

「鋼橋の疲労設計」のこれまでとこれから

法政大学・デザイン工学部
都市環境デザイン工学科

森 猛

聖水大橋 (ソウル)の事故

1979年竣工

1994年10月21日



釣り形式の
ゲルバートラス

溶接不良

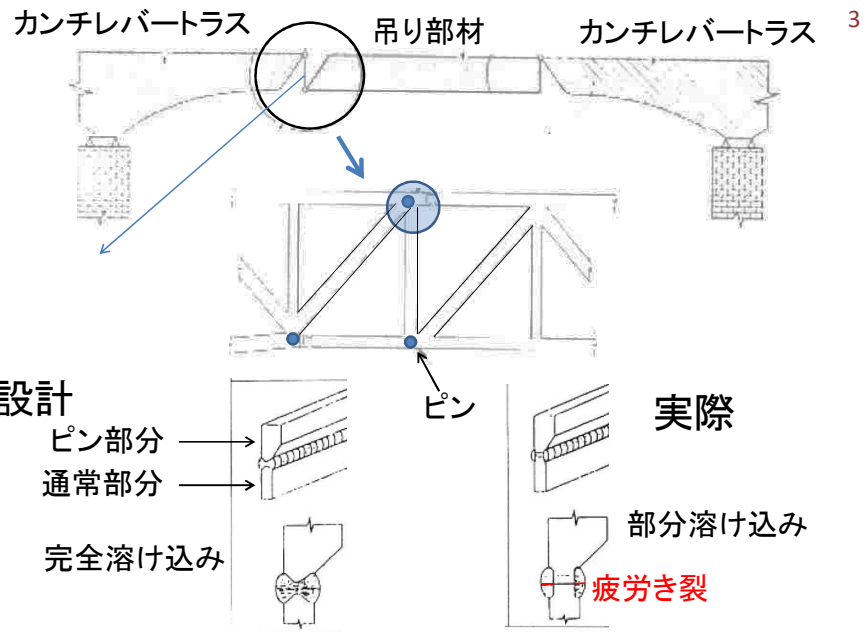


疲労き裂



吊り部材の落下

32名死亡、17名負傷



事故の結末

- ・ソウル市長更迭
- ・聖水大橋の建設および維持管理に携わっていた何人かの市役所内技術者が逮捕
- ・数多くの診断会社が設立



架け替えられた聖水大橋
2000年

構造技術者の役割 : 構造物の利用者の安全を担保する
最新技術・知識を保有すべき
その一つが疲労、疲労設計

本日のお話

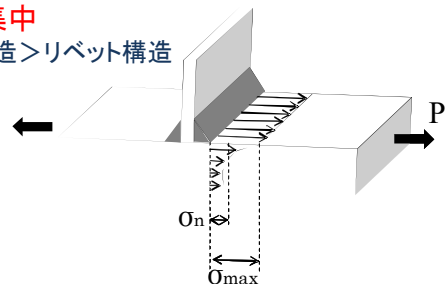
1. なぜ道路橋で疲労設計が必要となったのか？
2. 鋼橋の疲労設計
「鋼道路橋の疲労設計指針」2002年
3. 国際溶接学会の疲労設計指針
4. 鋼構造協会の疲労設計指針
(1993年版から2012年版へ)
5. これからの「鋼橋の疲労設計」

なぜ溶接継手の疲労強度は低いのか

疲労き裂の始まりは局所的な場所
そこでの応力範囲によってき裂がでるかでないかが決まる

応力集中

溶接構造 > リベット構造



公称応力 σ_n
 $\sigma_n = P/A$

最大応力 σ_{max}

応力集中係数 α
 $\alpha = \sigma_{max} / \sigma_n$

形状不連続(継手形式によって決まる)

溶接きず(アンダーカット、ブローホール)
仕上げ

7

なぜ道路橋で疲労設計が必要となったのか

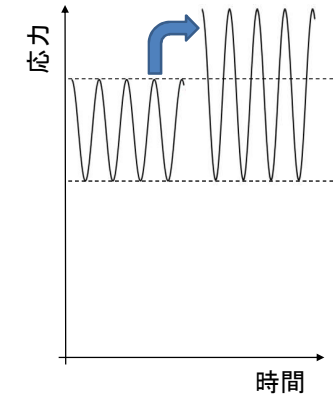
2002年「鋼道路橋の疲労設計指針」
それ以前から鉄道橋では疲労設計

車両の重量化
繰返し応力の増大

・車両の重量化
繰返し荷重(繰返し応力)の増大

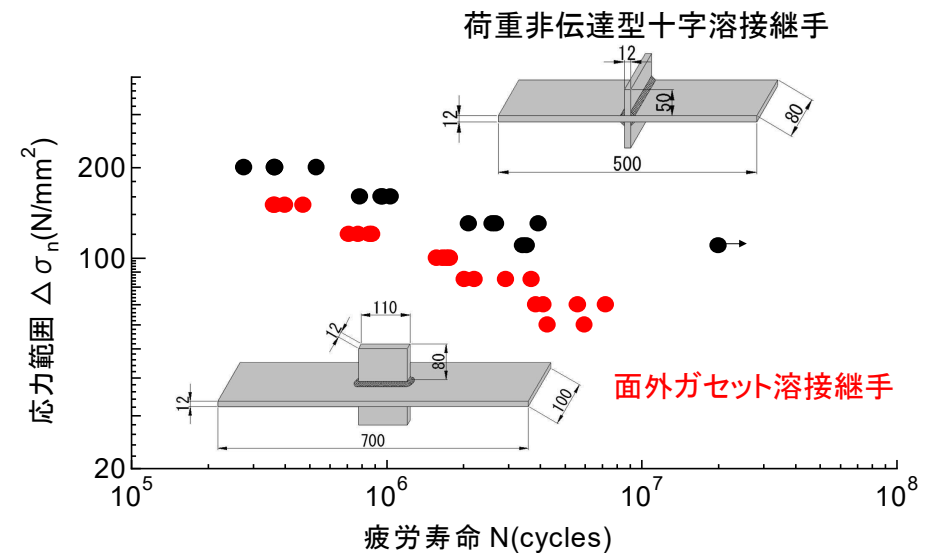
・リベット構造 → 溶接構造
疲労強度の低下

・高強度鋼の使用
繰返し応力の増大

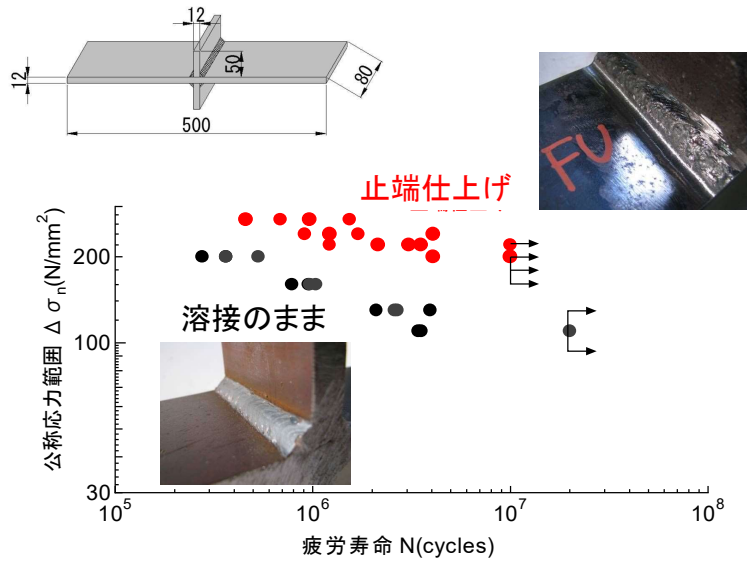


継手形状による疲労強度の違い

8



止端仕上げの効果(応力集中の低減)

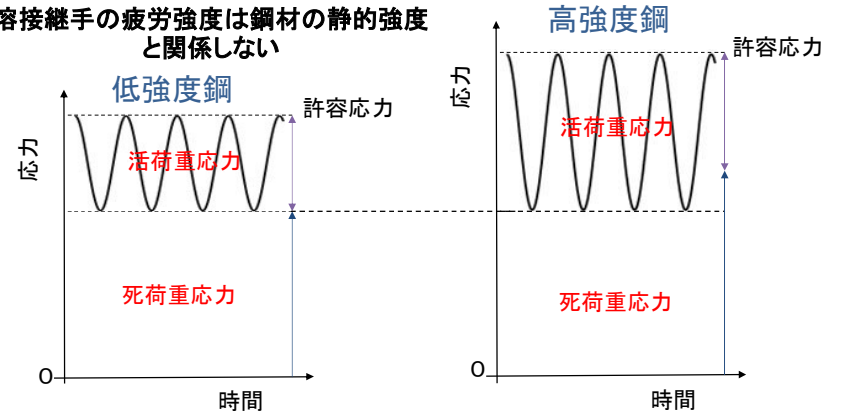


なぜ高強度鋼を使うと疲労が問題となるのか

道路橋の設計
(死荷重応力 + 活荷重応力) \leq 許容応力

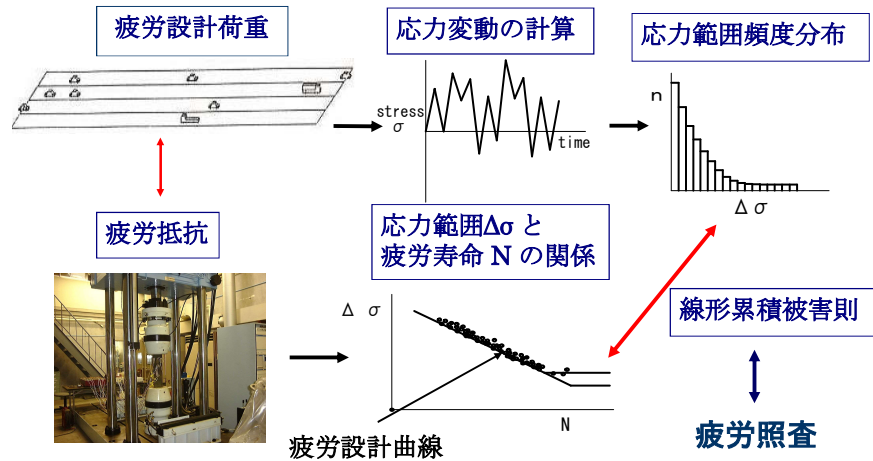


活荷重応力(繰返し応力)の増大
溶接継手の疲労強度は鋼材の静的強度と関係しない



「鋼道路橋の疲労設計指針」(2002年)

