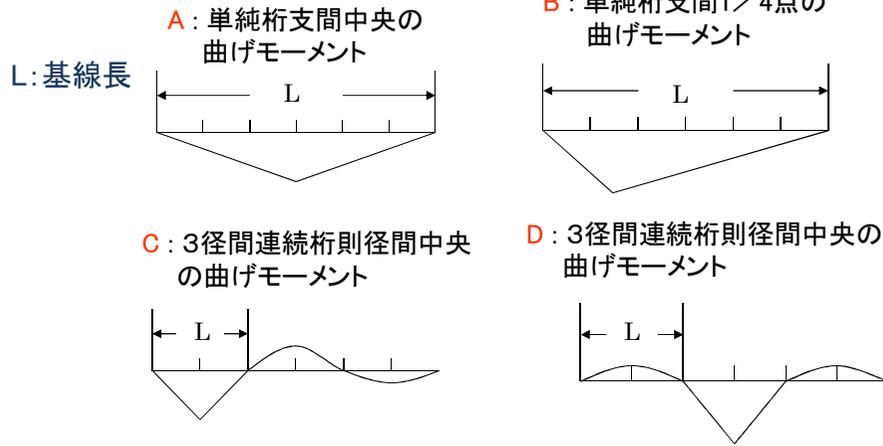
$$\text{各車両の等価荷重 } P_{ei} = \sqrt[3]{\frac{\sum (\text{荷重 } P_i^3 \times \text{頻度 } n_i)}{\sum \text{頻度 } n_i}}$$

このデータ  
を使用

	乗用車 C	小型トラック ST	中型トラック MT	大型トラック LT	大型ダンプ LD	タンクローリー TR	セミトレーラー TT	バス BS
H4有明	3.13	4.72	7.43	18.82	24.68	17.83	33.22	9.90
S62有明	3.70	4.86	7.15	15.09	24.45	13.85	26.84	9.19
S59有明	1.92	4.26	7.15	17.41	21.56	16.27	30.74	11.66
S59熊谷	1.50	4.01	8.25	18.79	26.55	22.62	28.87	10.93
H4いわき	2.80	3.71	8.80	23.26	26.83	20.29	32.92	8.28
H4千葉	2.59	3.98	7.28	21.46	31.32	14.47	44.29	10.32
H4草加	2.63	3.79	7.01	24.30	38.67	15.18	35.70	8.66
S62草加	3.32	4.59	7.42	18.42	31.72	14.47	31.52	10.93
S62八戸	3.49	5.19	7.48	17.96	26.62	17.21	23.28	10.33

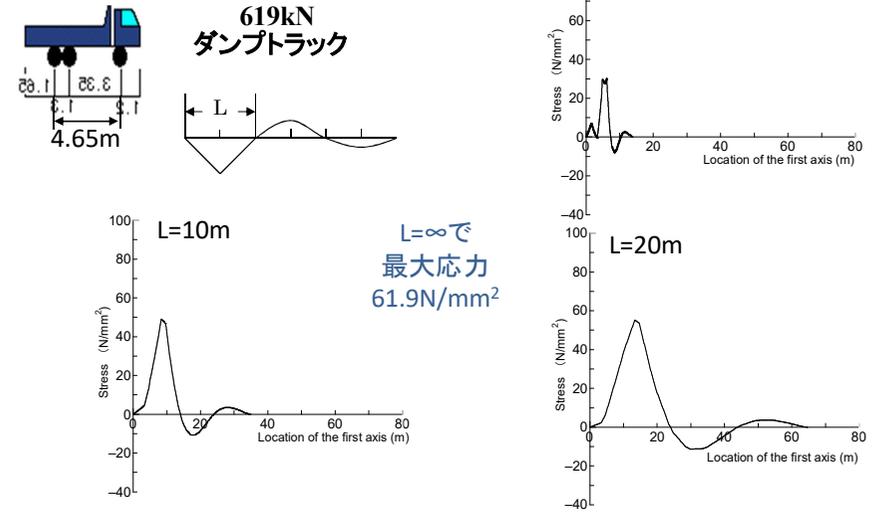
## 影響線の形状・寸法(これによって車両走行による応力変動波形が異なる)

41



## 応力変動(単軸荷重であれば影響線形状のまま)

42

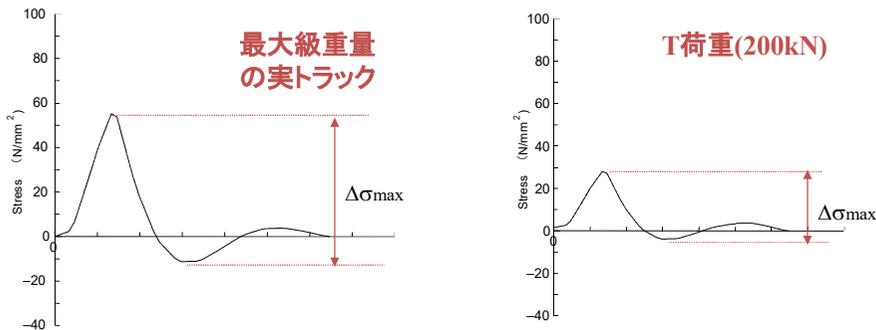


## T 荷重補正係数の定義

43

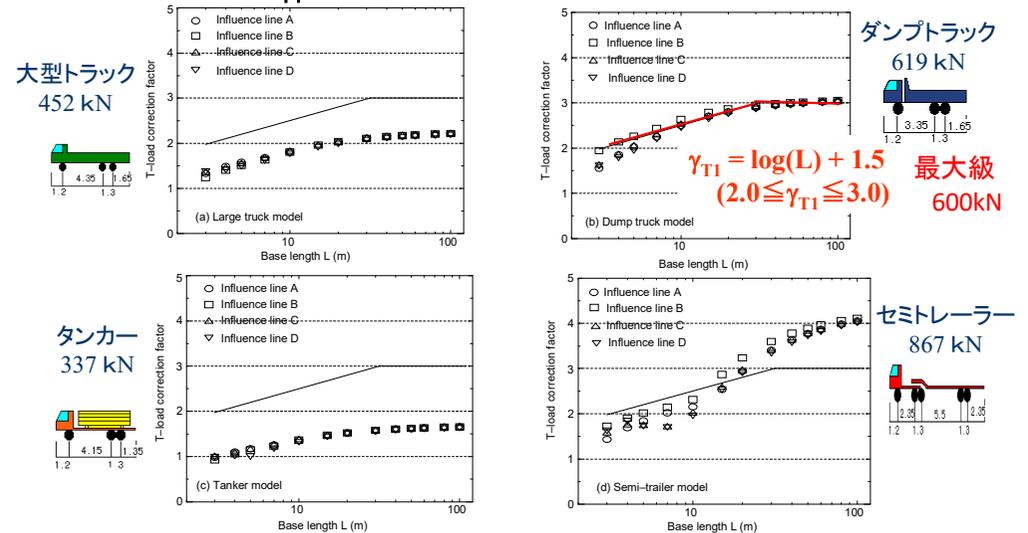
T 荷重補正係数 =  $\frac{\text{最大級重量の実トラックによる最大応力範囲}}{\text{T 荷重 (200kN) による最大応力範囲}}$

疲労限照査



## T 荷重補正係数 $\gamma_{T1}$ と基線長の関係

44



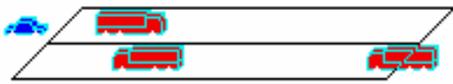
# 同時載荷係数

$\sqrt[3]{\frac{\text{モンテカルロ法でシミュレートした交通荷重による疲労損傷度}}{\text{同じ交通条件で同時載荷がない場合の疲労損傷度}}}$

疲労損傷度 =  $\sum (\Delta\sigma_i^3 \cdot n_i)$

## モンテカルロシミュレーションの条件

- 2車線道路橋 (対面交通、同方向)
- 1車線当たりの交通量: 500 ~ 2500 台/時間
- 車速: 50 ~ 100km/hr

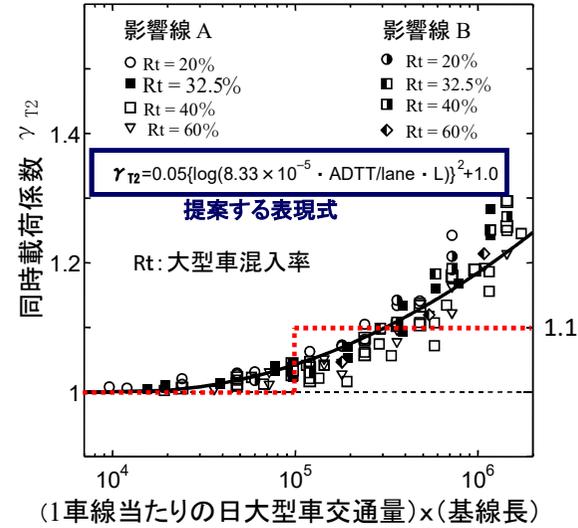


同時載荷係数の支配因子

橋上に何台の車が同時に乗るか  
特に大型車

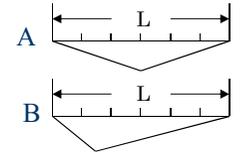
大型車交通量 × 基線長

# 同時載荷係数の表現式 (影響線 A, B)



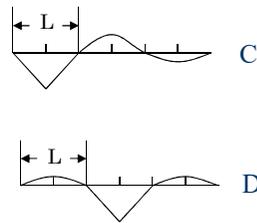
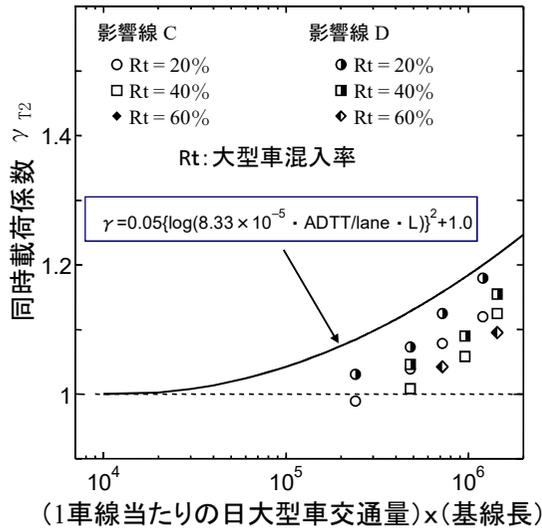
同時載荷係数 $\gamma_{T2}$		
ADTT	L	
	~50m	50m~
~2000	1.0	1.0
2000~	1.0	1.1

影響線の基線長 L



同時載荷係数: 大  
基線長が長い  
大型車交通量が多い

# 同時載荷係数 (影響線 C, D)



交番する影響線  
同時載荷係数  $\gamma_{T2}$   
1.0

# 頻度補正係数

疲労設計荷重の重量 (T-荷重 (200kN) の3倍 600kN)

疲労設計荷重は、設計供用期間内の最大級の応力範囲が生じる重量となるように設定されている。

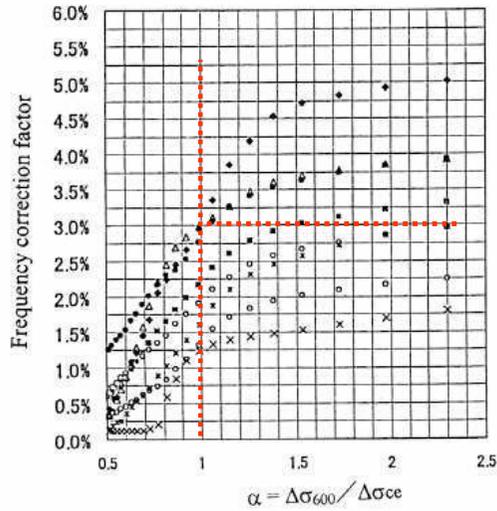
多くのトラックの重量は、それほど重くない

疲労設計荷重の頻度を大型車交通量とすれば、疲労照査は過度に安全なものとなる。

頻度補正係数

疲労設計荷重の頻度と大型車の走行頻度の比  
(同じ疲労損傷度を与える)

頻度補正係数 (標準的には 0.03) 路線・場所によって異なる



- No.6 (1992)
- No.357 (1987)
- △ No.4 (1987)
- × No.45 (1987)
- No.17 (1984)
- No.357 (1984)
- No.357 (1992)
- average

T荷重  
200 kN

T荷重補正係数を  
乗じた荷重  
600 kN

$(200/600)^{1/3}$   
= 0.027

疲労設計荷重

T 荷重 (単軸荷重、200kN)

重量の補正

重量 = 200kN x  $\gamma_T$  x (1 +  $i_f$ )

$\gamma_T$ : 活荷重補正係数 (=  $\gamma_{T1}$  x  $\gamma_{T2}$ )

$\gamma_{T1}$ : T荷重補正係数 (=  $\log(L) + 1.5$ ,  $2.0 \leq \gamma_{T1} \leq 3.0$ )

L: 影響線の基線長 (m)

$\gamma_{T2}$ : 同時載荷係数

1車線あたりのADTT	基線長	
	~40m	40m~
~2500	1.0	1.0
2500~	1.0	1.1

$i_f$ : 衝撃係数 断面設計に用いられる衝撃係数の半分

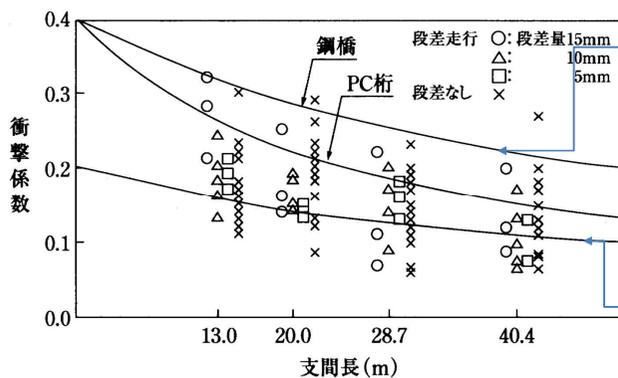
頻度補正係数 = 0.03

疲労設計荷重の頻度 = 0.03 x (大型車交通量)

衝撃係数

断面設計に用いられる衝撃係数  
 鋼橋.....  $\frac{20}{50+L}$   
 プレストレストコンクリート橋.....  $\frac{10}{25+L}$

最大応力を対象

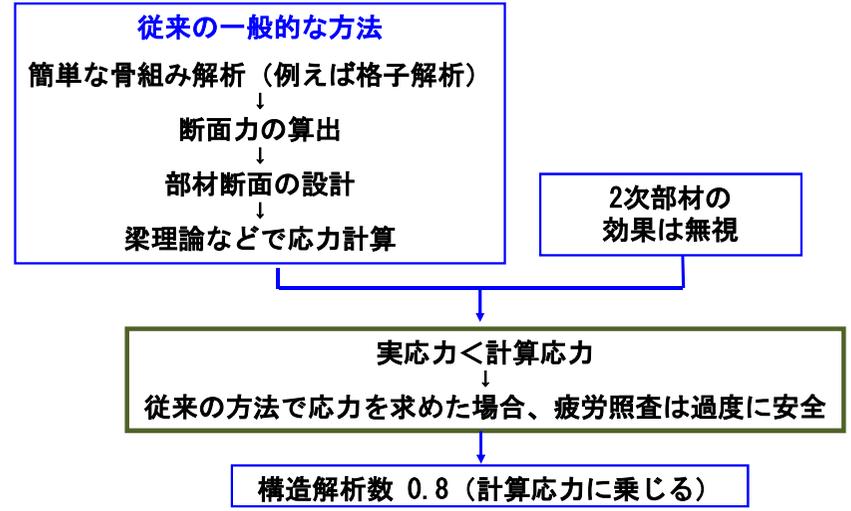


断面設計用の  
衝撃係数

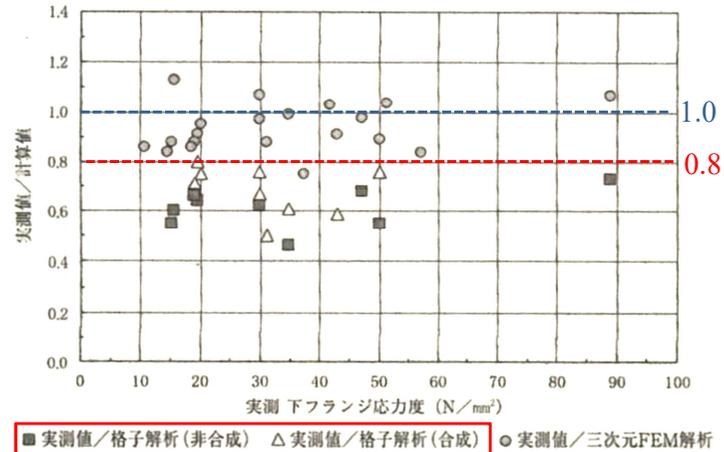
疲労設計 (断面設計の半分)  
最大応力ではなく  
最大の応力範囲を基準?