疲労設計の基本的な流れ・考え方



疲労設計荷重 荷重から応力への変換 疲労強度 疲労照査

疲労設計荷重 (鋼道路橋の疲労設計指針)

疲労設計荷重の頻度

大型の走行頻度

重量の補正

$$\text{重量} = 200\text{kN} \times \gamma_T \times (1+i_f)$$

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

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

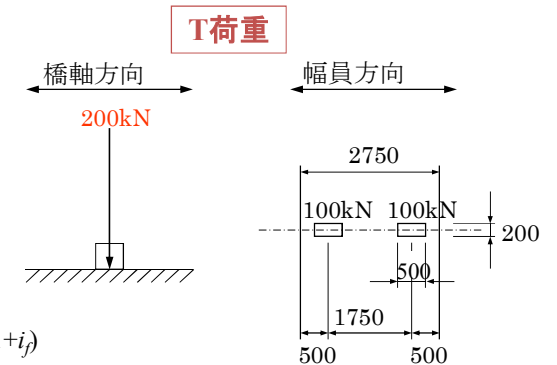
L: 支間・基線長 (m)

γ_{T2} : 同時載荷係数

i_f : 衝撃係数

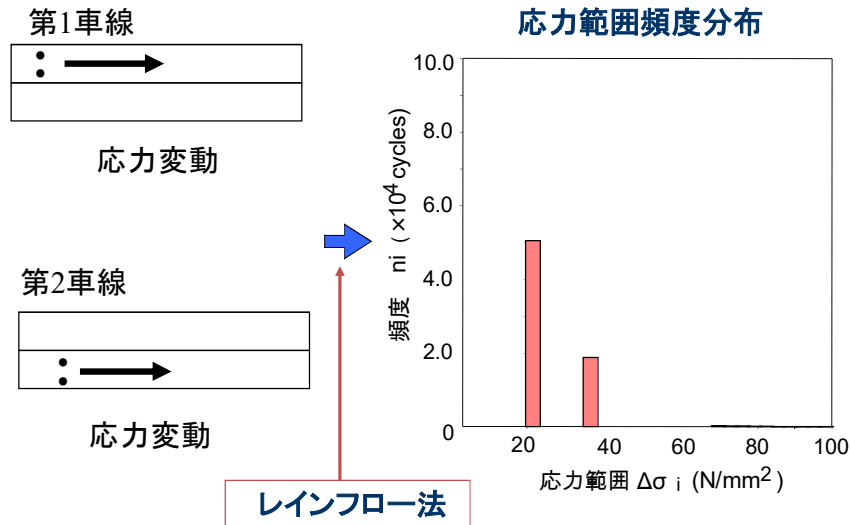
γ_{T1} : 単軸のT荷重で最大級重量の多軸車両をモデル化

γ_{T2} : 車両の同時載荷



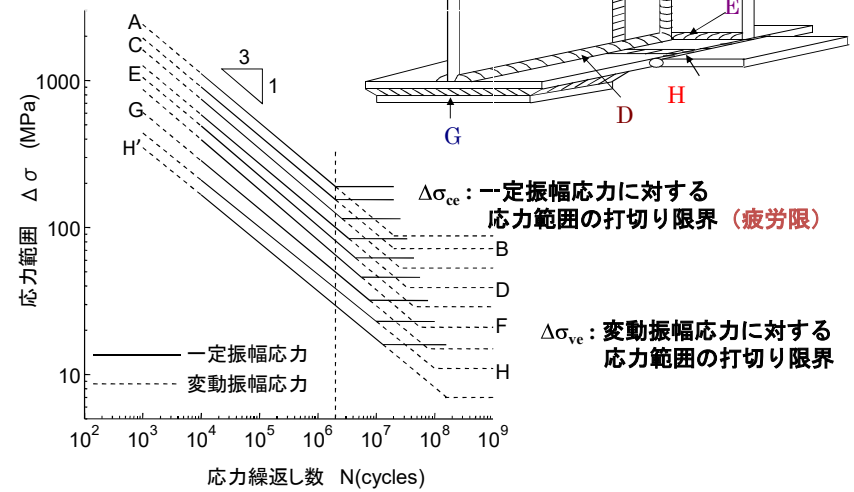
応力範囲頻度分布の計算

13



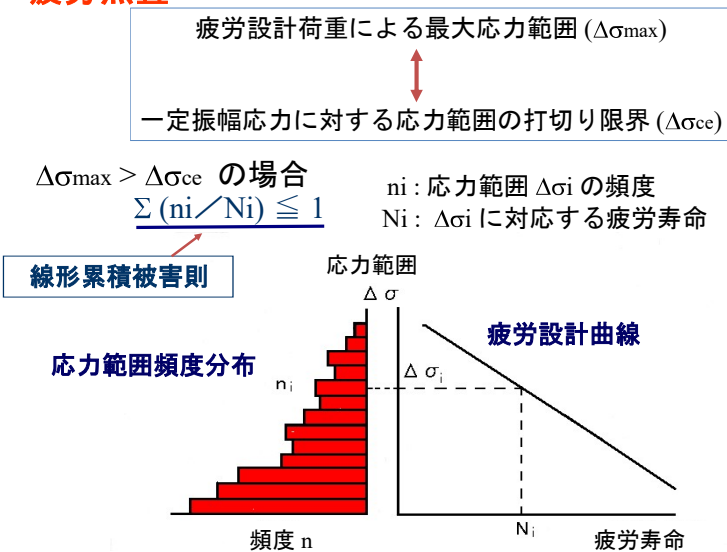
疲労強度 (疲労設計曲線)

14



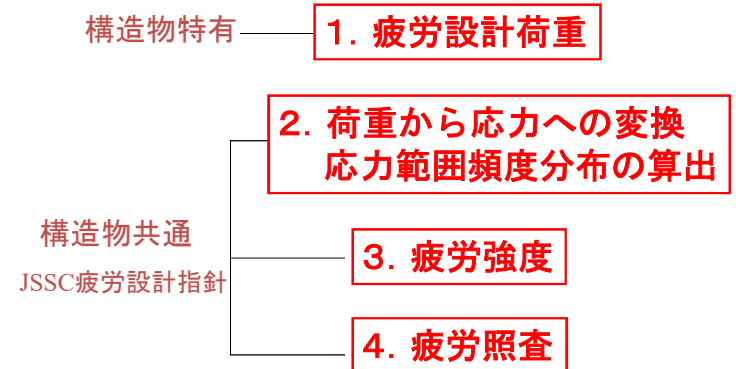
疲労照査

15

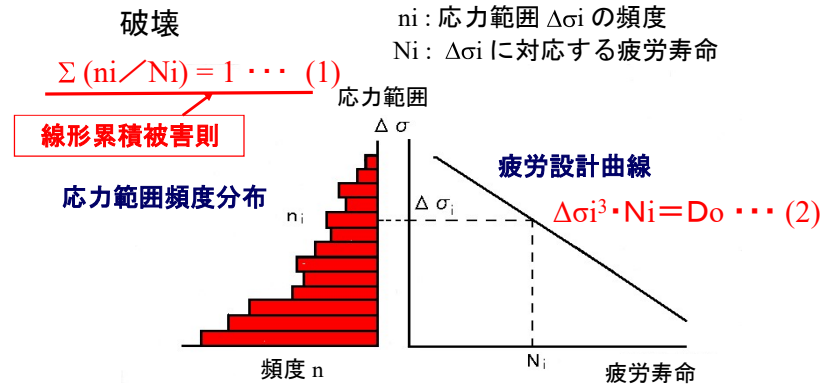


鋼橋の疲労設計(照査)

16



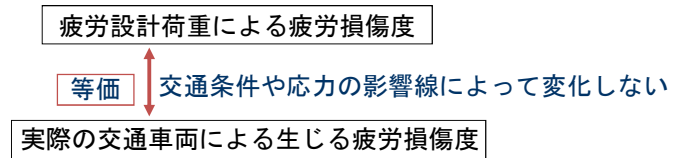
(累積)疲労損傷度



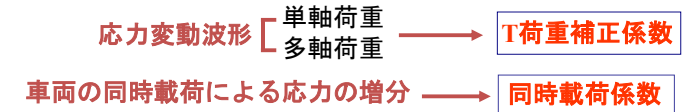
(2)式より $N_i = D_o / \Delta\sigma_i^3 \dots (3)$

(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

1. 疲労設計荷重の考え方



疲労設計荷重: T-荷重 (単軸荷重, 重量 200kN)



疲労設計荷重は最大級重量を有する多軸トラックをモデル化

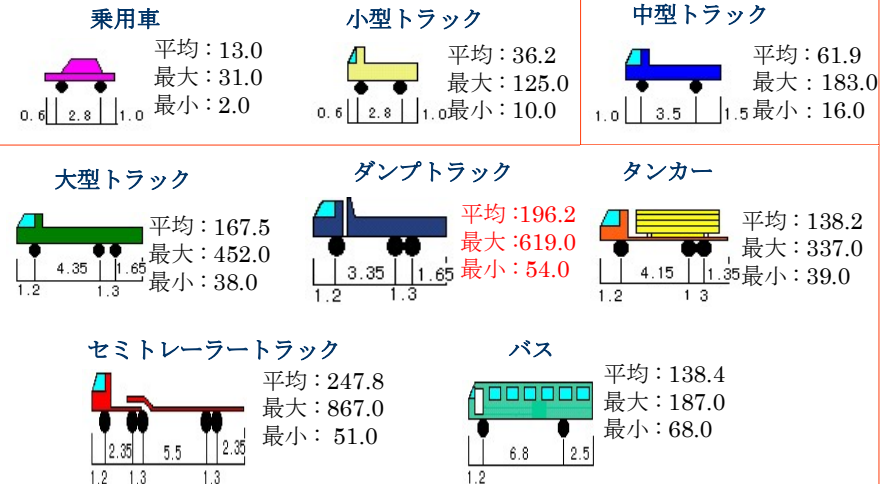
疲労設計荷重の頻度: 大型車の頻度? → T-荷重補正係数 頻度補正係数

T-荷重補正係数

車両の形式と重量

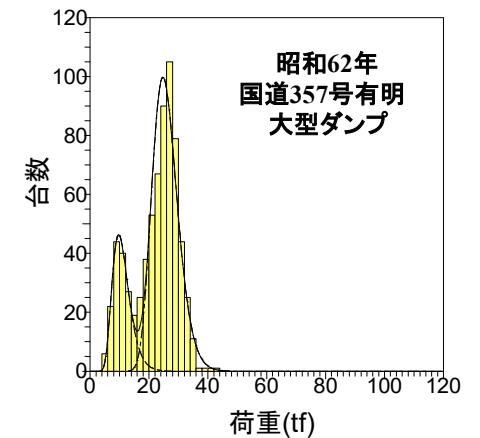
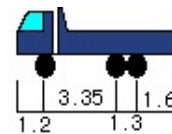
(重量: kN)

大型トラック



車両荷重の測定例

ダンプトラック



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

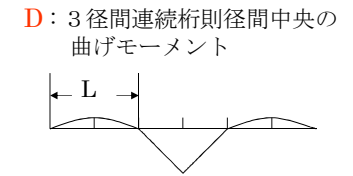
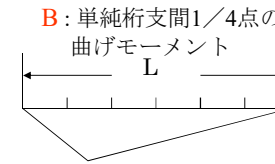
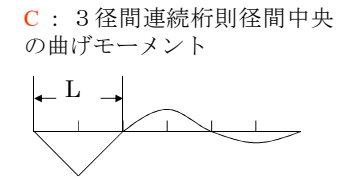
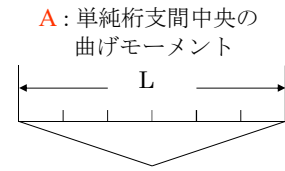
荷重の特性

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

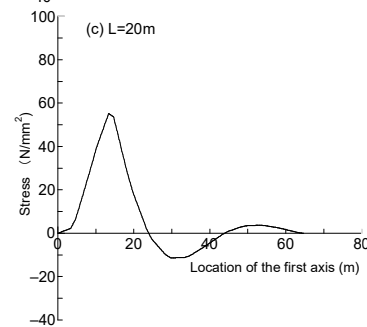
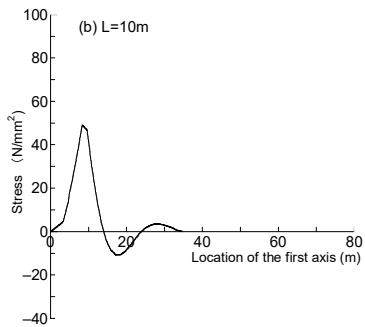
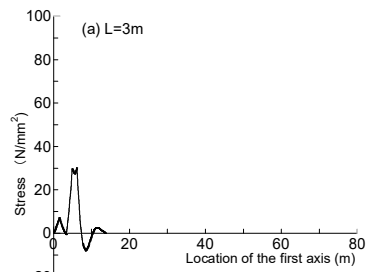
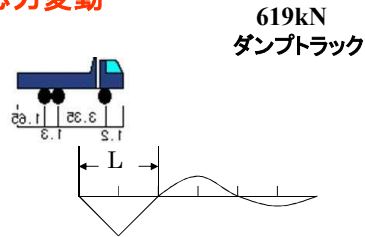
	乗用車 C	小型トラック ST	中型トラック MT	大型トラック LT	大型ダンプ LD	タンクローリー TR	セミトレーラー TT	バス BS
H4有明	3.13	4.72	7.43	18.82	24.68	17.83	33.22	9.90
S62有明	3.70	4.86	7.15	15.09	24.45	13.85	26.84	9.19
S59有明	1.92	4.26	7.15	17.41	21.56	16.27	30.74	11.66
S59熊谷	1.50	4.01	8.25	18.79	26.55	22.62	28.87	10.93
H4いわき	2.80	3.71	8.80	23.26	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

tonf

影響線の形状

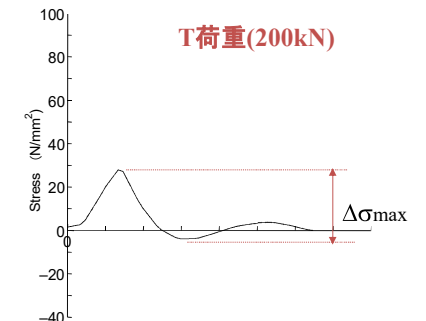
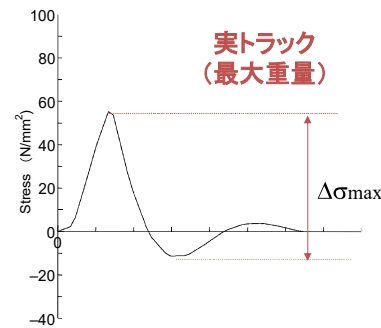


応力変動

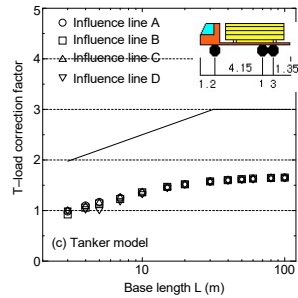
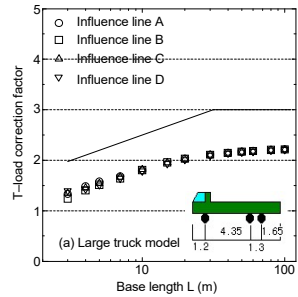


T荷重補正係数の定義

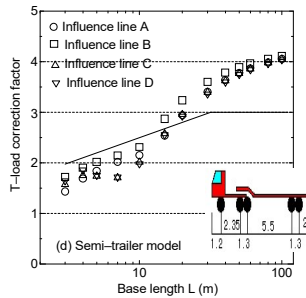
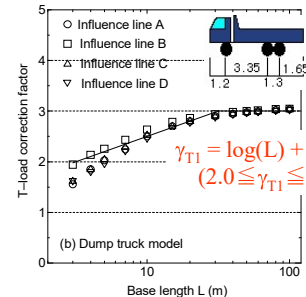
$$T \text{ 荷重補正係数} = \frac{\text{実トラック(最大重量) による最大応力範囲}}{T \text{ 荷重 (200kN) による最大応力範囲}}$$



T荷重補正係数と基線長の関係



ダンプトラック



同時乗荷係数

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

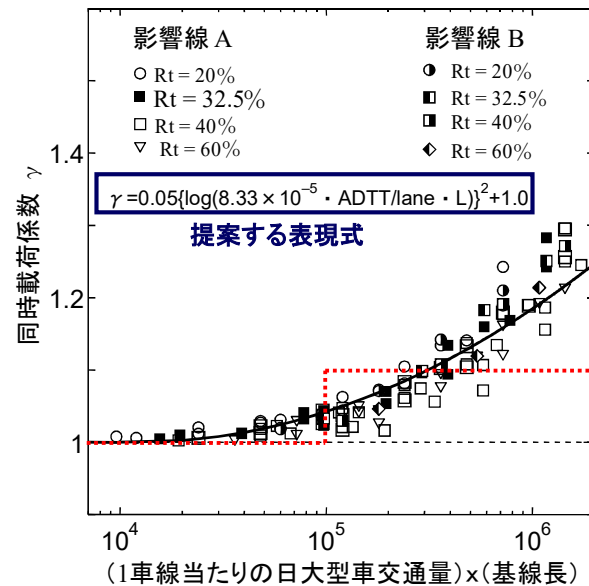
$$\text{疲労損傷度} = \sum (\Delta\sigma_i^3 \cdot n_i)$$

モンテカルロシミュレーションの条件

1車線当たりの交通量: 500 ~ 2500 台/時間
車速: 50 ~ 100km/hr

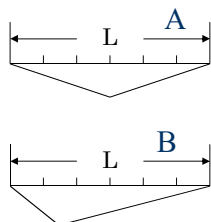


同時乗荷係数の表示式

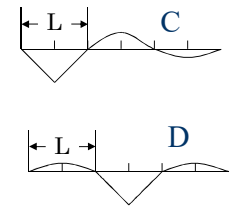
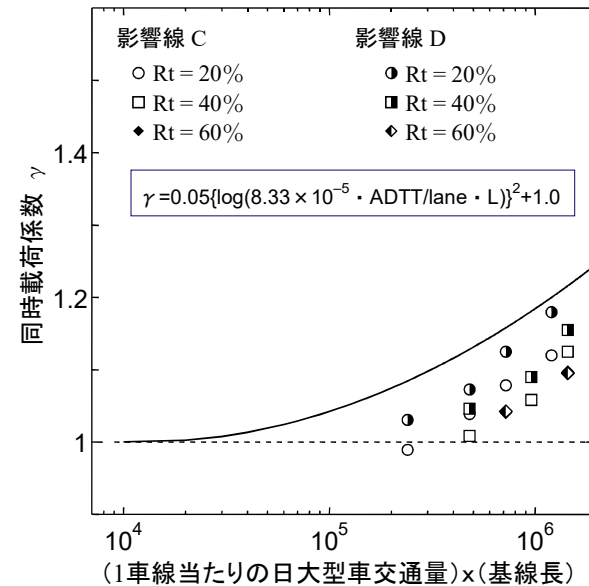


ADTT	L	
	~40m	40m~
~2500	1.0	1.0
2500~	1.0	1.1

影響線の基線長 L



同時乗荷係数 (影響線 C, D)



同時乗荷係数
1.0

頻度補正係数

疲労設計荷重の重量 (T-load (200kN) の3倍)