疲労設計用の  
衝撃係数

応力計算: 構造解析係数 (0.8)



## 実応力と計算応力の関係



## 実際の応力を求めるための方法

### 有限要素法の利用

(2次部材などを含めて橋梁全体を対象)

- ・有限要素解析ソフトの普及
- ・コンピュータの大容量化、高速化、ダウンサイジング、ローコスト化

### 有限要素解析を用いた場合の問題点

- ・どの程度までモデル化するのか
- ・要素の大きさや種類をどうするか
- ・どの部分の応力を疲労照査に用いるか

Design  
by  
Analysis

## 「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」1993年

## 「鋼道路橋の疲労設計指針」2002年

2つの指針に 追加したいこと、変更したいこと  
その後考えたこと

- ・目次の変更
- ・溶接法の主流が変化(手溶接からCO<sub>2</sub>溶接) 疲労強度等級の見直し
- ・平均応力(応力比)と残留応力の影響
- ・疲労強度に対する鋼材の静的強度の影響
- ・継手ごとの板厚効果の見直し
- ・止端仕上げの品質と効果の明確化
- ・組み合わせ応力下の疲労照査法の充実

## 改定委員会・委員

委員長	森 猛(法政大学)	
副委員長	大沢 直樹(大阪大学)	舘石 和雄(名古屋大学)
幹事	貝沼 重信(九州大学)	
委員	内田 大介(三井造船)	織田 安朝(テス)
	桑野 忠生(首都高速道路)	佐々木 哲也(労働安全衛生総合研究所)
	杉本 一郎(鉄道総研)	蔦森 正憲(IHI運搬機械)
	仁瓶 寛太(川重テクノロジー)	野瀬 哲郎(新日本製鐵)
	早川 正夫(物質・材料研究機構)	福岡 哲二(三井造船)
	増田 浩志(宇都宮大)	南 邦明(鉄道運輸機構)
	村越 潤(土木研究所)	山本 規雄(日本海事協会)

# 目次の変更

1993年度版

2012年度版

- 1. 適用範囲
- 2. 用語および記号
- 3. 材料, 接合方法および要求品質

- 1. 総則

- 4. 疲労強度と継手分類
- 5. 荷重および応力範囲頻度分布
- 6. 疲労照査

- 2. 疲労設計荷重
- 3. 公称応力を用いた疲労照査

- 7. ホットスポット応力による疲労照査
- 8. 維持管理

- 4. ホットスポット応力を用いた疲労照査
- 5. 疲労き裂進展解析を用いた疲労照査
- 6. 既設鋼構造物の疲労照査と点検・診断・対策

# 溶接方法・材料による疲労強度の相違

## 手溶接(溶接棒)

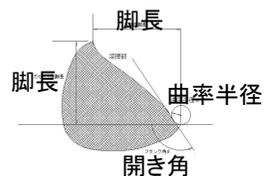
**低水素系:** 溶接部の信頼性が高い、溶接割れの生じやすい厚板の溶接に使用。溶接形状が凸となりやすい。

**イルミナイト系:** 作業性・機械的性質とも良好で、あらゆる構造物に使用。溶接形状は低水素系に比べて滑らか

## 半自動溶接(溶接ワイヤ)CO<sub>2</sub>溶接

**ソリッドワイヤ:** 溶接形状が凸となりやすい。

**フラックス入りワイヤ:** ソリッドワイヤに比べて滑らかな溶接ビード形状。



応力集中	高い	低い
溶接形状	凸	凹
開き角	小さい	大きい
曲率半径	小さい	大きい

応力集中: 高  
↓  
疲労強度: 低

# 1989年版指針(疲労強度)

名大・山田研究室で収集された疲労試験データベース+川崎製鉄データに基づいて各溶接継手の疲労強度等級を設定

1990年ころ

溶接方法の主流が被覆アーク溶接(手溶接)からCO<sub>2</sub>溶接に変更

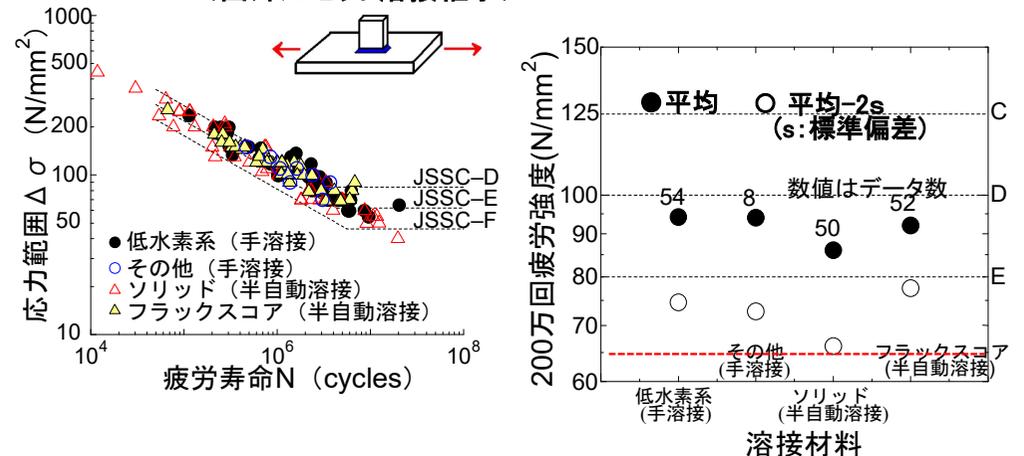
疲労強度は同じ?

CO<sub>2</sub>溶接の方が溶接形状がよく、疲労強度が高いのではないかな?

旧データベース+1986年以降の疲労試験データを収集(2007年まで)  
合計: 10,224データ

# 溶接材料の影響

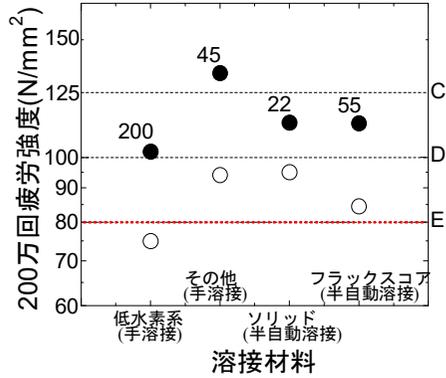
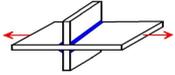
## <面外ガセット溶接継手>



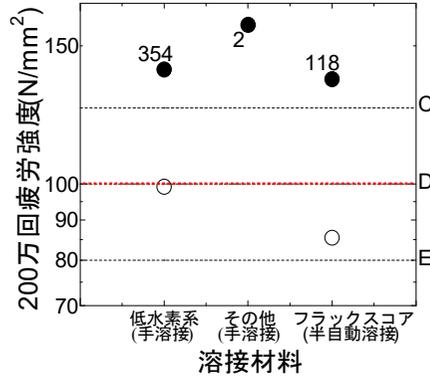
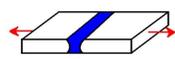
## 溶接材料の影響

61

### <荷重非伝達型十字溶接継手>



### <横突合せ溶接継手>



## 溶接材料の影響

データ整理からは疲労強度に対する溶接材料の影響は認められなかった

大山鳴動してねずみ0匹  
とても残念

今後の期待

データの取捨・選択  
今後の成果に期待  
(もう一度データ収集・整理)  
(2008~現在?)

62

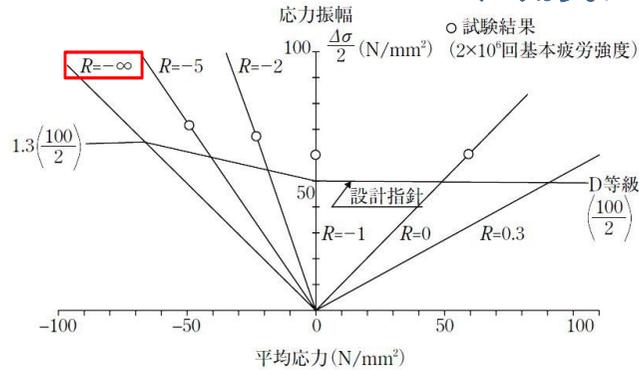
## 平均応力の影響: 非常に高い引張残留応力を有する継手の試験結果

63

変更なし

→  $R = -\infty$  で30%増し

本州四国連絡橋関連の実験  
データは少ない

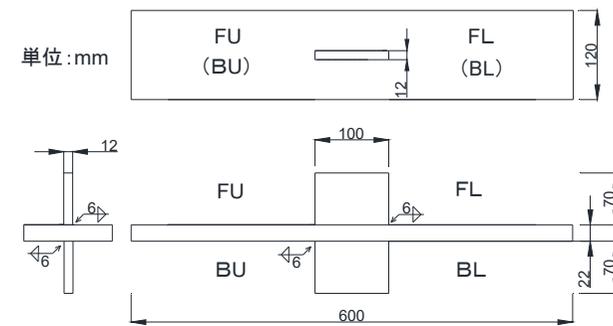


圧縮繰返し応力での疲労挙動?

## 圧縮繰返し応力下の疲労挙動 (残留応力と応力比の影響)

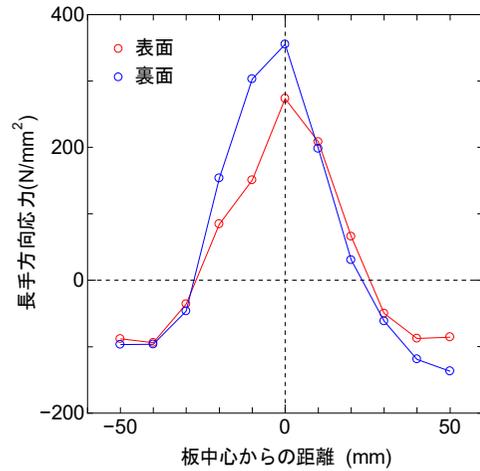
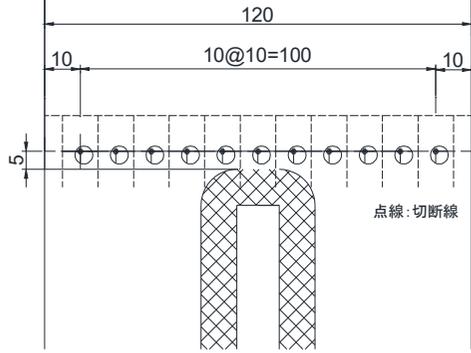
64

軸方向力(面外ガセット溶接継手: 溶接のまま) 鋼材: SM490

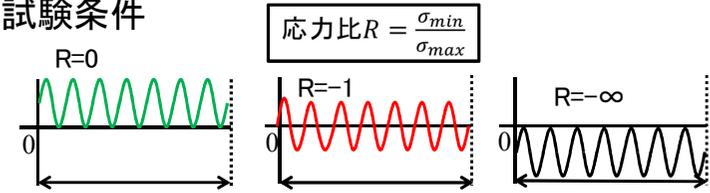


# 試験体の溶接残留応力

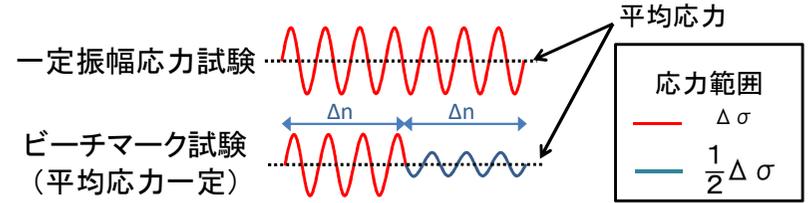
ひずみゲージ切断法  
で溶接残留応力を測定



# 疲労試験条件



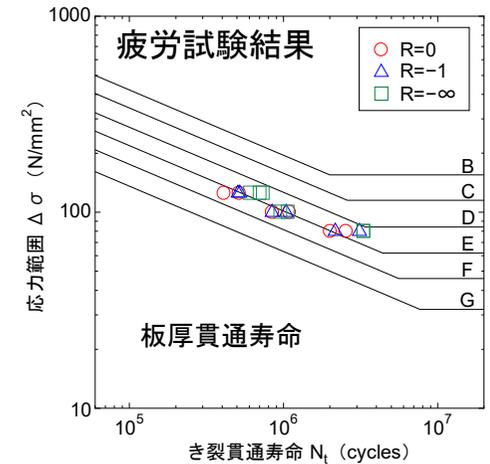
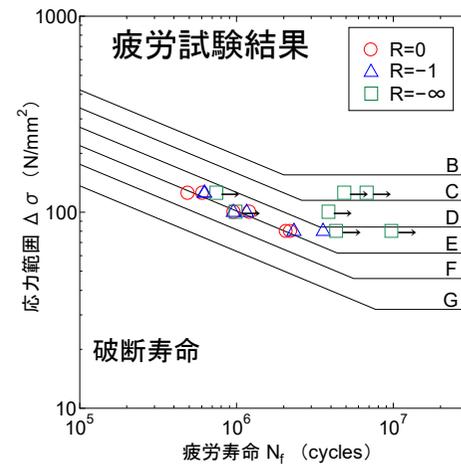
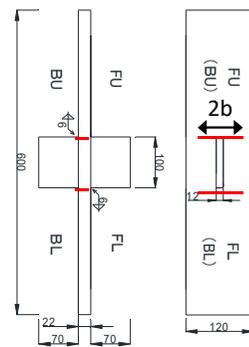
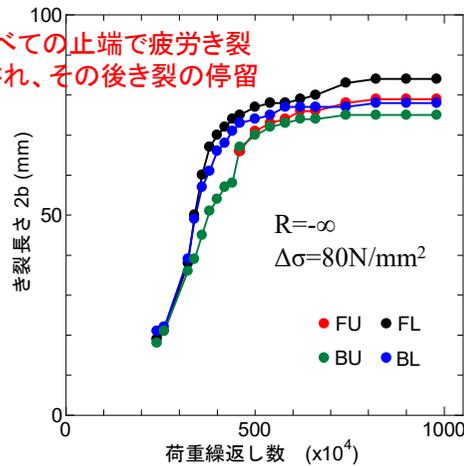
応力範囲  $\Delta\sigma = 80\text{N/mm}^2, 100\text{N/mm}^2, 125\text{N/mm}^2$



$\Delta\sigma$  80N/mm<sup>2</sup> ( $\Delta n=30$ 万回)、100N/mm<sup>2</sup> (15万回)、125N/mm<sup>2</sup> (7.5万回)