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。

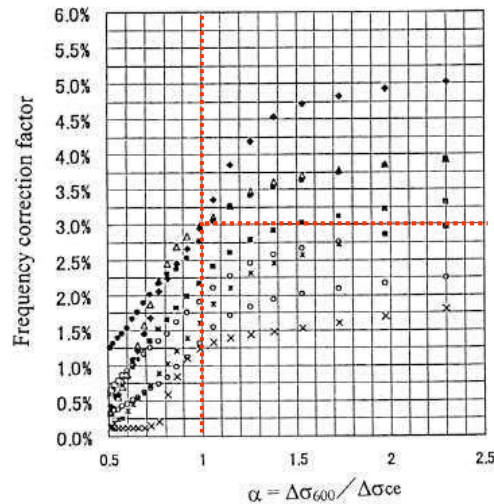
多くのトラックの重量は、それほど重くない

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

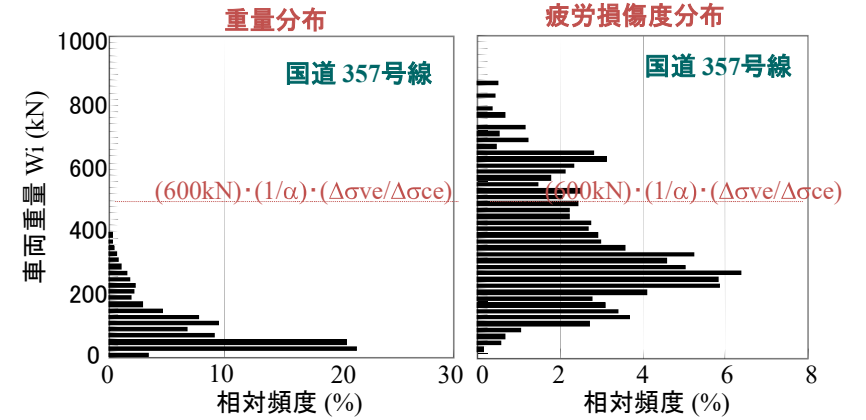
疲労設計荷重の頻度と大型車の走行頻度の比
(同じ疲労損傷度を与える)

頻度補正係数



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

重量分布と疲労損傷度分布



頻度補正係数 γ_n

$$\gamma_n = \frac{\sum (W_i^3 \times n_i)}{600^3 \times \sum n_i}$$

$$W_i > (600\text{kN}) \cdot (1/\alpha) \cdot (\Delta\sigma_{ve}/\Delta\sigma_{cc})$$

$$\alpha = \Delta\sigma_{600} / \Delta\sigma_{cc}$$

$\Delta\sigma_{600}$: 600kNのT荷重が作用したときの応力
 $\Delta\sigma_{cc}$: 一定振幅応力下の応力範囲の打ち切り限界

疲労設計荷重 T 荷重 (単軸荷重、200kN)

重量の修正

$$\text{重量} = 200\text{kN} \times \gamma_T \times (1+i_f)$$

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

γ_{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)

γ_{T2} : 同時載荷係数

日大型車交通量 ADTT	基線長 (m)	
	>40m	≤40m
>2500台/車線	1.0	1.1
≤2500台/車線	1.0	1.0

衝撃係数 i_f : 断面設計に用いられる衝撃係数の半分

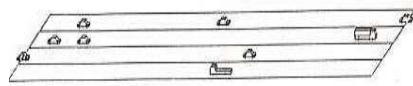
頻度補正係数 = 0.03

疲労設計荷重の頻度 = 0.03 x (大型車交通量)

2. 荷重から応力への変換

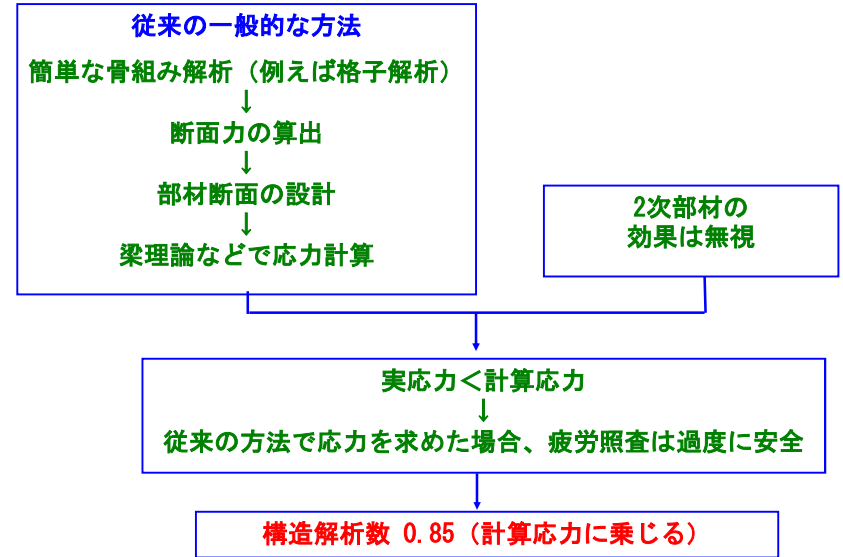
着目位置の断面力の影響線 → 応力影響線

公称応力(格子解析, 梁理論, 主要部材のみを対象)

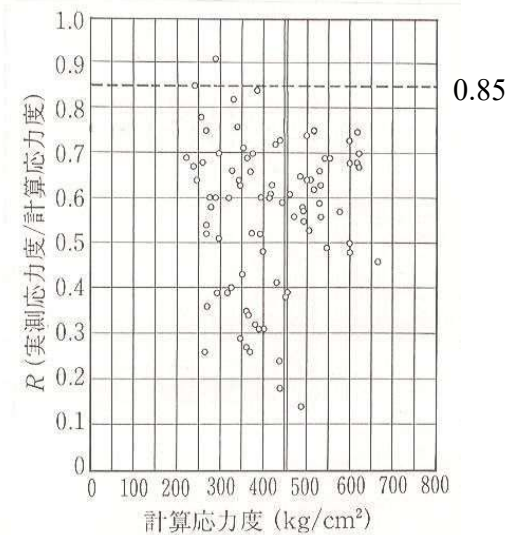


応力変動波形

構造解析係数

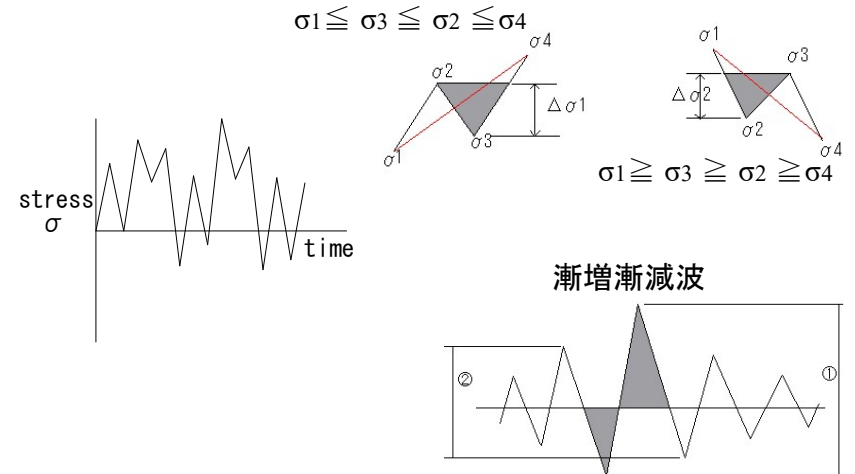


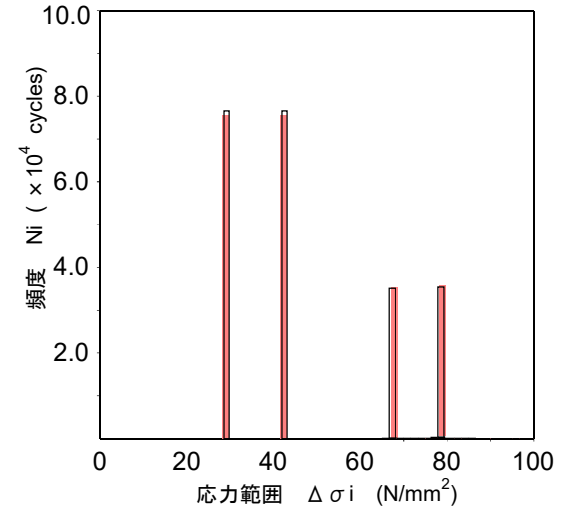
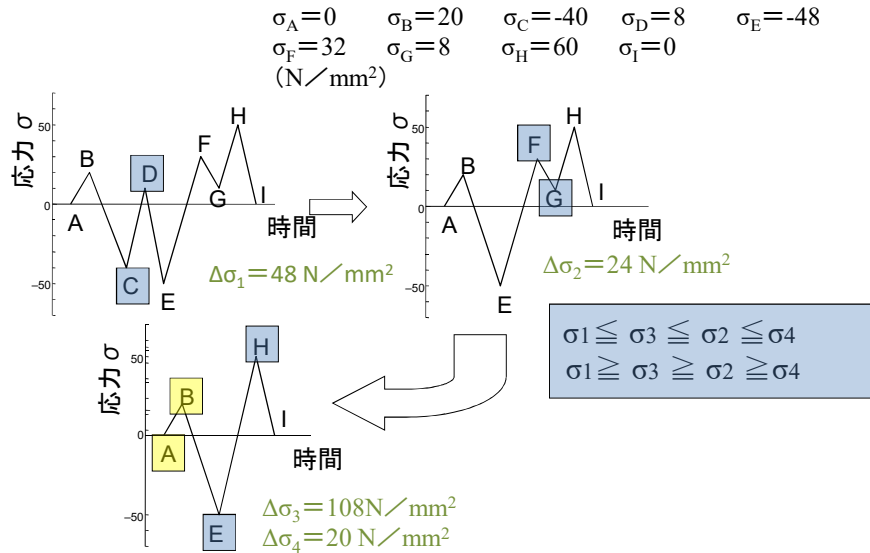
実応力と計算応力の関係



応力変動 → (レインフロー法) → 応力範囲頻度分布

遠藤の方法





3. 疲労強度 (Δσ-N関係)

疲労寿命 = 亀裂発生寿命 + 亀裂進展寿命

亀裂発生寿命 : 亀裂発生部に生じる実際の応力の変動幅

亀裂進展寿命 : 亀裂が進展する断面での応力の変動幅

疲労強度 (Δσ-N関係)

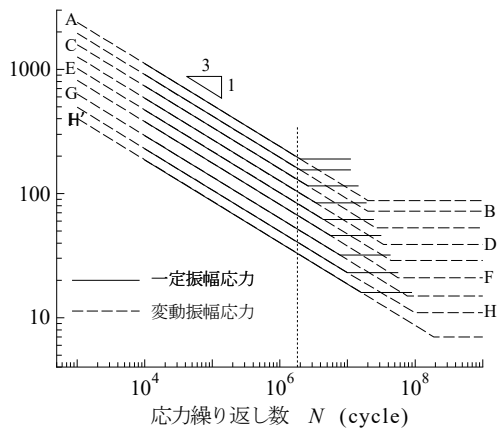
継手形式

溶接部の仕上げ

溶接きず

強度等級 200万回疲労強度

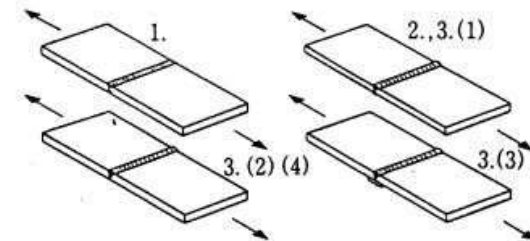
A	190MPa
B	150MPa
C	125MPa
D	100MPa
E	80MPa
F	65MPa
G	50MPa
H	40MPa
H'	32MPa



突合せ溶接継手

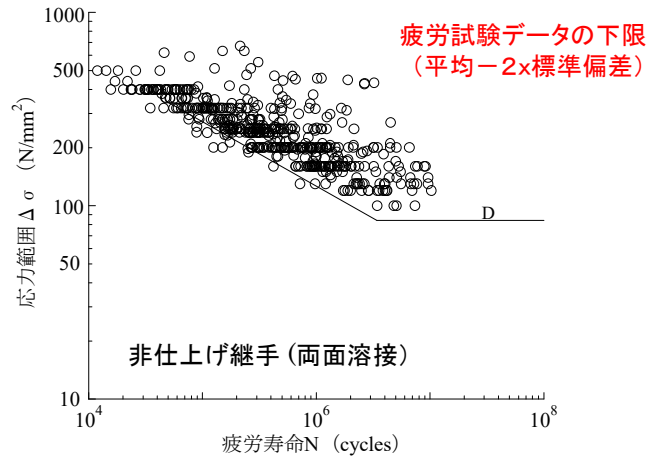
余盛を削除した継手 B(155MPa)

非仕上げの両面溶接 D(100MPa)

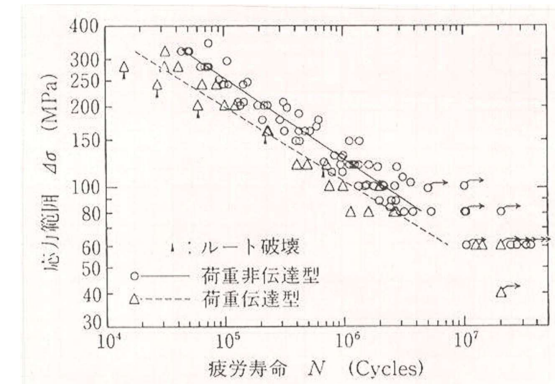


- ※ 完全溶込み溶接で、溶接部が健全であることを前提とする。
- ※ 継手部にテーパが付く場合には、その勾配を1/5以下とする。
- ※ 深さ0.5mm以上のアンダーカットは除去する。
- ※ (1., 2.)仕上げはアンダーカットが残らないように行う。仕上げの方向は応力の方向と平行とする。

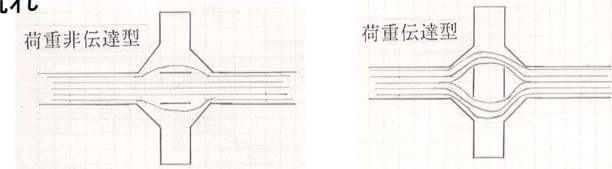
非仕上げの両面溶接継手



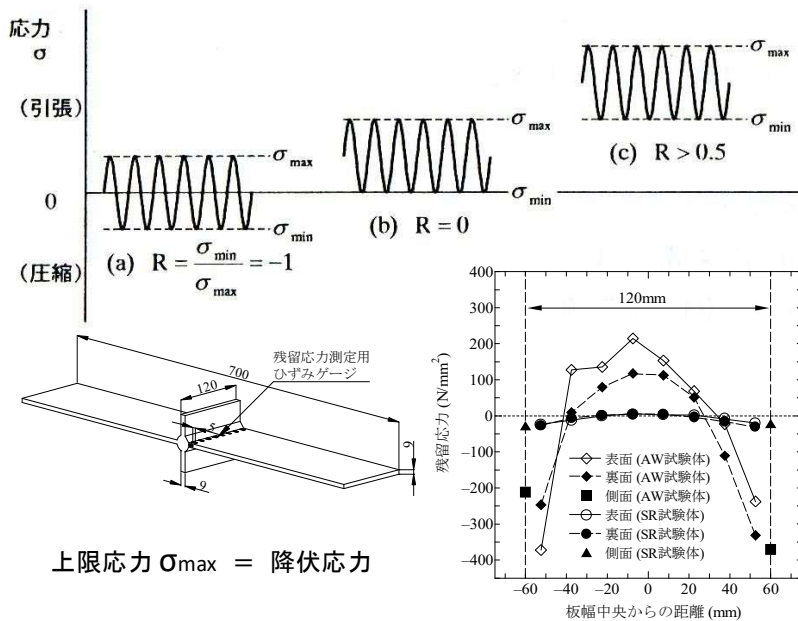
荷重伝達型と荷重非伝達型継手



力の流れ

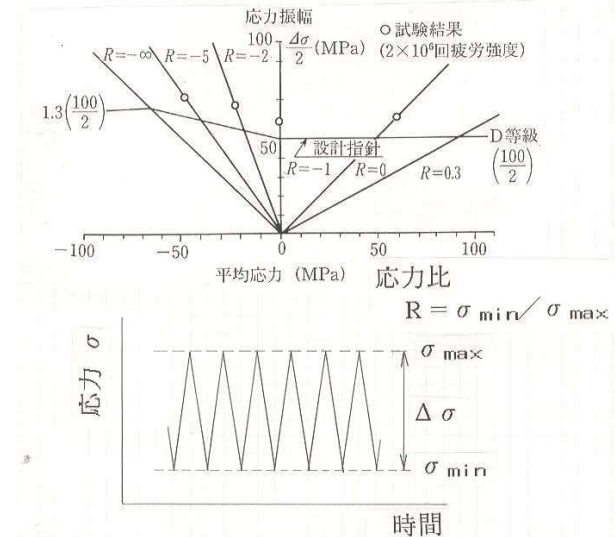


平均応力(応力比)と残留応力の影響



平均応力の影響

$$CR = \{1.3(1-R) / (1.6-R)\} \quad (R \leq -1)$$

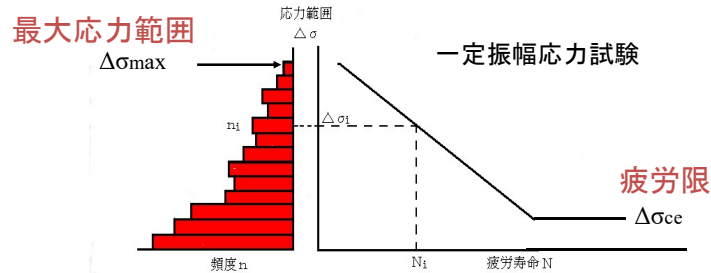


4. 疲労照査

<疲労限照査①>

着目部に生じる最大応力範囲が疲労限を超えなければ疲労亀裂は生じない。

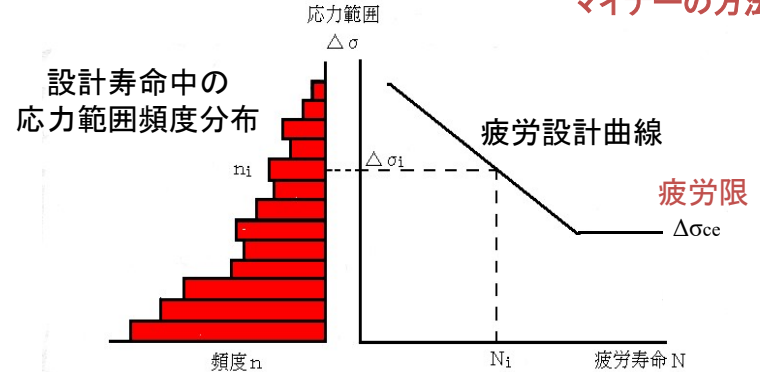
$$\Delta\sigma_{max} \leq \Delta\sigma_{ce}$$