# 継手表面での疲労き裂の進展挙動 圧縮繰返し応力 ( $R=-\infty$ )

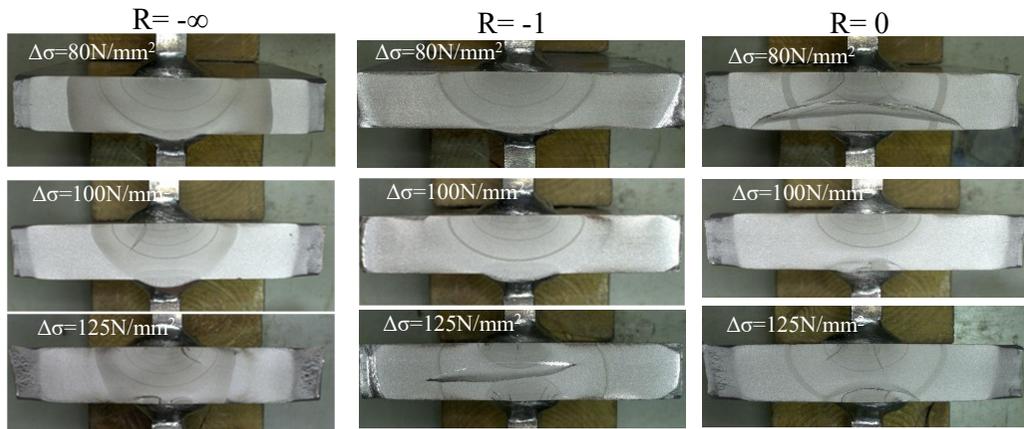
4カ所すべての止端で疲労き裂が検出され、その後き裂の停滞



圧縮繰返し応力  
ではき裂が停滞

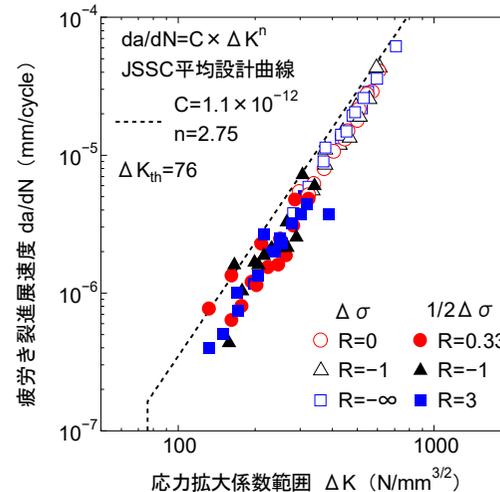


# ビーチマーク試験



ビーチマーク間隔から疲労き裂進展速度を算出

# 深さ方向の疲労き裂進展速度 き裂が板を貫通するまで



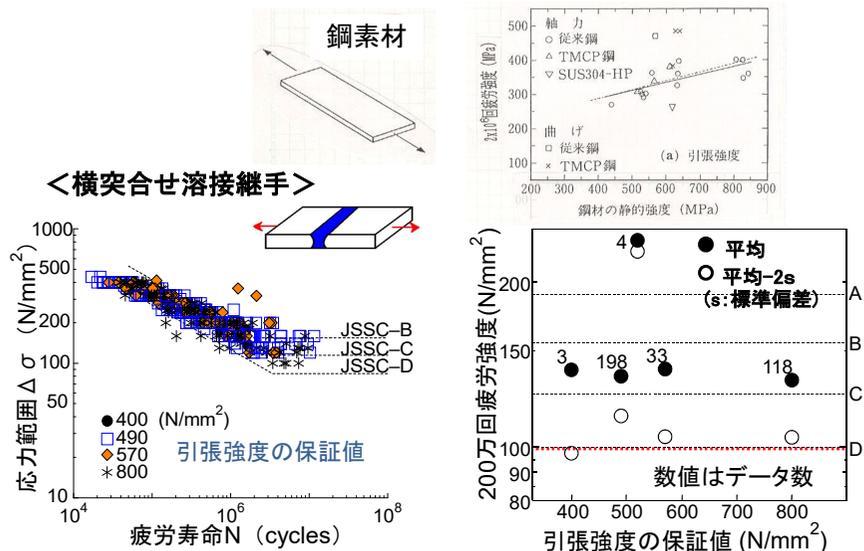
き裂が小さい間(板厚貫通まで)  
応力比の影響: なし

き裂が大きくなると  
応力比の影響: 大

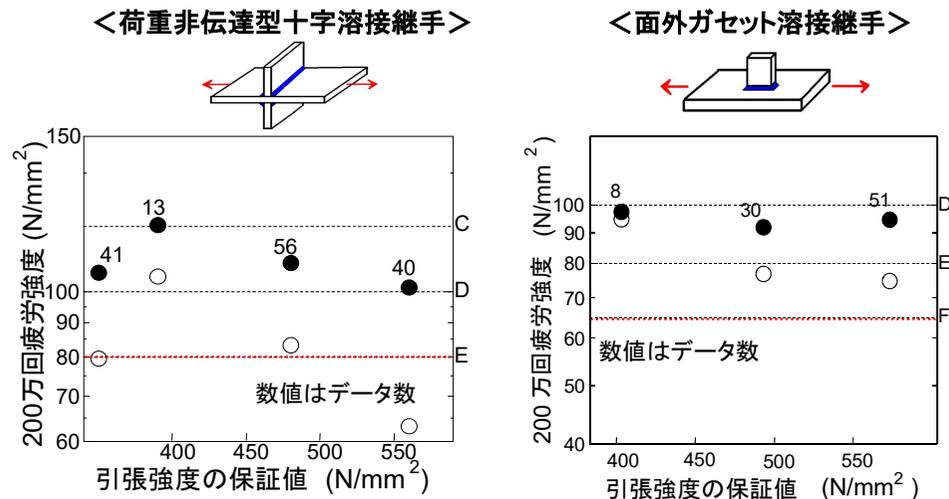
疲労限界状態の定義によって  
影響度は異なる

鋼床版・デッキ進展き裂?  
圧縮+板曲げ

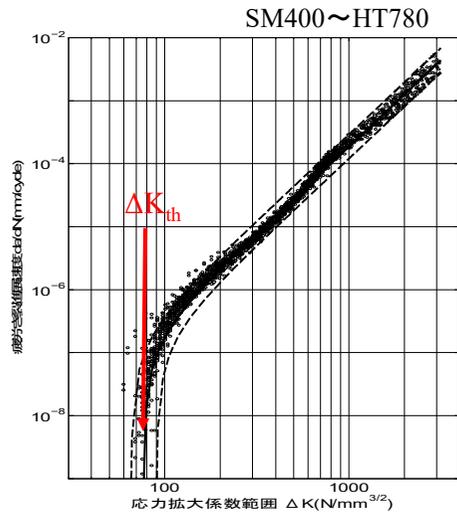
# 疲労強度に対する鋼材の静的強度の影響



# 疲労強度に対する鋼材の静的強度の影響



# 疲労き裂進展速度



da/dN: 疲労き裂進展速度  
1回の繰返し応力で進む長さ

$$da/dN = C(\Delta K^m - \Delta K_{th}^m)$$

$\Delta K_{th}$ : 下限界応力拡大係数範囲

疲労き裂進展速度 da/dN  
が0となるときの  
応力拡大係数範囲

鋼材の影響なし

# 金属の種類が異なったら？

鋼、ステンレス鋼、アルミ合金、銅、.....

疲労き裂進展速度は金属材料のヤング率に反比例する



疲労強度は金属材料のヤング率に比例する

アルミ合金の疲労強度は鋼の0.3~0.4倍程度 (IIW指針)

亜鉛	108.4 GPa (0.5)
アルミニウム	70.3 GPa (0.3)
鉄(鋼)	201-216 GPa (1.0)
銅	129.8 GPa (0.6)

疲労強度: ひずみ範囲  
進展速度: ひずみ拡大係数範囲  
 $\Delta K/E$

# き裂発生寿命

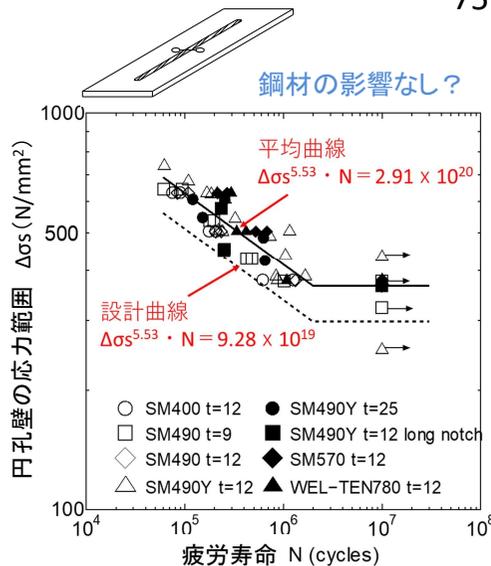
静的強度の影響あり  
素材ではき裂発生寿命の割合が高い  
 $\Delta\sigma$ -N関係の傾きが緩やか(>5)

# き裂進展寿命

静的強度の影響なし  
溶接継手ではき裂進展寿命の割合が高い  
 $\Delta\sigma$ -N関係の傾きが急(≒3)

$\Delta\sigma$ -N関係には応力比・残留応力も影響

????????



鋼材の影響なし?

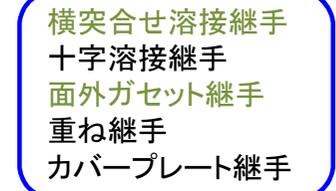
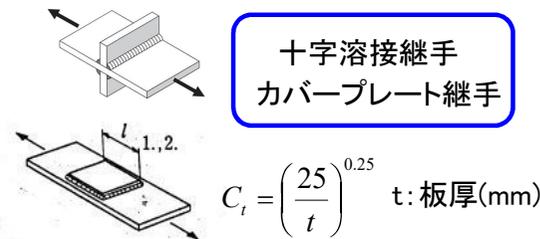
# 疲労強度に対する継手板厚の影響

「JBSSC指針」では.....

「鋼道路橋の疲労設計指針」では.....

板厚25mmを超える未処理の

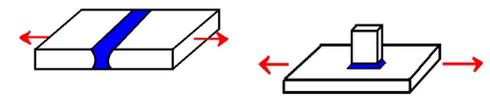
板厚25mmを超える未処理の



板厚補正指数: 0.25

$$C_t = \left(\frac{25}{t}\right)^{0.25} \quad t: \text{板厚(mm)}$$

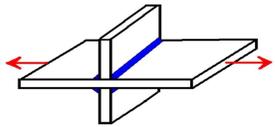
$$\Delta\sigma_{200}: 200\text{万回疲労強度}$$



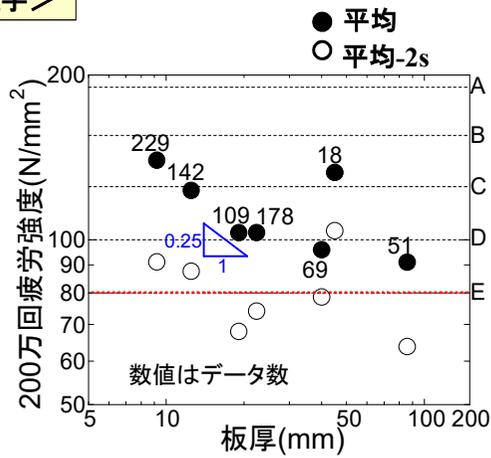
仕上げたら板厚の影響なし

# 板厚の影響

## <荷重非伝達型十字溶接継手>

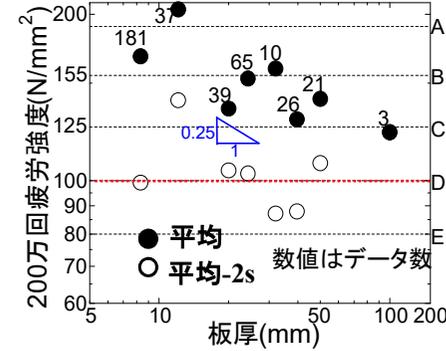


疲労試験結果

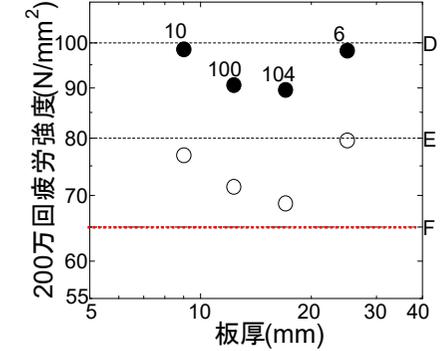
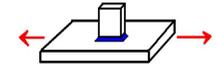


# 板厚の影響

## <横突合せ溶接継手>



## <面外ガセット溶接継手>



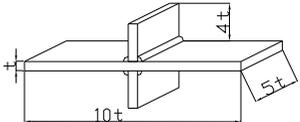
# 板厚の影響 ~応力解析(溶接止端の応力集中係数)~

解析対象

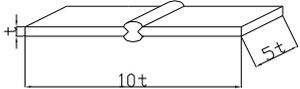
板厚 t = 9, 12, 18, 24, 35, 54, 75mm

疲労強度は  
応力集中係数  $\alpha$   
に反比例する

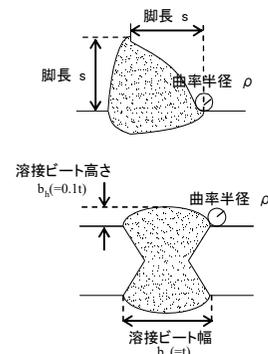
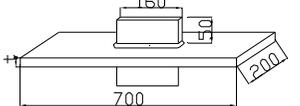
## <荷重非伝達型十字溶接継手>



## <横突合せ溶接継手>



## <面外ガセット溶接継手>

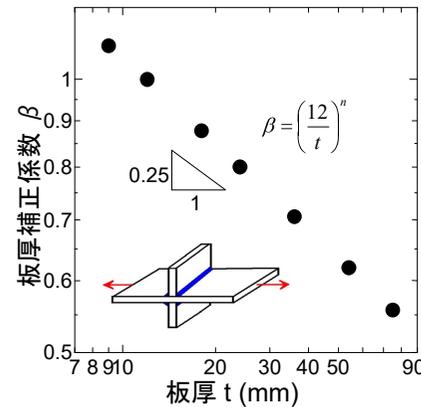


※溶接のままを想定し  $\rho=1\text{mm}$  とする

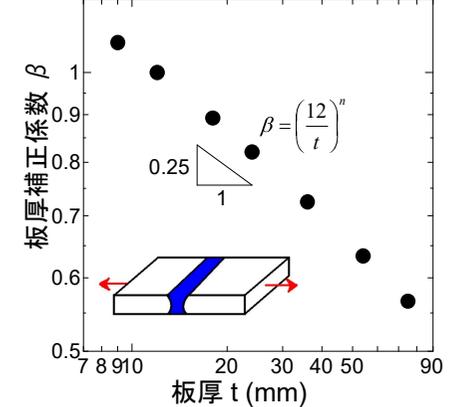
# 板厚補正係数と板厚の関係

板厚補正係数  $\beta = \left( \frac{\alpha_{12}}{\alpha_t} \right)$   
t=12mmを基準  $\alpha$ : 応力集中係数

## <荷重非伝達型十字溶接継手>

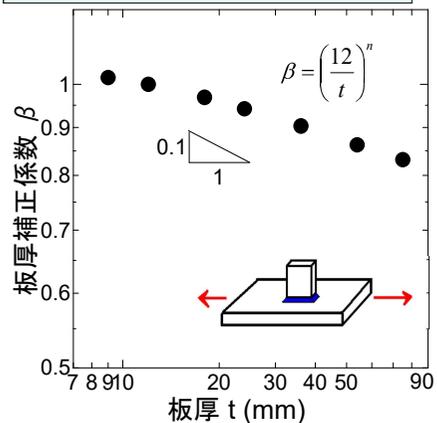


## <横突合せ溶接継手>



＜面外ガセット溶接継手＞

板厚と板厚補正係数の関係



板厚補正係数 :  $\beta = \left( \frac{\alpha_{12}}{\alpha_t} \right)$

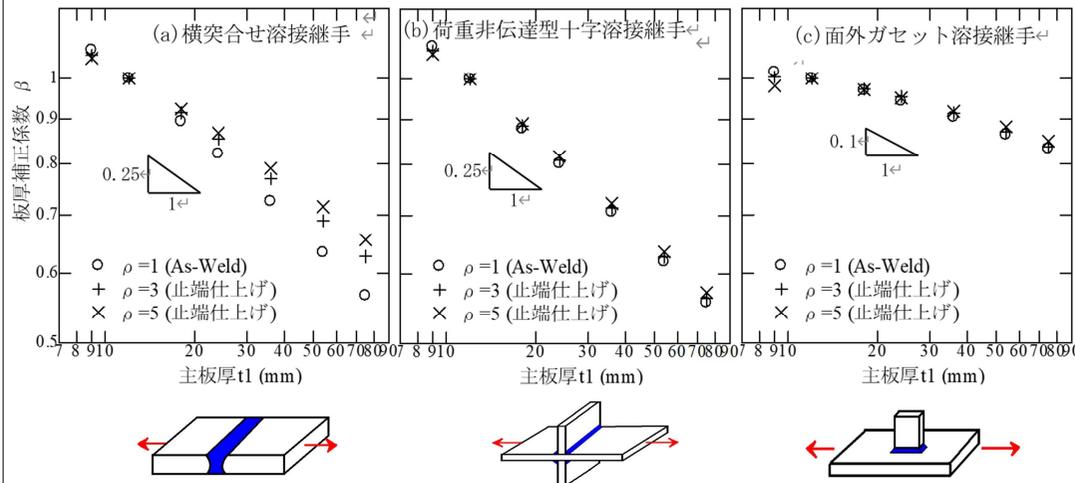
板厚補正指数  $n=0.1$   
基準とする板厚  $t=25\text{mm}$

$t=25\text{mm}$  で  $\beta=1.0$  とすれば  
 $t=75\text{mm}$  で  $\beta=0.9$

板厚補正:なし

日本造船協会、IIW指針  
0.1としている

止端を仕上げた場合の板厚効果  
溶接のまま  $\rho=1.0\text{mm}$  止端仕上げ  $\rho=3.0, 5.0\text{mm}$



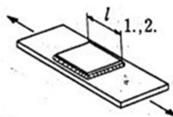
疲労強度に対する板厚の影響を考慮する継手

実験あるいは解析によって影響が確認された継手  
止端仕上げした場合も板厚の影響

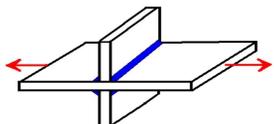
横突合せ溶接継手



カバープレート継手



十字溶接継手



板厚の1/4乗(0.25)乗に  
反比例して強度低下

荷重伝達型  
十字すみ肉溶接継手  
ルート破壊

板厚の1/6乗に  
反比例して強度低下

疲労試験と  
疲労き裂進展解析  
により確認

疲労強度改善(止端仕上げの効果)

JSSC指針1993: 止端形状改善(バークライナー、TIG処理、ピーニング)  
で1ランクアップ

鋼道路橋の疲労設計指針: 同上

JSSC指針2012: 止端形状改善  
(バークライナー、TIG処理、...)  
1ランクアップ  
止端の品質を規定

UITを行った止端の例



ピーニングは含めない⇒圧縮残留応力(形状改善効果?)  
残留応力の影響は構造物の使用状況(応力比)によって異なる

## グラインダーの種類

85

### ディスクグラインダ



止端を仕上げにくい、応力直角方向にきずがつきやすい

### バークラインダ



## バークラインダ

86

### エアース



軽量、回転数をコントロールできない

### 電動式



比較的重い、回転数をコントロールしやすい

## バークラインダの刃先

87



つくし形



砲弾形



とんがり形



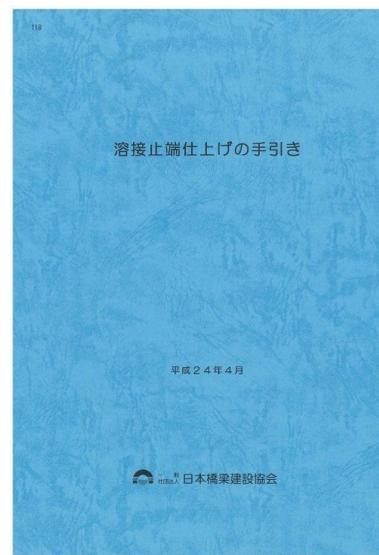
球形



ダイヤモンドカット  
(マスターカット)



スパイラルカット



- ・止端仕上げが適用される継手
- ・仕上げ工具
- ・止端仕上げ方法  
仕上げ範囲、仕上げ深さ  
止端仕上げの注意事項
- ・品質確認
- ・作業者の技量
- ・バックグラウンドデータ



施工便覧  
道路橋仕方書

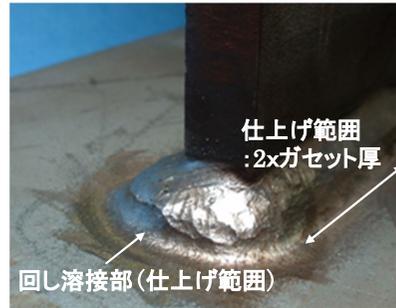
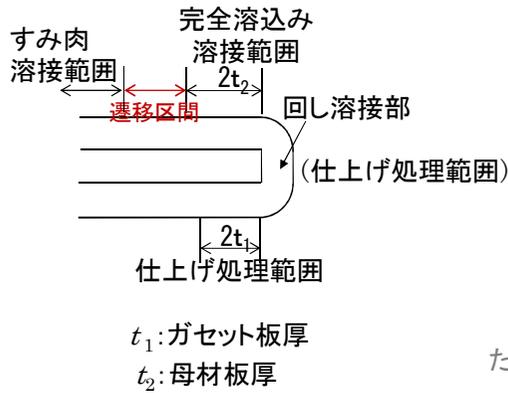
88

## 止端半径、削り込み深さと仕上げ範囲 (JSSC指針)

89

止端半径: 3mm以上

最終の止端仕上げはバーグライダーで溶接止端のラインが消えるまで行う



削り込み深さは0.5mm以下とする。  
ただし、主板厚によって変えることも可能

## 仕上げ半径 (止端の曲率半径 $\rho$ ) の影響

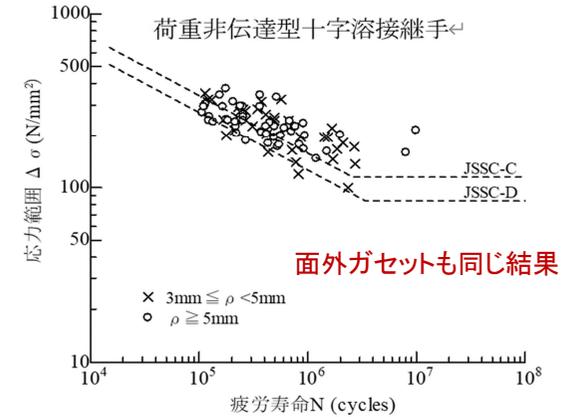
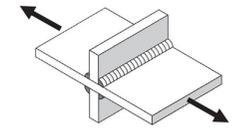
90

止端曲率半径  $\rho$  が大きくなるほど  
応力集中係数は低下  
↓  
疲労強度は向上

指針の規定  
 $\rho = 3.0\text{mm}$ 以上で  
強度等級1ランクアップ

$\rho = 5.0\text{mm}$ 以上 ?