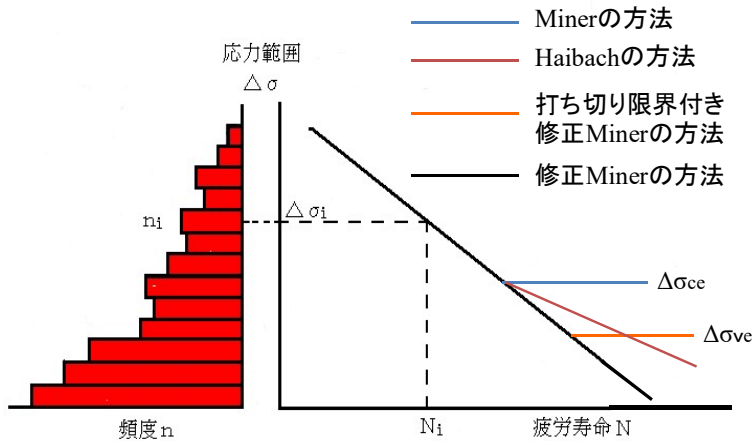
<疲労照査② 累積疲労損傷比を用いた照査>

$$\text{累積疲労損傷比 } D = \sum \frac{n_i}{N_i} \leq 1$$

マイナーの方法



累積疲労損傷比算出上の問題点

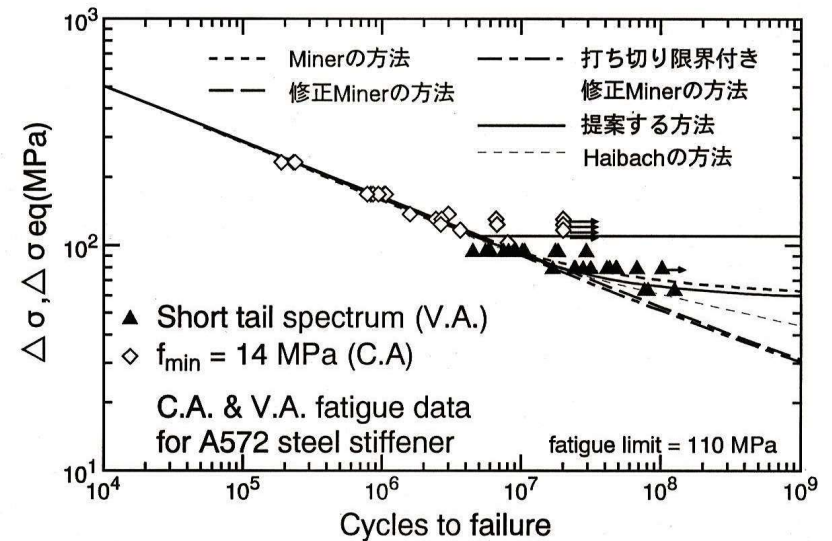


どの寿命評価方法（設計曲線）を用いるべきか？

Minerの方法：危険側の評価

修正Minerの方法：安全側過ぎる評価

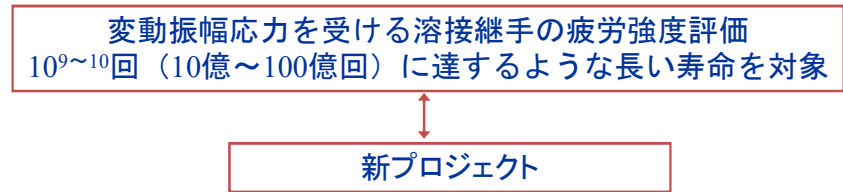
各方法による評価結果の比較



変動応力のパターンは無限にある。

道路橋を対象として設計供用期間100年を考えた場合、応力繰返し数が $10^9 \sim 10^{10}$ 回に達することもある。

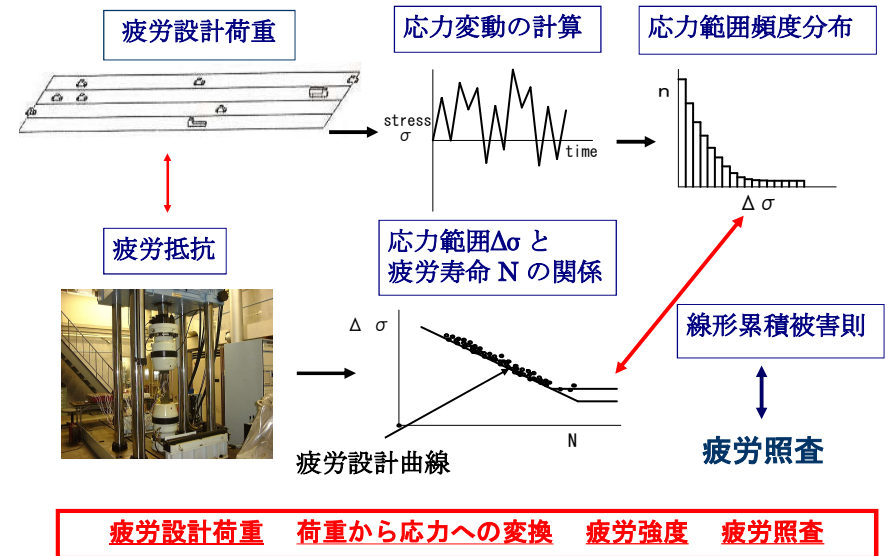
従来行われている 10^7 回オーダーまでの寿命領域では、どの方法が適切か優劣はつけがたい。



10^9 回(10億回)の疲労試験

10Hz → 1日80万回 → 1ヶ月2500万回 1年3億回 → 4年10億回

疲労設計の基本的な流れ・考え方



International Institute of Welding

国際溶接学会



RECOMMENDATIONS FOR FATIGUE DESIGN OF WELDED JOINTS AND COMPONENTS

溶接継手と部材の疲労設計指針

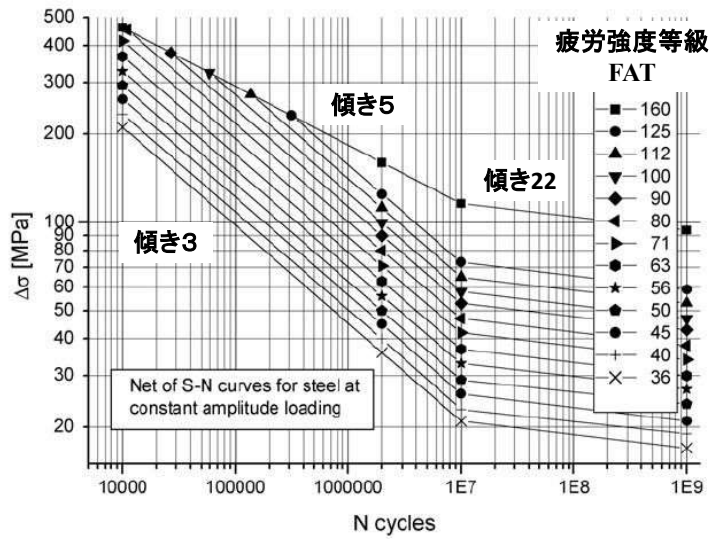
2009年

目次

- 1 一般
- 2 疲労作用(荷重)
 - 規定なし、ただし重要
 - 応力の定義と求め方
 - 公称応力、ホットスポット応力、有効切欠き応力、応力拡大係数
- 3 疲労抵抗(疲労強度)
 - 公称応力、ホットスポット応力、有効切欠き応力、疲労き裂進展
- 4 疲労照査
 - 線形累積被害則(Haibachの方法)
 - き裂進展解析
- 5 安全性
 - 部分安全係数
- 6 付録
- 7 参考文献

公称応力範囲に対する疲労強度曲線

超長寿命域を考慮した $\Delta\sigma$ -N関係



53

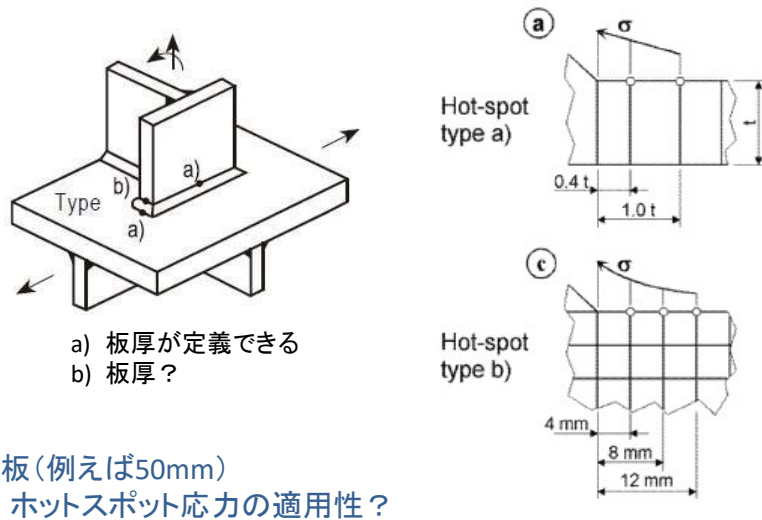
FATの例

54

No.	Structural Detail	Description (St.= steel; Al.= aluminium)	FAT St.
522		Longitudinal fillet welded gusset with radius transition, fillet weld around end and toe ground. $c < 2t$, max 25 mm $r > 150$ mm	90
523		Longitudinal fillet welded gusset with smooth transition (sniped end or radius) welded on beam flange or plate, fillet weld around end. $c < 2t$, max 25 mm	71 63
524		Longitudinal flat side gusset welded on plate edge or beam flange edge, with smooth transition (sniped end or radius), fillet weld around end. $c < 2t_2$, max. 25 mm	50 45

ホットスポット応力の求め方

55

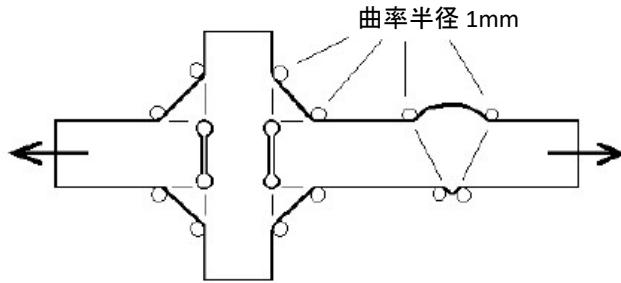


ホットスポット応力を用いた場合の疲労強度

56

No.	Structural detail	Description	Requirements	FAT Steel
1		Butt joint	As welded, NDT JSSC: 80 (E)	100
2		Cruciform or T-joint with full penetration K-butt welds	K-butt welds, no lamellar tearing JSSC: 80 (E)	100
6		Cruciform joints with load-carrying fillet welds	Fillet welds, as welded JSSC: 65 (F)	90
7		Lap joint with load-carrying fillet welds	Fillet welds, as welded JSSC: ?	90

有効切欠き応力の求め方



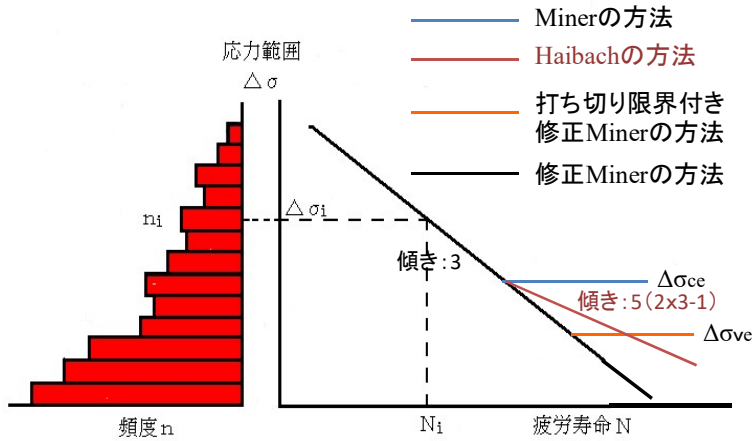
板厚 5mm以上
 止端を仕上げ場合には、そのままの曲率半径
 溶接方向に大きな応力が作用する場合には適用外