再検討



## 組み合わせ応力の取り扱い

91

JSSC指針1993: 直応力とせん断応力の個々について照査  
直応力とせん断応力が同時に作用する場合は主応力

JSSC指針2012: 直応力とせん断応力が同時に作用する場合は主応力

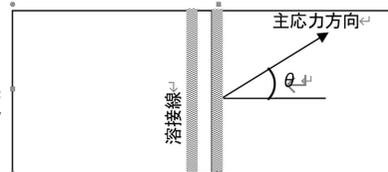
ただし、主応力方向と溶接線直角方向のなす角度が30度以下の場合には、以下の式(3.2)で応力範囲を算出してもよい。その際の疲労強度としては、直応力に対するものを用いる。

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_p \cdot \cos\theta$$

$\Delta\sigma_p$ : 主応力範囲

$\theta$ : 主応力方向と溶接線直角方向のなす角度(ただし、 $\theta \leq 30^\circ$ )

溶接線に直角方向の応力でよい(証拠が必要、疲労試験)

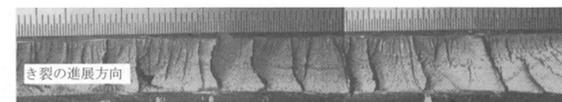
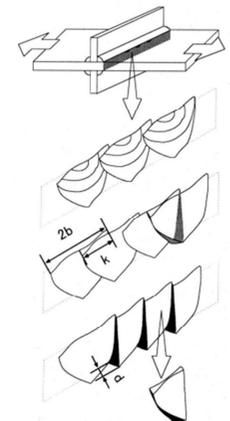
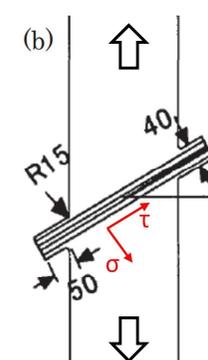
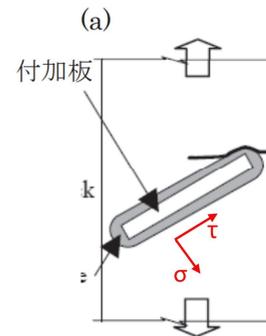


## 組合せ応力下の疲労試験

92

名大の金・山田

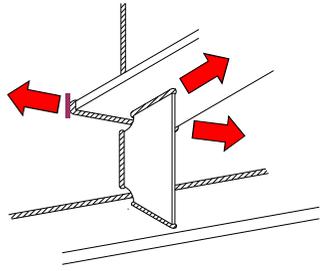
(b)の試験体を用いた検討に基づく



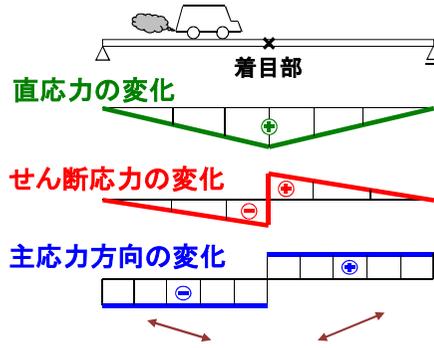
# 主応力方向の変化(主桁・横桁交差部の応力性状の特徴)

93

2軸応力



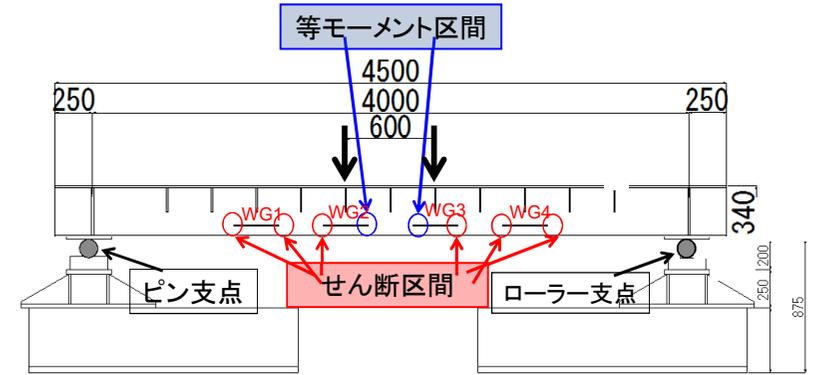
主応力方向の変化



疲労強度の評価方法?

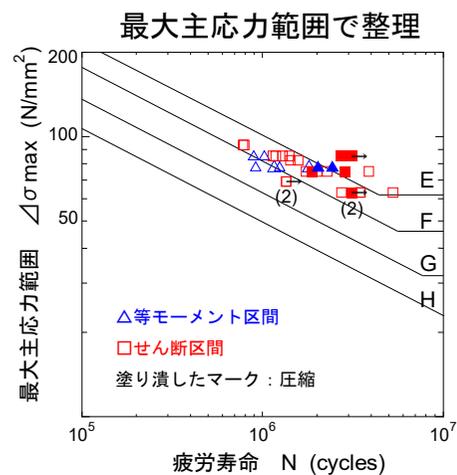
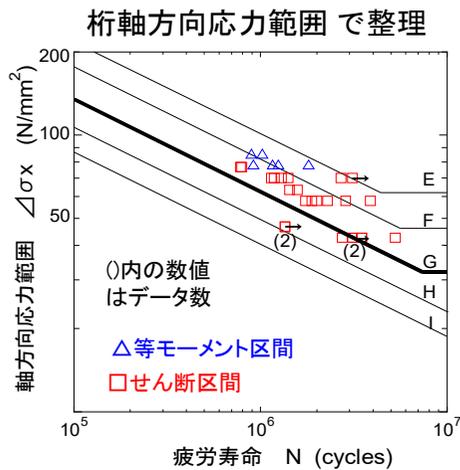
# 定点荷重疲労試験

94



# 定点荷重疲労試験結果 応力範囲と疲労寿命の関係

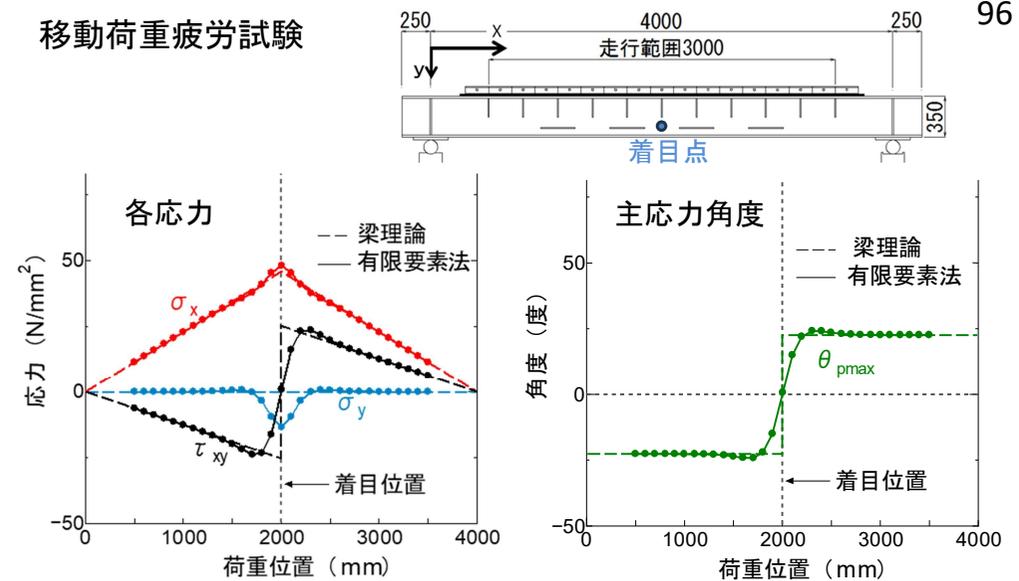
95



疲労寿命:き裂長さが40mm

# 移動荷重疲労試験

96



# 移動荷重疲労試験



土木研究所 輪荷重走行試験機

# き裂進展性状の比較

定点荷重試験

移動荷重試験

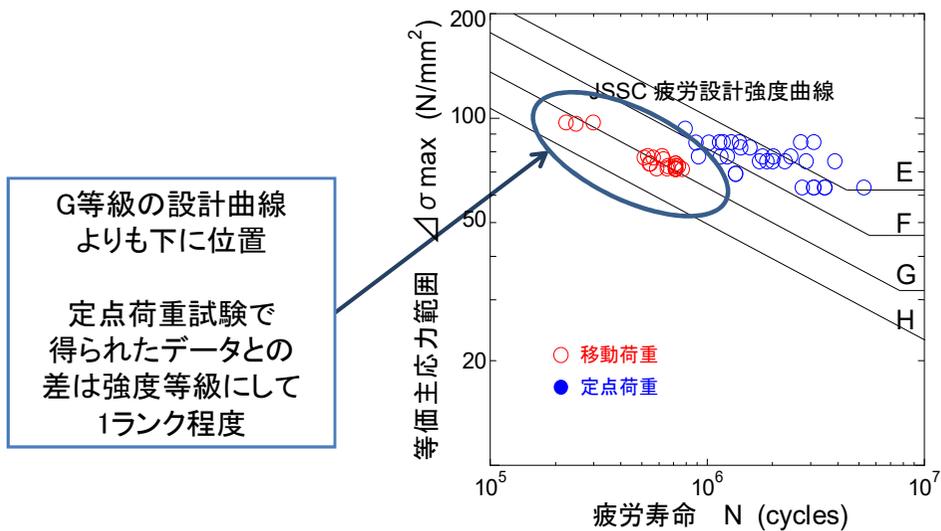
せん断応力反転前の最大主応力方向

せん断応力反転後の最大主応力方向

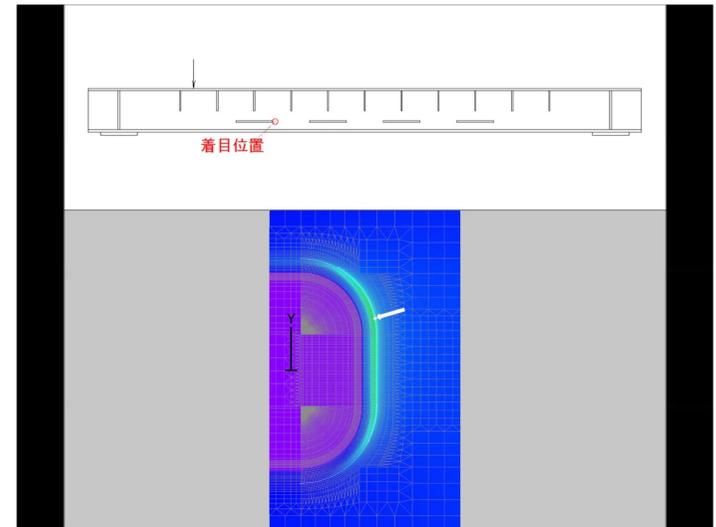
最大主応力方向

・移動荷重ではき裂が止端を巻き込むように進展する  
・止端沿って進展するき裂が長い

# 移動荷重疲労試験と定点荷重疲労試験結果の比較

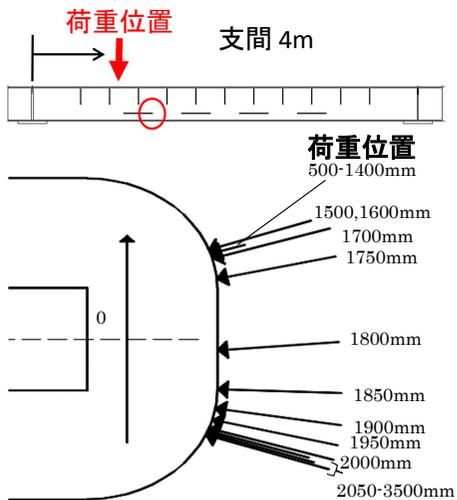


# 溶接止端の応力性状

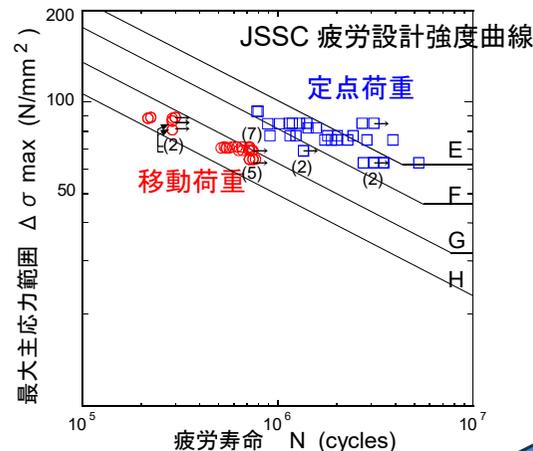


## 移動荷重下で疲労強度が低下する理由

101



主応力角度の  
変化が大きいほど  
最大主応力点が  
変化する  
亀裂発生点  
の候補が増える  
疲労に対して  
弱い位置を探す



主応力方向が変化  
↓  
疲労強度が1~2ランク  
(30%)程度低下する  
主応力方向の変化  
50度

実橋での測定と解析  
・単純鋼断面合成桁橋  
・支間:32m  
主応力方向の変化 17度

床版や横部材を有する実橋で同じように  
主応力方向が変化するか不明である

クレーンガーダー?

102

## 最終講義原稿の最後のスライド

103

### 最近気づいたこと

- ・研究(わからないことをわかるようにすること)が好き
- ・論文にまとめる(行ったことを他人に伝える)ことが好き
- ・学生を含め他人と議論することが好き
- ・多少なりともわかったことを社会に役立てることが好き

## 疲労設計指針

1986年~1993年 鋼構造協会(森:31歳~)  
疲労設計指針改定小委員会(委員長 三木千寿)  
「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」技報堂出版、1993年4月

1997年~2002年 道路協会(42歳~)  
疲労設計WG(主査 三木千寿)  
「鋼道路橋の疲労設計指針」丸善、2002年3月

2006年~2012年 鋼構造協会(51歳~)  
疲労設計指針改定小委員会(委員長 森 猛)  
「鋼構造物の疲労設計指針・同解説 2012年改定版」  
技報堂出版、2012年6月



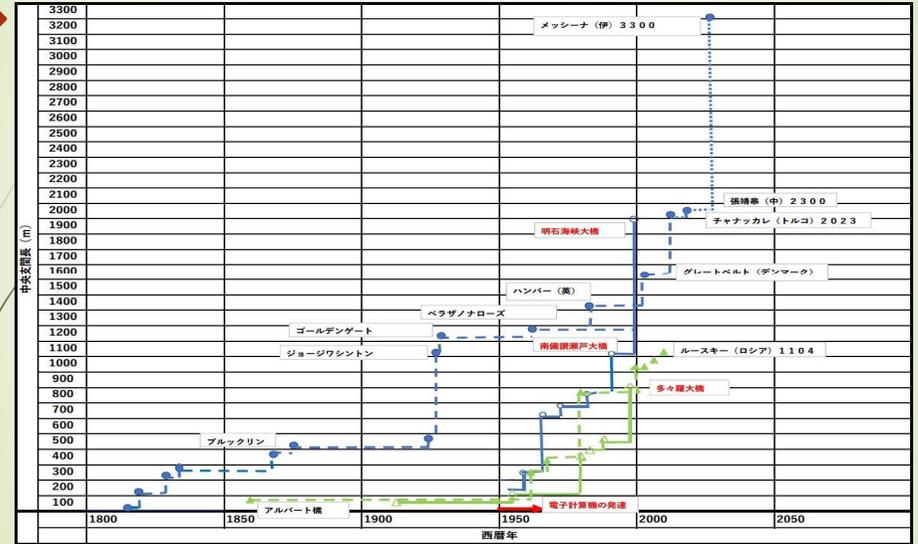
104



# 本四長大橋建設技術の発展 と海外橋梁への技術移転

2023年12月19日

大日本ダイヤコンサルタント(株) 海外事業部  
保田雅彦



チャナッカレ橋Lc=2023 (2022年完成)

メッシーナ橋Lc=3300

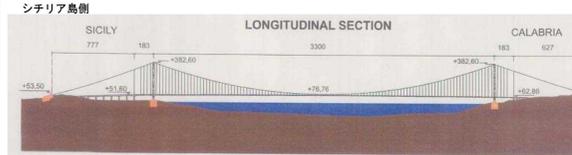


図-1 一般図 (Fig. 1 General View)

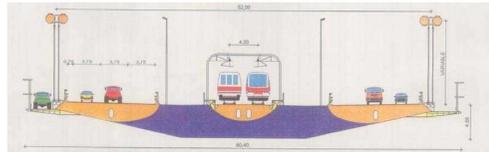


図-2 断面図 (Fig. 2 Cross Section) 図はメッシーナ公団提供

張靖皋大橋Lc=2300 (2028年完成予定)



## 本州四国連絡橋図



## 設計基準の整備

### 本四橋の設計条件の特徴

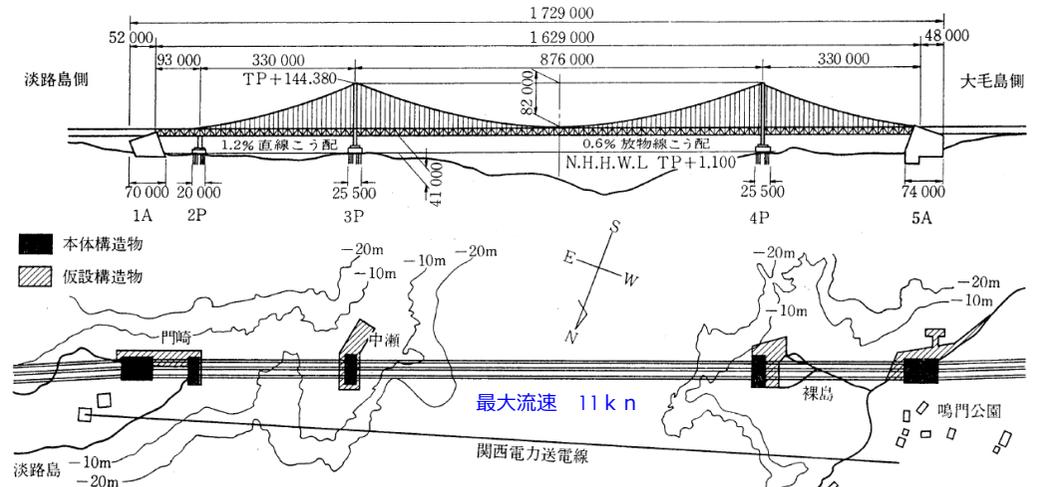
- 1) 長支間橋梁（既往の道示、鉄道標準適用外）
- 2) 道路鉄道併用橋
- 3) 海上、海中橋梁
- 4) 厳しい自然条件
- 5) 短期間での建設（当初は10年以内に三ルート完成）

基準	指針	要領	マニュアル
上部工設計	仮設物設計	耐震設計	ケーブルアンカー設計
下部工設計	吊橋リンク支承構造設計	主塔設計	下路管理路設計
耐震設計	トラス格点構造設計	塔頂補強構造解析	
耐風設計	鉄骨鉄筋コンクリート構造設計	ケーブルバンド設計	
鋼橋等製作		ハンガー設計	
鍛造鋼品製作		鋼床版設計	
鋼橋塗装		鋼床版現場溶接施工	
橋面舗装		風洞試験	
橋梁用マスコンクリート施工		鋼上部構造用鋼材選定	
材料規格		鋼直結軌道、緩衝軌道伸縮装置設計	
		重力式アンカレイジ設計	
		鋼設置ケーソン設計	
		緩衝工設計	
		大型鉄骨鉄筋コンクリート橋脚設計	
		風化花崗岩の支持特性判定	

## 本日の技術開発のご紹介項目

- (1) 吊橋
  1. 海中基礎
  2. ケーブル
  3. 耐風設計
  4. 耐震設計と兵庫県南部地震
- (2) 斜張橋
  1. 櫃石島、岩黒島橋
  2. 生口島、多々羅大橋
- (3) 海外橋梁への技術協力
  1. 中国
  2. 台湾
  3. ベトナム
  4. フィリピン
  5. ミャンマー

## 海中基礎の技術開発（強潮流下） （多柱基礎）



## 大鳴門橋と多柱基礎

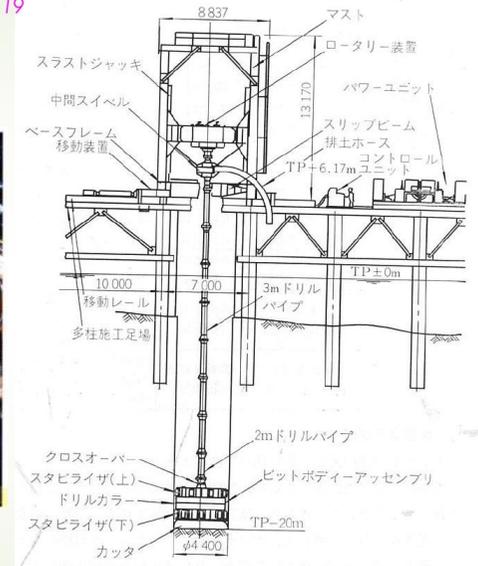
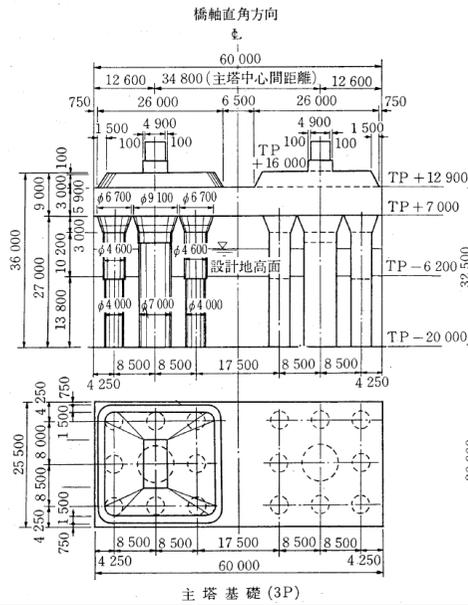
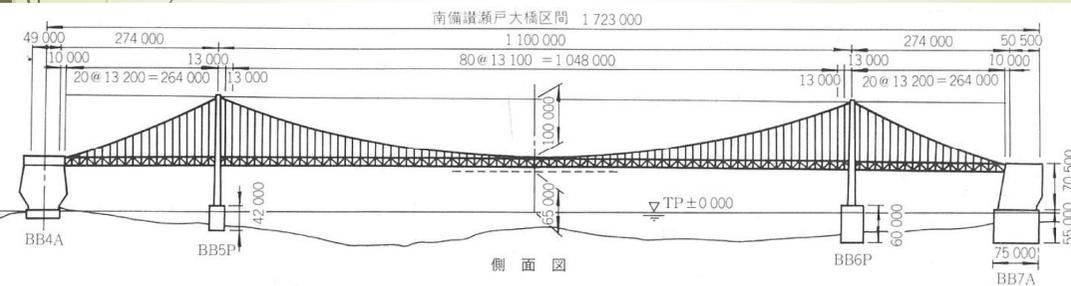


図-3 MD-440ロータリー式掘削機 (三菱・ヒューズ社) の概要

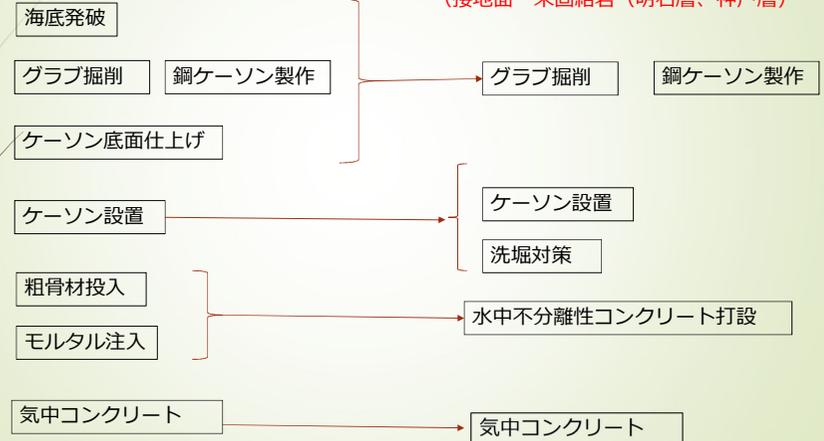
## 南備讃瀬戸大橋



## 設置ケーソン工法

瀬戸大橋の場合 (接地面 花崗岩)

明石海峡大橋の場合  
(接地面 未固結岩 (明石層、神戸層))



### 瀬戸大橋海中基礎の施工法（設置ケーソン工法）



(1) 海底発破



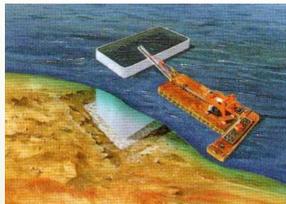
(2) 海底掘削



(3) 底面仕上げ



(4) 鋼ケーソン曳航設置

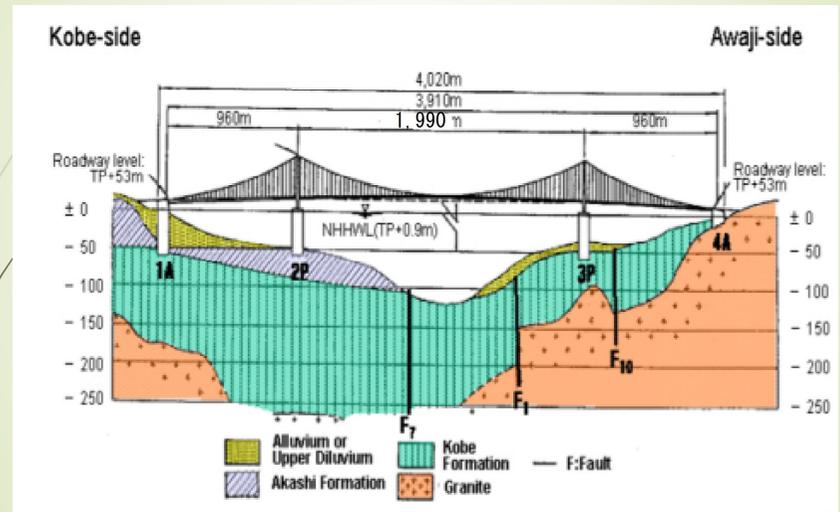


(5) 粗骨材充填



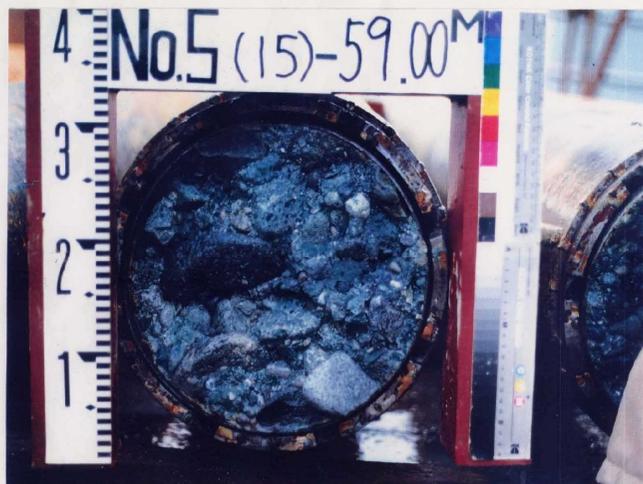
(6) 水中モルタル注入

### 明石海峡大橋



### 明石海峡大橋の基礎

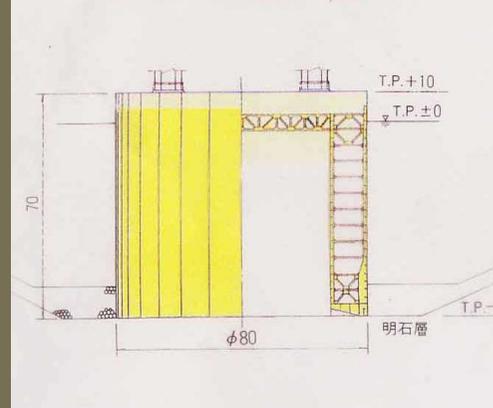
明石層の不攪乱試料採取技術（トリプルチューブサンプラー）



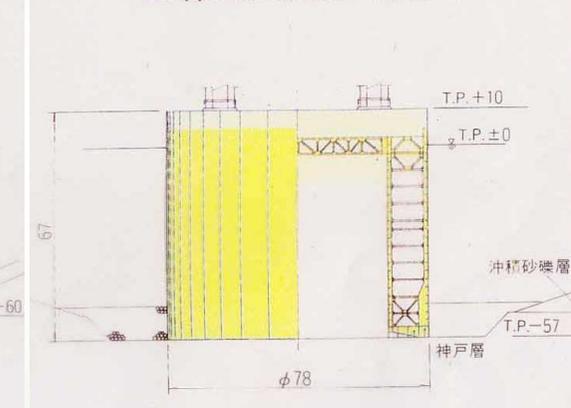
明石層 ボーリングNO.2P-5 59.00m

### 明石海峡大橋の基礎

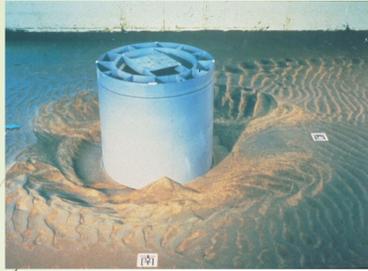
主塔基礎構造図 (2P)



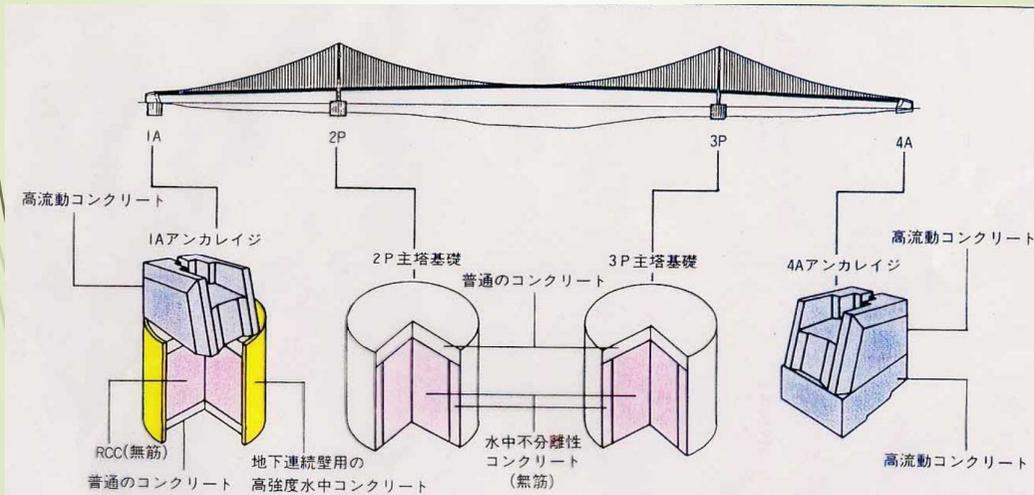
主塔基礎構造図 (3P)