き裂発生: OK
 き裂進展?: 応力分布(応力勾配を考慮)

有効切欠き応力を用いた場合の疲労強度

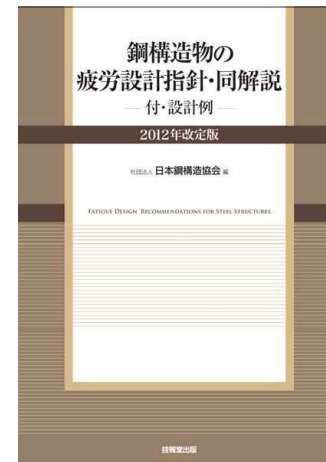
No.	Quality of weld notch	Description	FAT
1	Effective notch radius equal to 1 mm replacing weld toe and weld root notch	Notch as-welded, normal welding quality m=3	225

疲労照査(線形累積被害則)



$$D = \sum_1^i \frac{n_i}{N_i} \leq 0.5 \dots 1.0$$

日本鋼構造協会
 「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」
 付・設計例 2012年改定版



改定の経緯と
 主な改定内容

日本鋼構造協会・疲労設計指針（2012年版）の作成経緯

- 1974年「日本鋼構造協会疲労設計指針(案)」出版
- 1986年「疲労設計指針改定小委員会」設立（三木委員長）
- 1989年「鋼構造物の疲労設計指針(案)」出版
指針と解説
- 1993年「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」出版
指針、解説、設計例、裏付け資料

構造物を特定しない、モデルコード

道路橋、鉄道橋、クレーン、建築構造物の疲労設計基準の基礎

1989(1993)年版指針

名大・山田研究室で収集された疲労試験データベースに基づいて
各溶接継手の疲労強度曲線と等級の見直し

1974年度版 $\Delta\sigma$ -N関係の傾き $m=5$

1989年度版 $\Delta\sigma$ -N関係の傾き $m=3$

1990年ころ

溶接方法が被覆アーク溶接(手溶接)から CO_2 溶接に変更

疲労強度は同じ？

CO_2 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？

1990年以降の疲労試験データ収集し、データベース化
(10,224データ)

前指針改定後の研究成果

- ・ホットスポット応力の求め方と疲労照査
- ・破壊力学を用いた疲労照査
- ・疲労強度改善法
- などなど

疲労強度に関する主な改定内容

- ・疲労強度に対する鋼材の静的強度の影響
- ・疲労強度に対する溶接法および溶接材料の影響
- ・疲労強度等級の見直し
- ・桁ウェブのスカラップ部の疲労強度評価
- ・疲労強度に対する板厚の影響
- ・疲労強度改善(止端処理)
- ・新しい継手の疲労強度等級
- ・組み合わせ応力の取り扱い

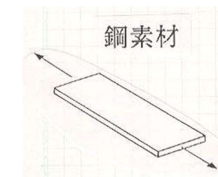
<データベースの構築>

データベース : Microsoft Access
 データ : 疲労試験を行った研究論文
 データシートの形で公表された文献

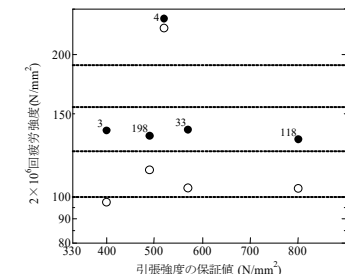
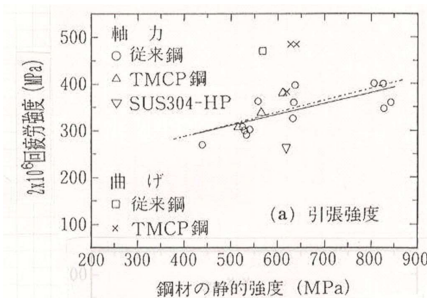
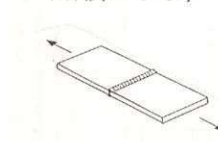
継手 非溶接		継手 十字溶接	
溶接継手 溶接継手 溶接継手		溶接継手 溶接継手 溶接継手	
溶接継手 溶接継手 溶接継手		溶接継手 溶接継手 溶接継手	
	(197シリーズ)		(514)
	(380)		(417)
	(87)		(18)

収集した疲労試験データ: 1,613シリーズ
 (Δσ-Nデータ: 10,224)

鋼材の静的強度 レベルの影響



横突合せ溶接継手
(溶接のまま)



溶接材料の影響

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板厚の溶接に使用。溶接形状が凸となりやすい。

イルミナイト系: 作業性機械的性質共良好で、あらゆる構造物に使用。溶接形状は低水素系に比べ良好なビード外観と形状。

半自動溶接(溶接ワイヤ)

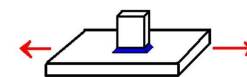
ソリッドワイヤ: 溶接形状が凸となりやすい。

フラックス入りワイヤ: ソリッドワイヤに比べ良好な溶接ビード外観と形状。

溶接材料の影響 <面外ガセット溶接継手>

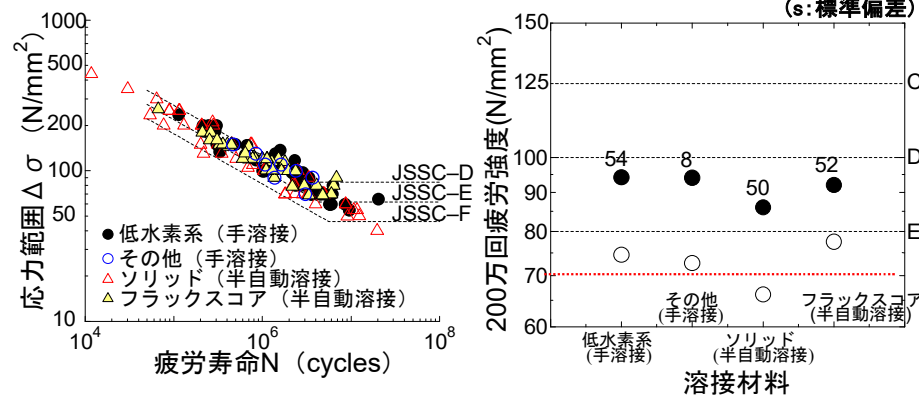
検索条件

- ・板厚: 25mm以下
- ・溶接後処理: 非仕上げ
- ・軸力疲労試験



● 平均
○ 平均-2s

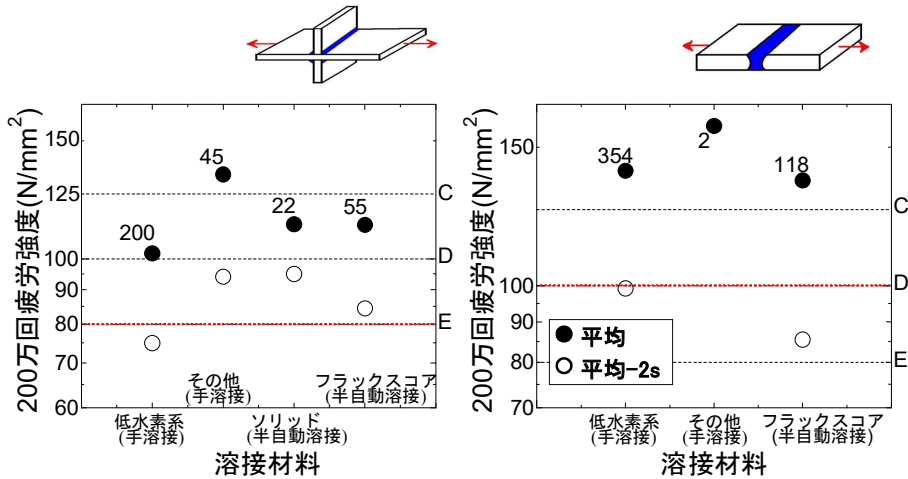
(s: 標準偏差)