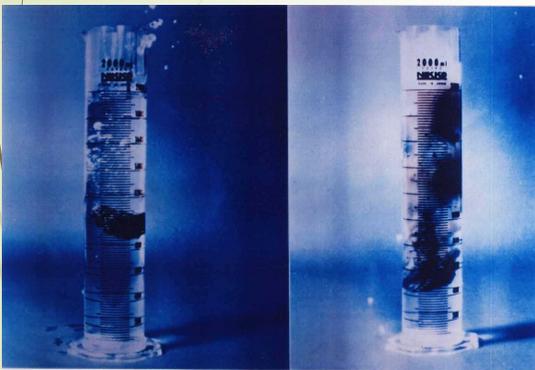
### 洗堀対策



### 明石大橋 各種コンクリートの開発

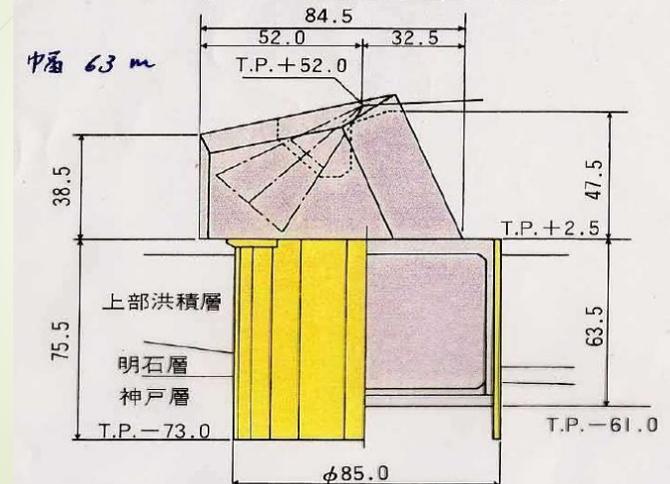


### 水中不分離性コンクリートの開発

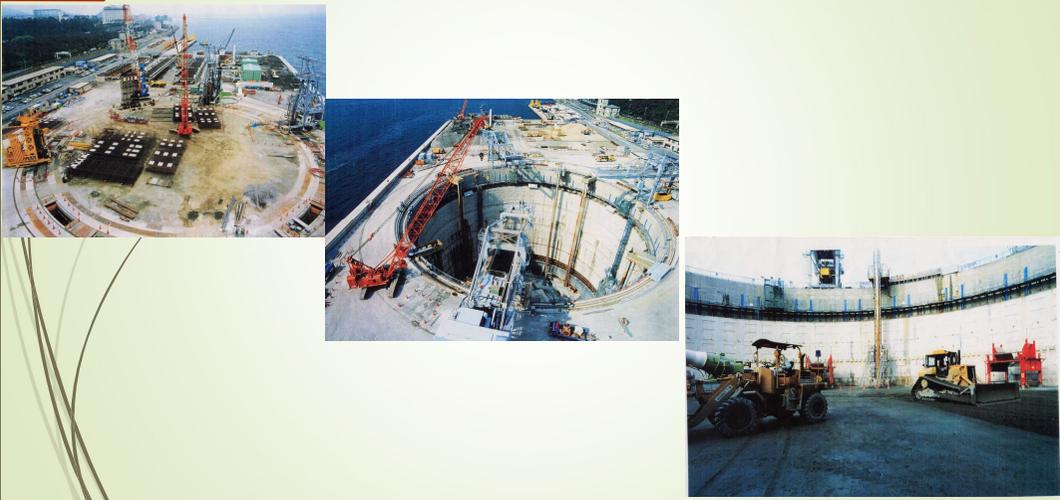


### 明石大橋巨大アンカレイジ地中連壁基礎

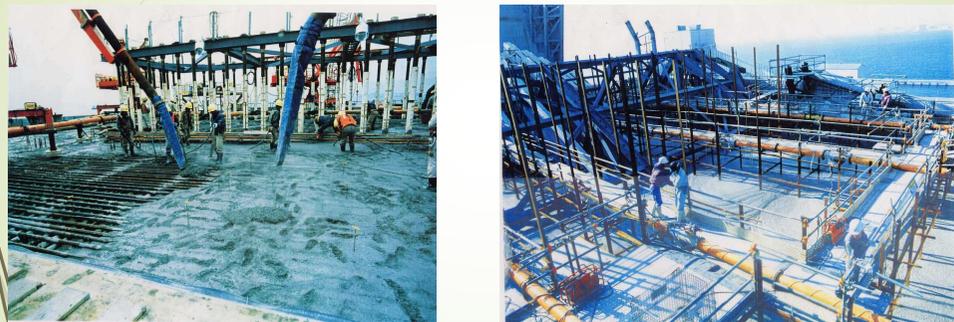
アンカレイジ基礎構造図 (1A)



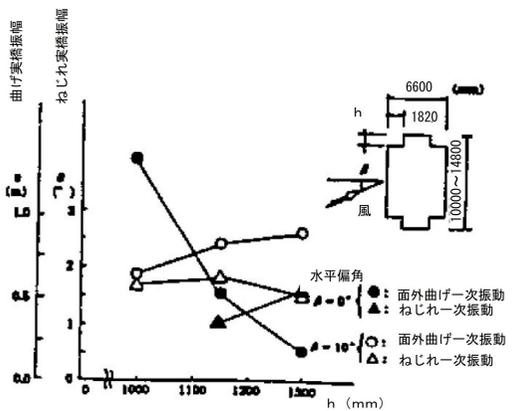
## 逆巻き式地中連壁基礎の施工



## 高流動コンクリートの開発

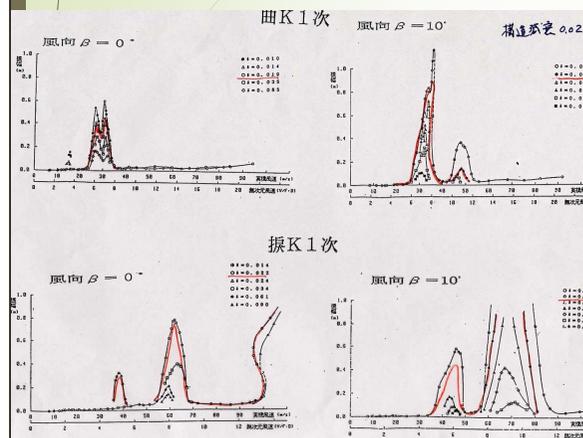


## 主塔に関する技術開発 (完成系の主塔制振装置)

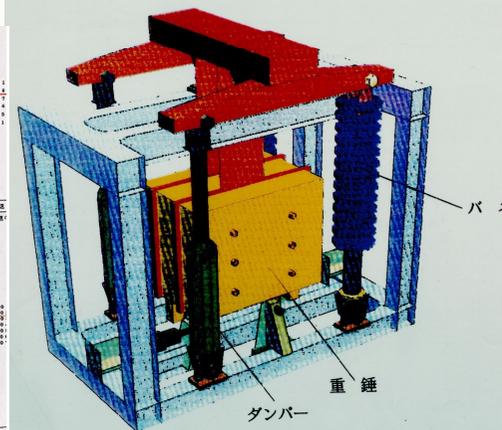


隅切り深さ  $h$  と最大応答振幅の関係

## 主塔に関する技術開発 (完成系の主塔制振装置)

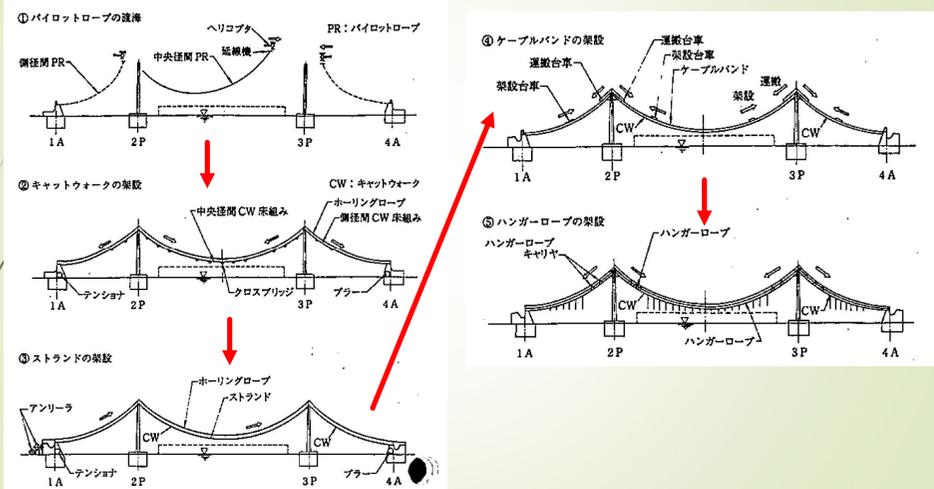


## TMD-1, 2, 3 (単振り子型TMD)





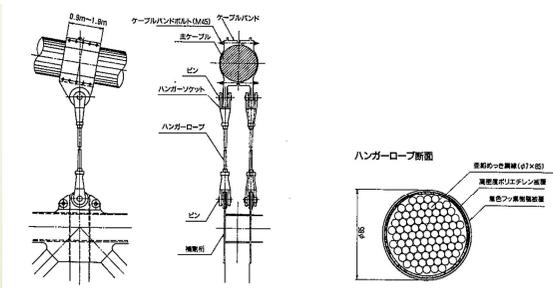
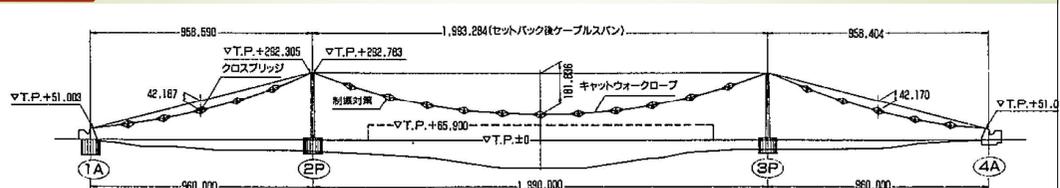
## ケーブルの技術開発 (ケーブルの施工順序)



## パイロットロープの渡海工法



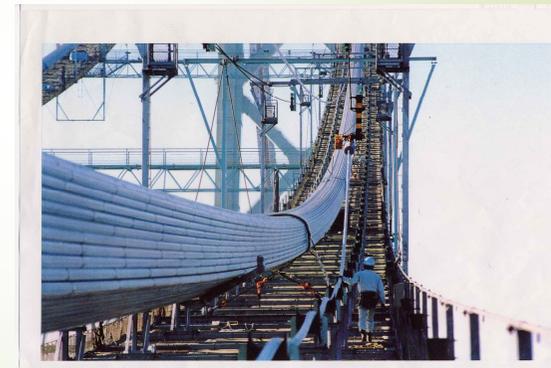
## ケーブル技術の開発 主ケーブル施工法



エアスピニング工法  
(下津井瀬戸大橋)



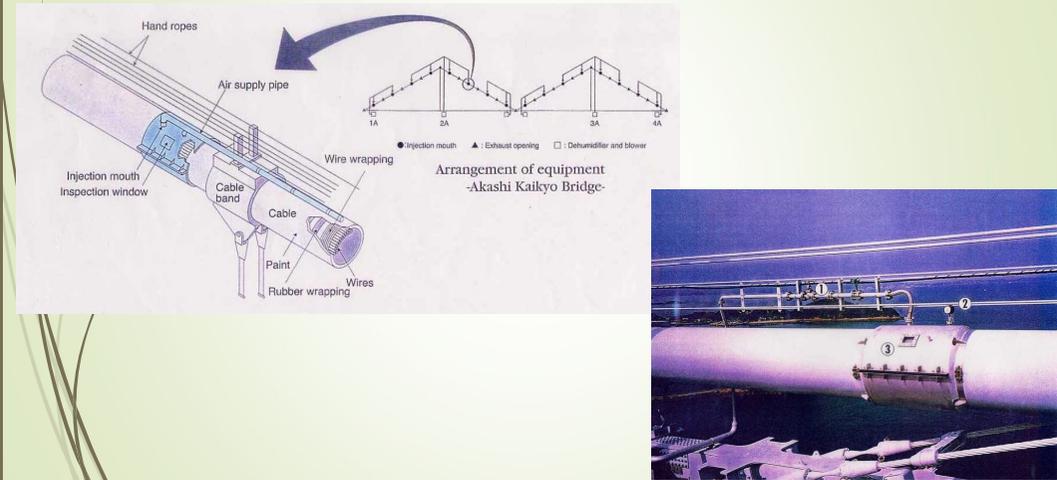
プレハブストランド工法  
(関門、因島、大鳴門、南北備讃、明石大橋)



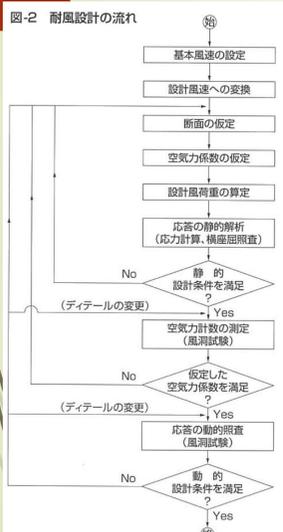
## ケーブル技術の開発 主ケーブルの防食技術



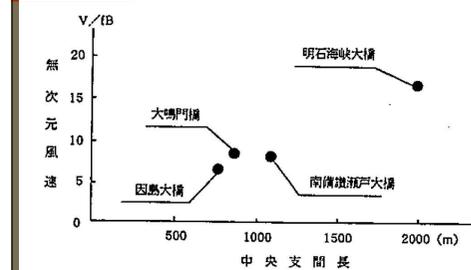
## ケーブル技術の開発 主ケーブルの防食技術



### 耐風設計Flow chart

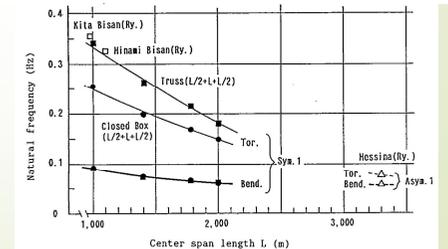


明石大橋での追加事項  
大型風洞試験  
フラッター解析

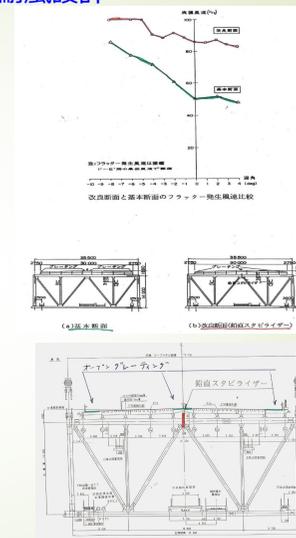
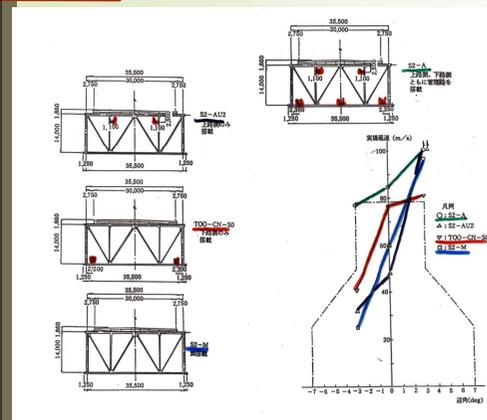
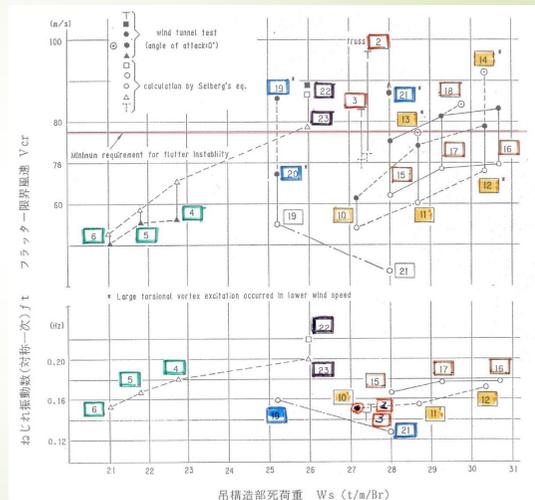
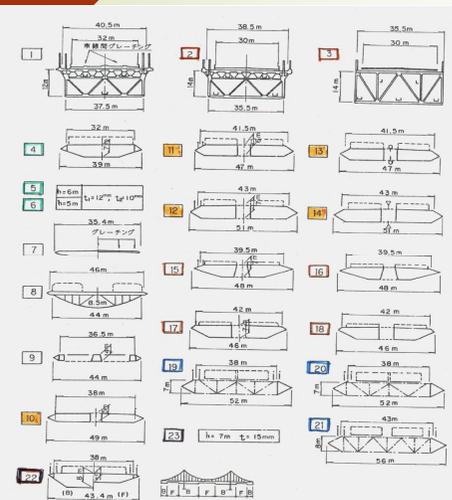


	因島大橋	大鳴門大橋	南備瀬戸大橋	明石海峡大橋
主径間長 $L$ (ケーブル支間)	770m	876m	1,100m	1,990m
フラッター限界風速 $V_{cr}$	65.9m/sec	87.6m/sec	79.5m/sec	78.0m/sec
移動係数 $[w_j/f\theta]$ たわみ係数	0,374	0,308	0,324	0,135
代表長 $B$ (主橋幅)	26,0m	34,0m	30,0m	35,5m
無次元風速 $V_{cr}/f\theta \cdot B$	6,8	8,4	8,2	16,3

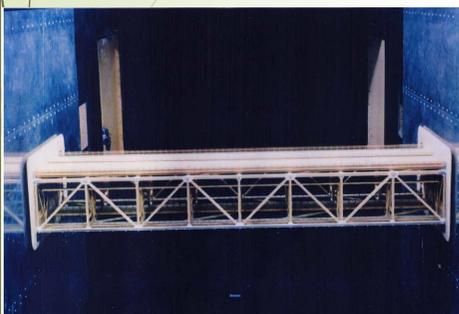
図-1 耐風設計上の要求基準比較



事前検討断面 (耐風委員会)



部分模型試験



全橋模型試験



大型風洞試験の結果分かったこと

- (1) 2000m級の吊り橋では、静的変形の影響 (特に迎角特性) や、ケーブルの空力干渉のため、スパン方向に動的空気力が大きく変化する。
- (2) フラッター時の振動モードは、必ずしも曲げとねじれの最低次の連成フラッターモードにはならず、ねじれ一次とその振動数に近い曲げの2次3次の連成が強くなる場合がある。
- (3) 明石海峡大橋のような長支間吊橋の場合、従来行われてきた2自由度のばね支持実験の結果のみで耐風性を評価するには限界がある。
- (4) 全橋模型試験の結果を骨組み構造モデルと、部分模型を用いて測定した非正常空気力を用い、3次元的にそれらが変化するとして扱ったフラッター解析により説明することが可能である。
- (5) 今回の実験のように大迎角が生じる場合のフラッター解析をする場合には、抗力の変動も考慮する必要がある。

瀬戸大橋までの基礎が岩盤上に設置  
本四耐震設計基準(s) 5.2年

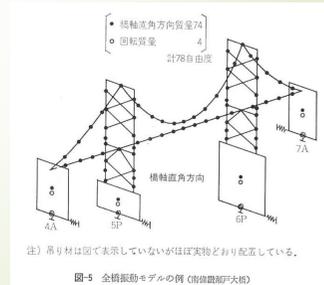
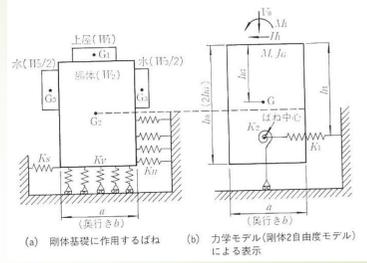
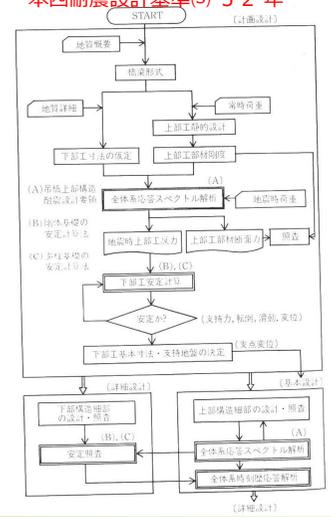


図-5 全橋振動モデルの例 (0.0倍縮小大橋)

設計応答スペクトル

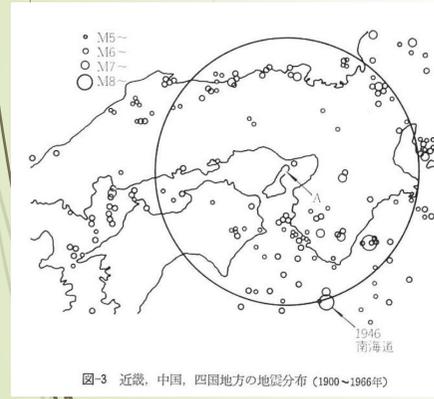


図-3 近畿、中国、四国地方の地震分布(1900~1966年)

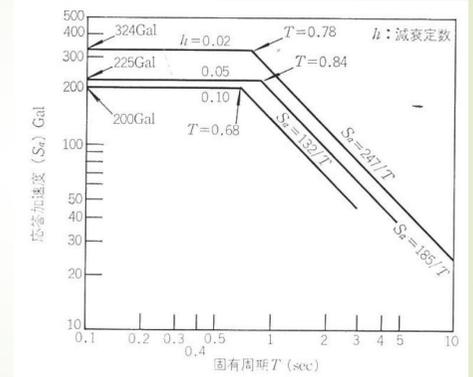


図-4 応答加速度スペクトル曲線(地震動最大加速度180Gal)

多層地盤上の明石海峡大橋 耐震設計要領(昭和63年)

地盤の応答、地盤の非線形性、基礎と地盤の相互作用を考慮

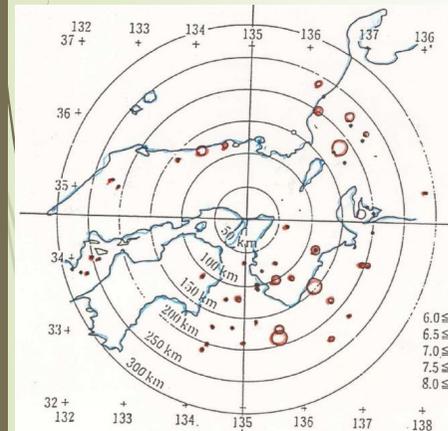
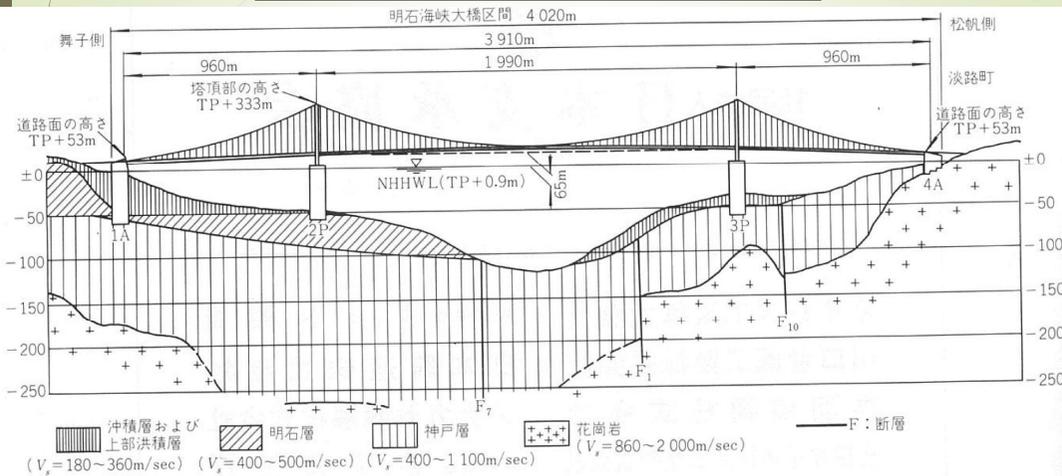
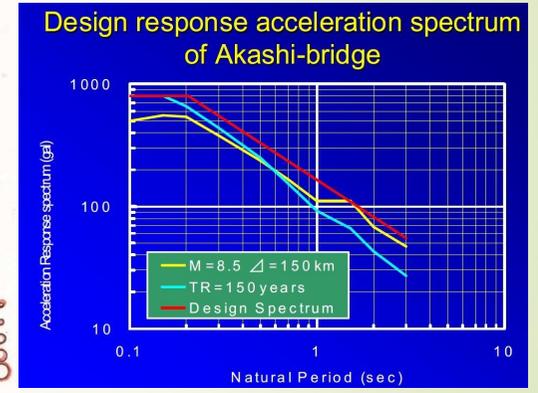
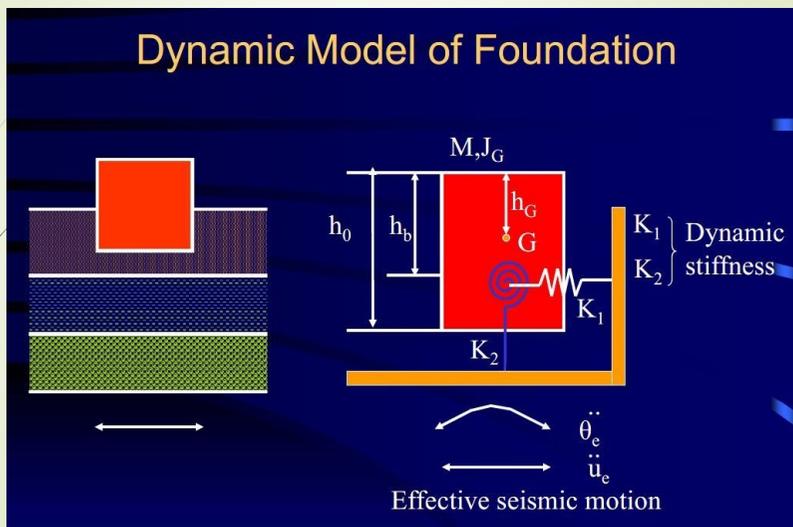


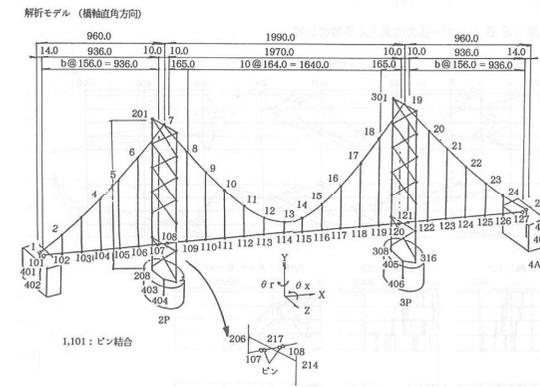
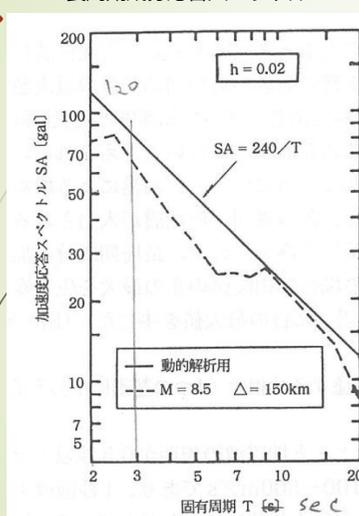
Fig.10 Earthquake Epicenters and Magnitudes(1885-1979 years)



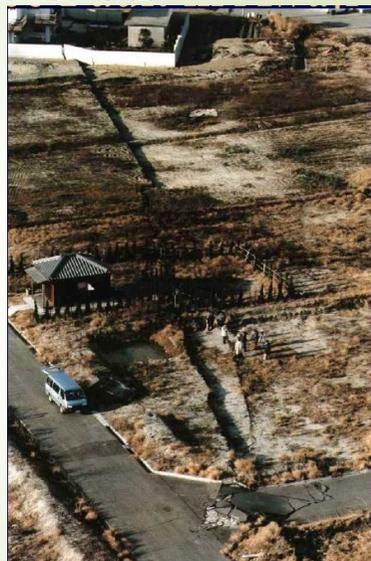
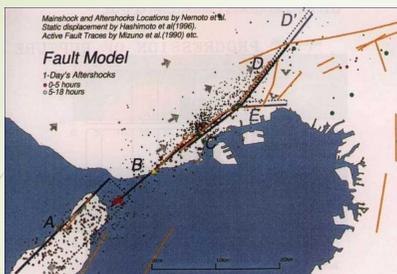
## Dynamic Model of Foundation



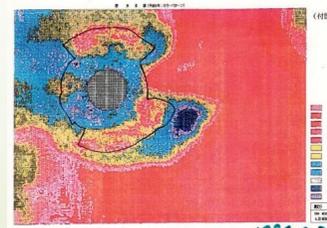
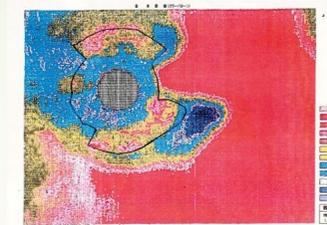
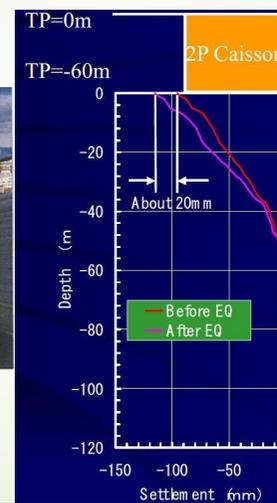
## 長周期成分応答スペクトル

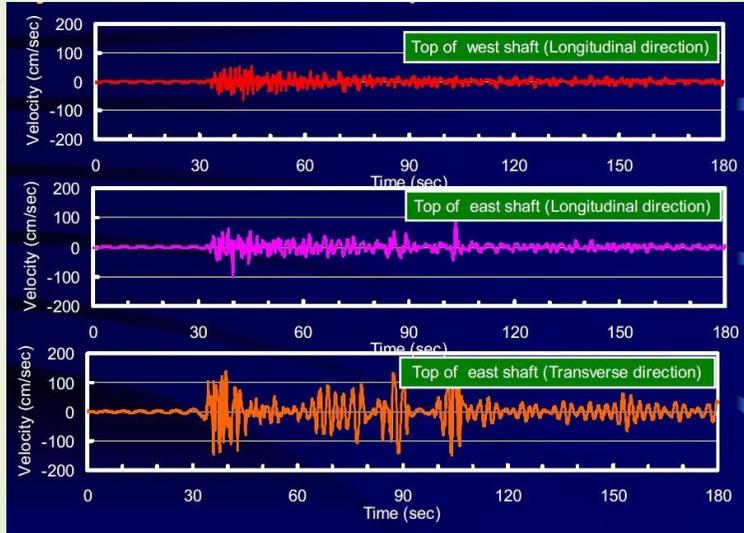


長周期成分地震波と位相差を考慮

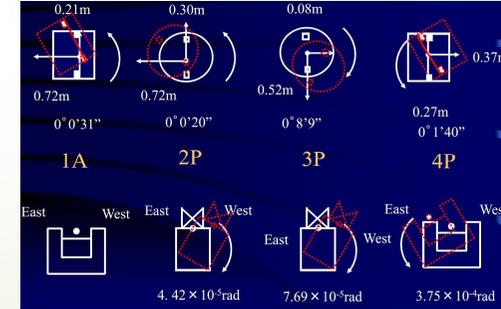
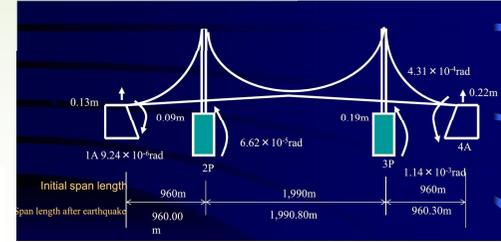


## 地震直後の点検、調査

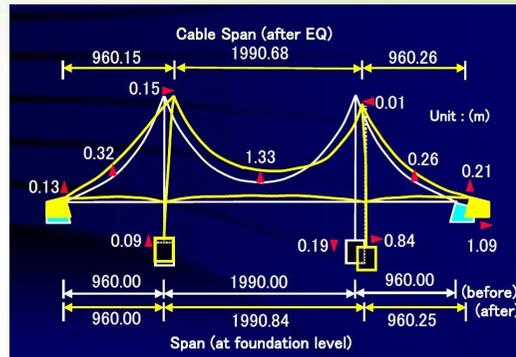




兵庫県南部地震の影響



- ①中央径間および側径間で、補剛桁の支間が広がったために、主塔部での遊間が広がり、ウインド杏、伸縮装置について所定の伸縮量が確保できなくなった。
- ②中央径間、側径間ともにサグが小さくなったことにより、補剛桁が盛り上がり、所定の縦断勾配とはならなくなった。
- ③路面の平面線形に、2P、3Pで折れが生じた。



対処法

補剛桁長調整	径間長 ・パネル長の変更で吸収	変更する	無し	中央径間の放物線 ・1.5%→1.6% 側径間の直線 ・3.2%放物線	・補剛桁弦材軸力2%程度増 ・補剛桁詳細設計一部変更要 ・鋼床版詳細設計一部変更要
--------	--------------------	------	----	--	---

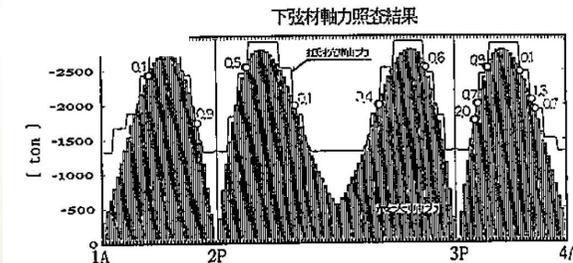
ケーブルの付加応力

単位: t

ケーブル位置	付加張力	設計最大張力	合計	許容張力
2P側径間	393	62,513	62,906	64,880
2P中央径間	368	61,482	61,850	
3P中央径間	360	61,481	61,841	
3P側径間	426	62,478	62,904	

\*最大ケーブル応力79.0→79.5kg/mm<sup>2</sup> (0.6%増)  
許容応力82kg/mm<sup>2</sup> (引張強度180kg/mm<sup>2</sup>)

補剛桁の応力照査





### 本四塗装基準 (瀬戸大橋まで)

階層	1次床面塗装	2次床面塗装	第1層	第2層	第3層	第4層	第5層	第6層	第7層	合計
1	JIS K 5633 2種 公称厚 2.0mm	JIS K 5633 2種 公称厚 2.0mm	JIS K 5633 2種 公称厚 1.5mm	JIS K 5633 2種 公称厚 1.5mm	JIS K 5633 2種 公称厚 1.5mm	HSS K 5609 公称厚 1.5mm	118			
			JIS K 5633 2種 公称厚 1.5mm	JIS K 5633 2種 公称厚 1.5mm	JIS K 5633 2種 公称厚 1.5mm	HSS K 5609 公称厚 1.5mm	118			
2	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	199				
			HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板
3	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	285				
			HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板
4	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	255				
			HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板
5	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	380				
			HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板
6	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	345				
			HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板
7	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	330				
			HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板
8	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	220				
			HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板	HSS K 5603 厚板用熱延鋼板

ケーブル  
鋼板外面  
鋼板内面

### 斜張橋関連技術開発

### 櫃石島橋、岩黒島橋における併用橋としての技術開発

### 斜張橋関連技術開発

### 櫃石島橋、岩黒島橋における併用橋としての技術開発 列車走行性 鉄道緩衝桁

### 斜張橋関連技術開発

### 櫃石島橋、岩黒島橋における併用橋としての技術開発 疲労設計と製作

トラス大型疲労試験

BB-1 試験体,  $\sigma_r = 17.4 \text{ kg/mm}^2$   
 $N_f = 120.0 \times 10^4$   
 プローホルの寸法:  $2.5 \times 1.6 \text{ mm}$   
 B等級の許容応力度はこの程度のプローホルを基準としている

Kind of stress	Allowable stress category	Fatigue strength	
		Basic	allowable stress
Tension	A	1270	1320
	B	1050	1100
	C	850	900
Compression	C	850	900
	S1	850	900
	S2	850	900
Shear	S1	850	900
	S2	850	900

櫃石島橋、岩黒島橋における併用橋としての技術開発  
弾性固定装置 (水平移動量地震時 ± 400 mm)

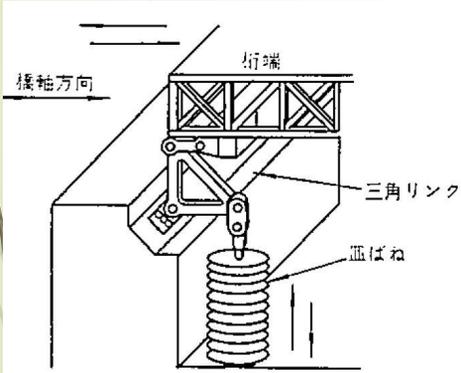
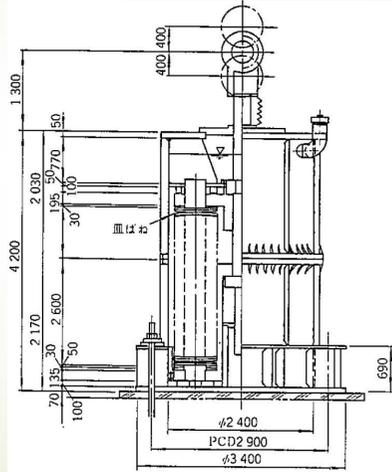


図-8 スプリング沓の機構と構造



櫃石島橋、岩黒島橋における併用橋としての技術開発

ケーブル材料と防食

7mmメッキ鋼線の疲労試験結果

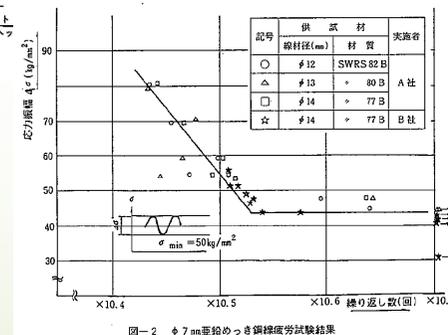
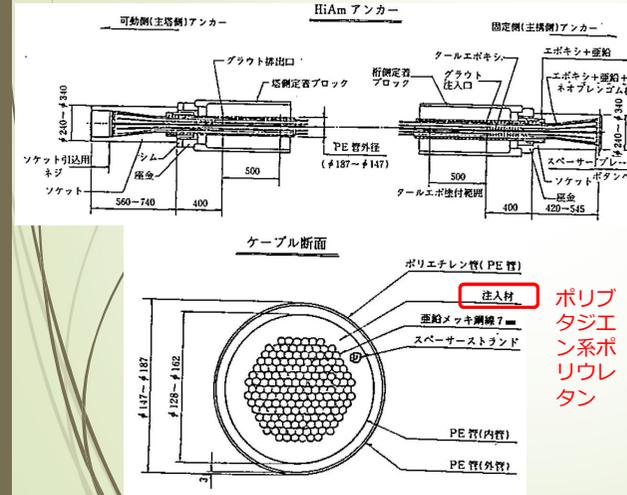
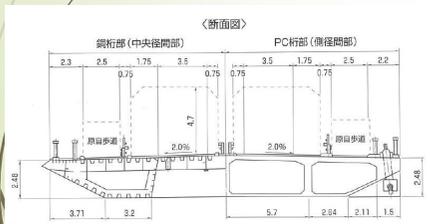
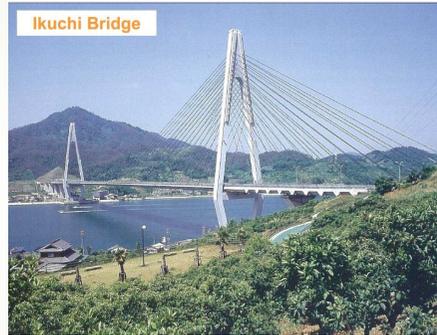
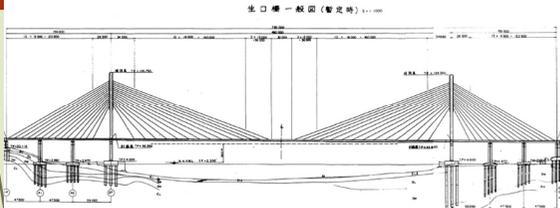
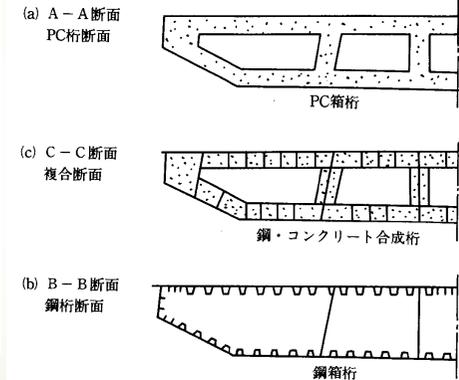
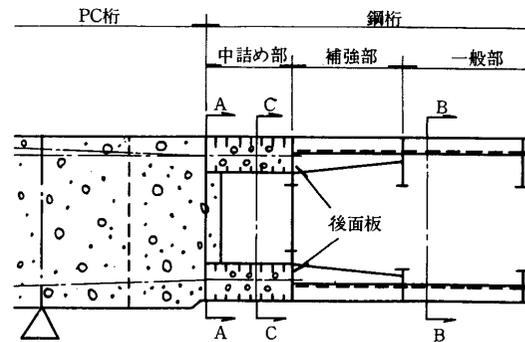


図-2 φ7mm亜鉛めっき鋼線疲労試験結果

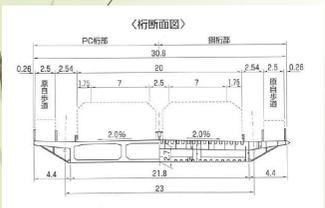
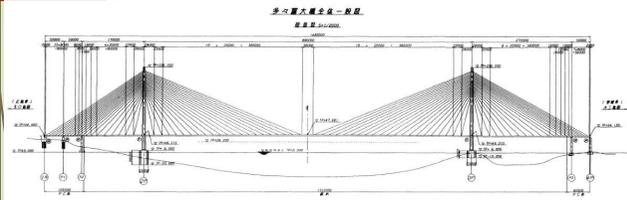
生口島橋 複合斜張橋 (Lc = 490m)



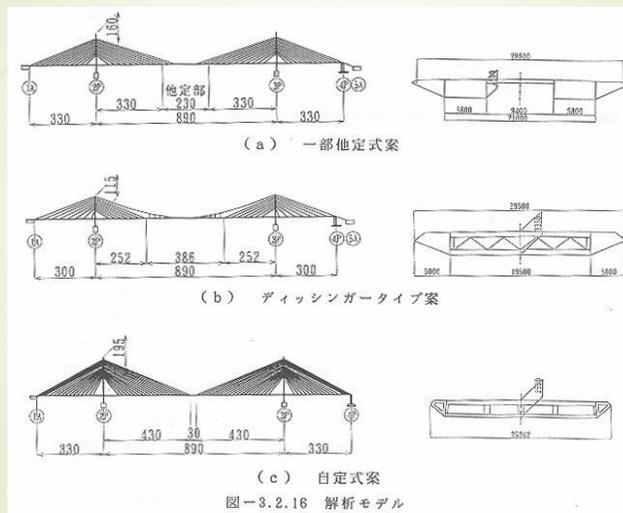
接合構造の応力照査



多々羅大橋の技術開発 (Lc = 890 m)



多々羅大橋の技術開発 (基本構造計画)



多々羅大橋の技術開発 (耐風設計)



写真-4.1.1 全橋模型による耐荷力試験

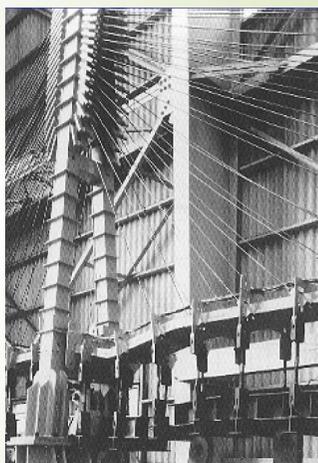


Photo 6-2 Buckled model girder

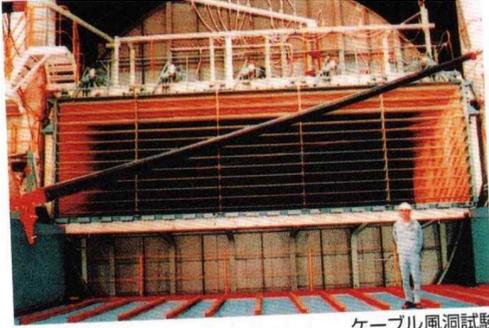


大型模型試験

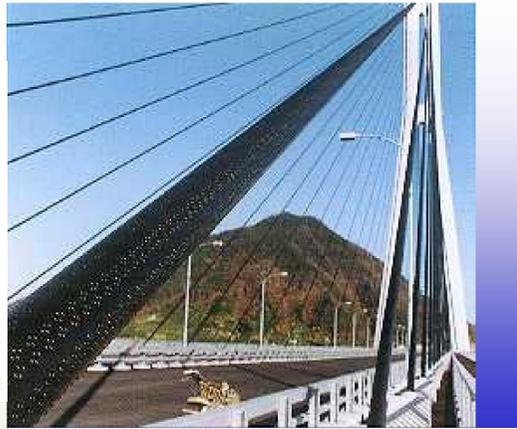


地形模型風洞試験

多々羅大橋の技術開発 (ケーブルの耐風設計)



ケーブル風洞試験



中国編

全国35000Kmの高速道路計画 (1991年から約30年間で)

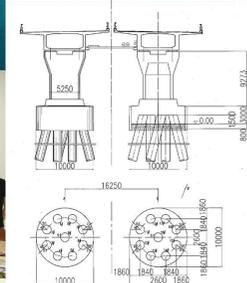


五縦七横



杭州湾大橋 (36km) の海上橋梁

杭州湾交通通道橋位方案一建效果图 (鸟瞰图)



海上建設株式会社 杭州湾大橋建設  
 Entering the new era of construction of Walking Girders

中国初の鋼製タワー



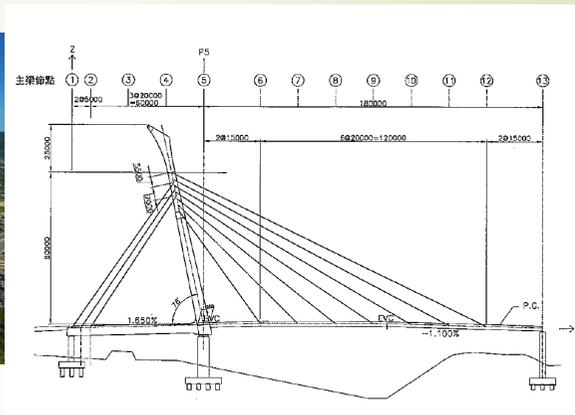
関わった台北周辺の橋梁



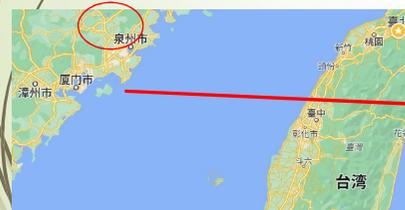
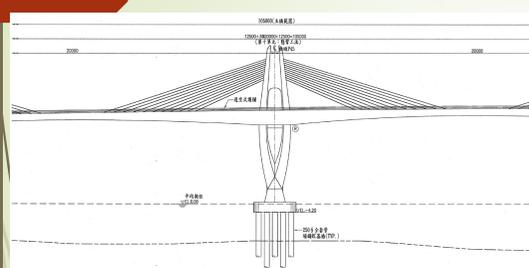
社子大橋



京都大にて全橋風洞試験

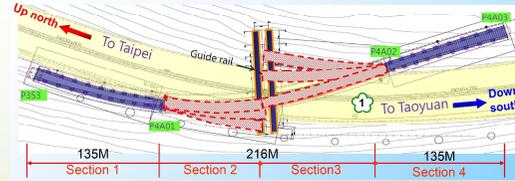


金門大橋 (6径間連続エクストラロード (L=200m) 橋)

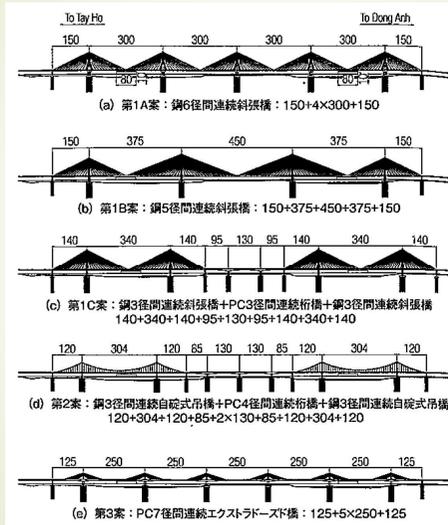
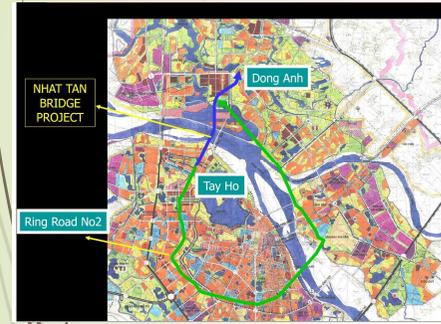




Introduction of Rotating Method



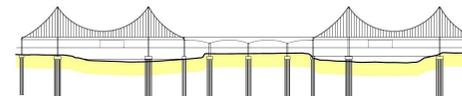
ニャットタン橋の位置



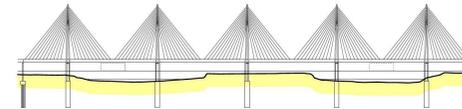
河床変動を考慮した橋梁計画

Comparison of the Bridge Type based on the Existing River Bed

- Self Anchored Suspension Bridge

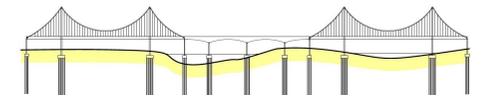


- Continuous Cable Stayed Bridge

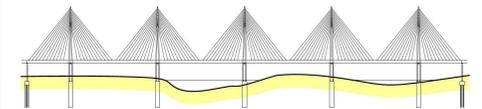


Comparison of the Bridge Type Based on the River Bed in 20 years ago

- Self Anchored Suspension Bridge



- Continuous Cable Stayed Bridge



# ベトナム編 ニャットン橋

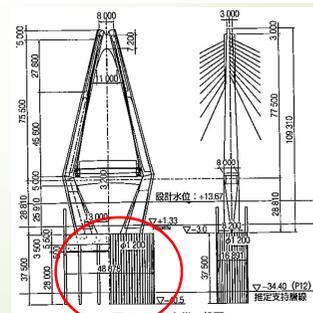
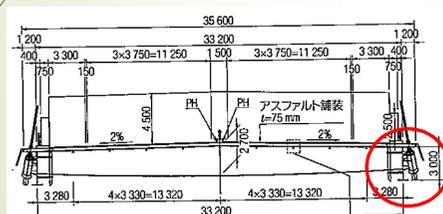
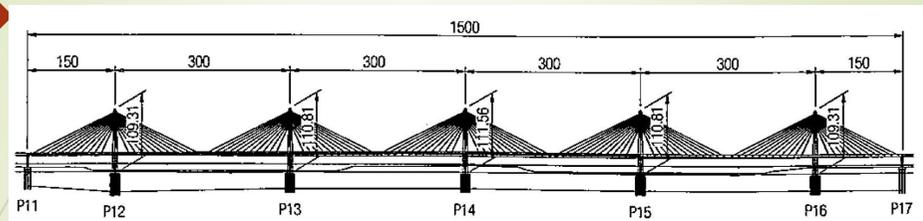
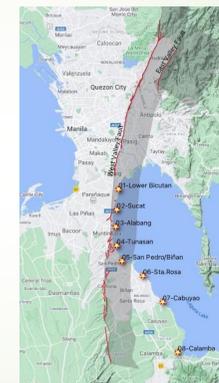
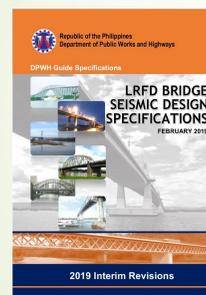
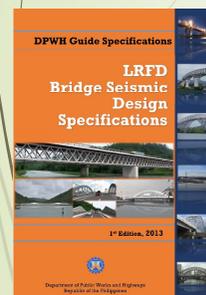


図 3-12 主桁一節

# フィリピン編

## フィリピン耐震基準BSDS の改定と普及活動並びに、それを用いたLagna Lake 橋の耐震設計

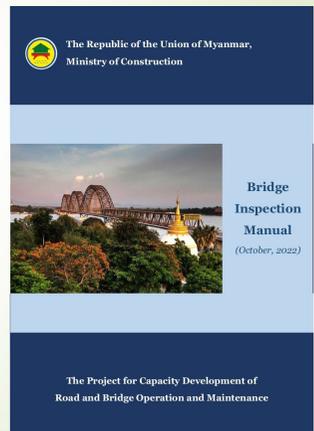
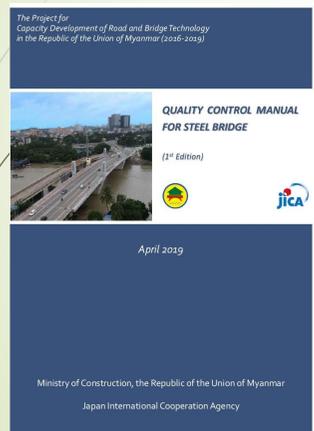


# ミャンマー編

## ミャンマー建設省で使用されるマニュアル類の整備と普及

### 鋼橋の建設品質管理マニュアルの作成

### 橋梁の維持管理詳細点検マニュアルの作成



本四架橋事業及び海外橋梁で一緒にやってきた皆様ありがとうございました。

本日ご参加いただいた皆様、ご清聴ありがとうございました。