溶接材料の影響

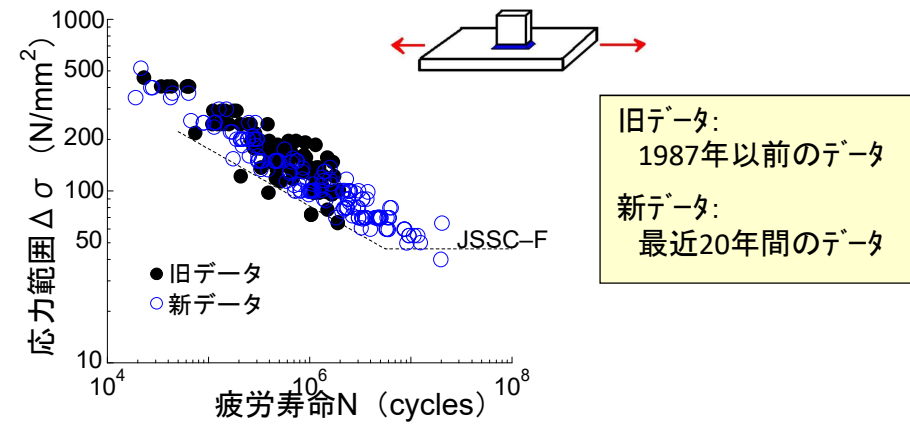
<荷重非伝達型十字溶接継手>

<横突合せ溶接継手>



疲労強度等級の見直し

旧データと新データの比較 ~面外ガセット溶接継手~



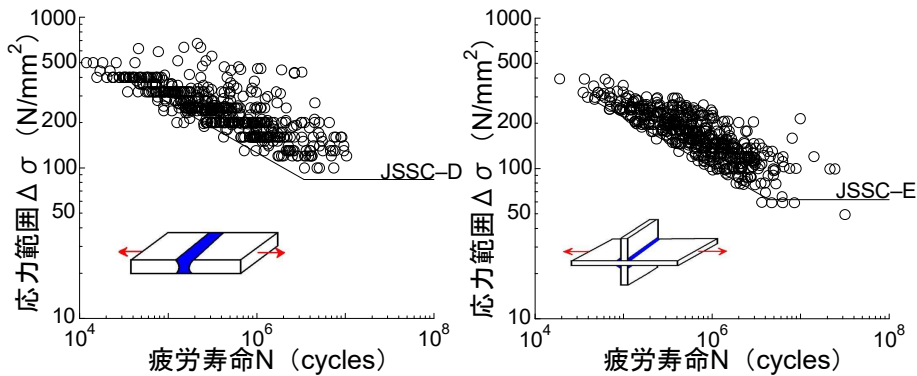
旧データ:
1987年以前のデータ
新データ:
最近20年間のデータ

疲労強度等級の見直し

JSSC指針の疲労強度等級の見直し

<横突合せ溶接継手>

<荷重非伝達型十字溶接継手>

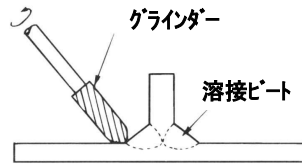


疲労強度等級の見直し

継手形式		提案する等級	JSSC指針
横突合せ溶接継手 	止端仕上げ	C	C
	非仕上げ	D	D
縦方向溶接継手 	余盛除去	B	B
	非仕上げ	C	C
十字溶接継手 	荷重非伝達型	止端仕上げ	D
		非仕上げ	E
	荷重伝達型	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

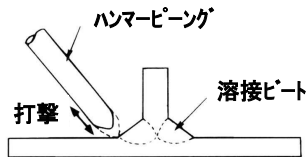
応力集中低減(溶接部形状の改善)

- ・ グラインダー処理: 溶接止端を研削



応力集中低減(溶接部形状の改善)+残留応力のコントロール

- ・ ピーニング処理: ハンマーを用いて強い力で打撃



止端の曲率半径

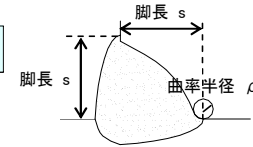
3mm以上、削り込み深さ0.5mm以下

具体的な施工方法(共同研究)

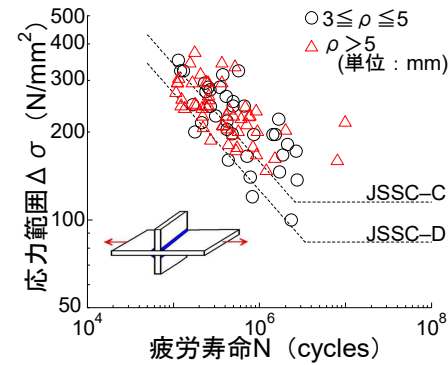
「溶接止端仕上げの手引き」日本橋梁建設協会
2012年4月

工具、仕上げ方法、仕上げ範囲、品質確認

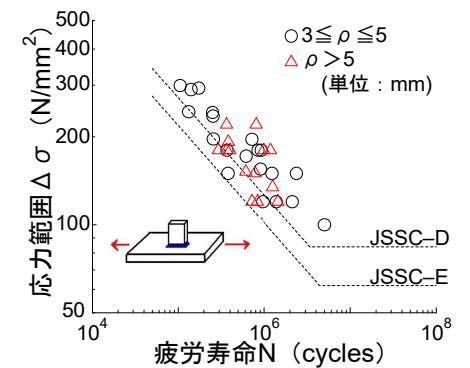
止端形状の影響



<荷重非伝達型十字溶接継手>



<面外ガセット溶接継手>

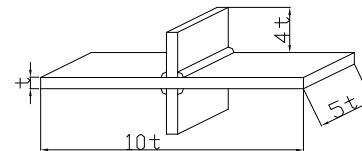


止端仕上げの効果 ~応力解析~

解析対象

板厚 $t=9, 12, 18, 24, 35, 54, 75\text{mm}$
曲率半径 $\rho=3, 5\text{mm}$

<荷重非伝達型十字溶接継手>



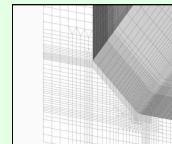
疲労強度改善率

$$\frac{\alpha_{\rho=1}}{\alpha_{\rho=3}}, \frac{\alpha_{\rho=1}}{\alpha_{\rho=5}}$$

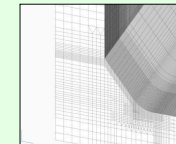
$\alpha_{\rho=1}$: $\rho=1\text{mm}$ の応力集中係数
 $\alpha_{\rho=3,5}$: $\rho=3\text{mm}, 5\text{mm}$ の応力集中係数

止端溶接部要素

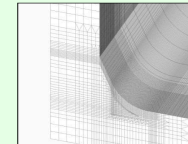
$\rho=1.0\text{mm}$ (溶接のまま)

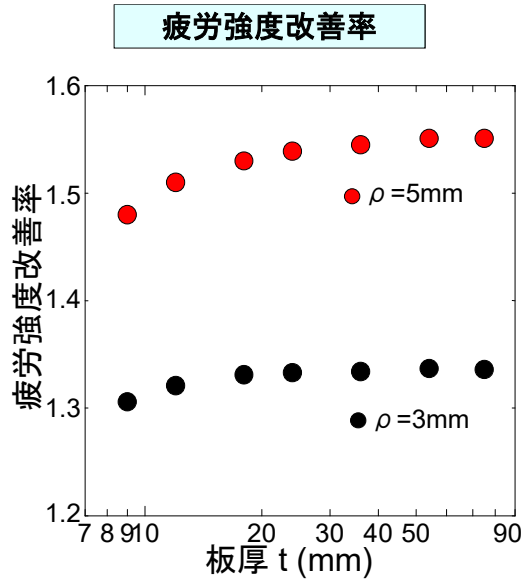


$\rho=3.0\text{mm}$



$\rho=5.0\text{mm}$





曲率半径3mm以上
疲労強度等級
1ランクアップ

曲率半径5mm以上
疲労強度等級
2ランクアップ

ピーニングの効果

形状改善 + 圧縮残留応力

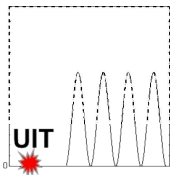
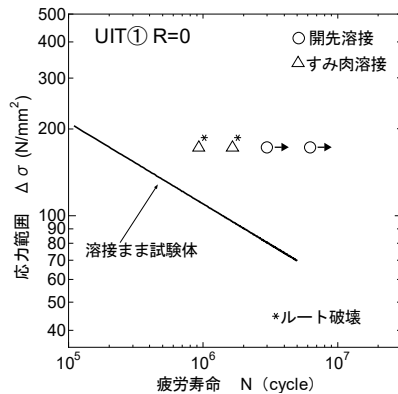
圧縮残留応力の効果

過大応力、高い平均応力 で消失する恐れ

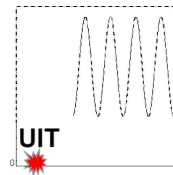
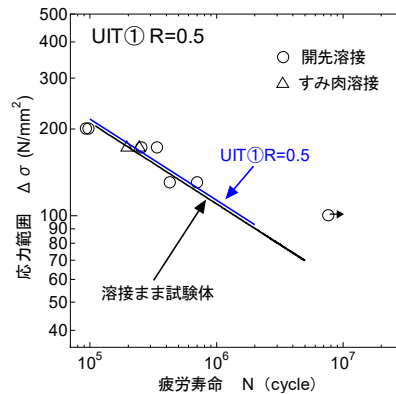
指針では疲労強度改善を実験で確かめる

使用条件を考える？

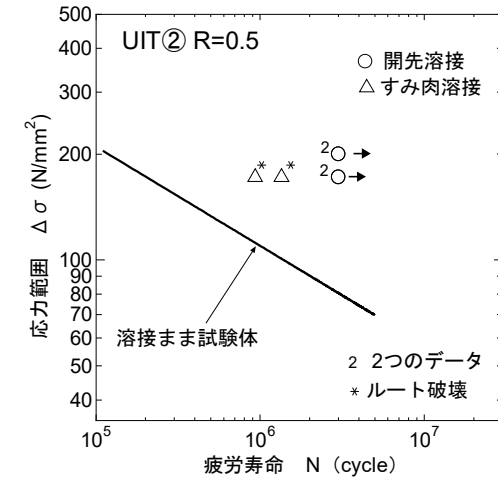
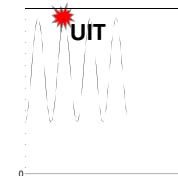
下限応力≒0 応力比≒0



高い平均応力 応力比=0.5



既設構造物への適用



＜これからの鋼橋の疲労設計＞
これまでの設計法の問題点

より合理的な疲労設計荷重の設定

構造計算の高度化

- ・鋼道路橋に生じている疲労損傷の多くは、現在の「鋼道路橋の疲労設計指針」ではカバーすることのできない2次応力によるものである。
- ・構造解析係数は1.0とすべきである。橋梁形式によって異なる可能性が高い。

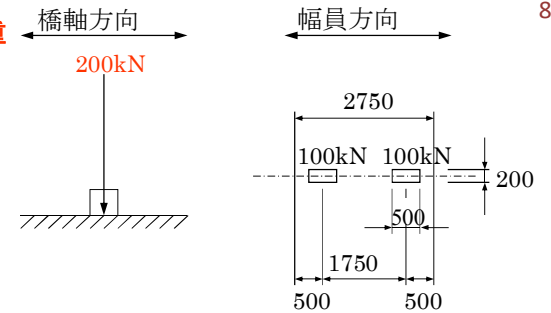
複雑な応力場での疲労強度評価

- ・多軸応力
- ・主応力方向の変化
- ・圧縮繰返し応力

鋼床版の疲労設計

81

疲労設計荷重：T荷重
(単軸荷重, 重量 200kN)



82

応力変動波形 [単軸荷重 → T荷重補正係数
多軸荷重]

車両の同時載荷による応力の増分 → 同時載荷係数

疲労設計荷重は最大級重量を有する多軸トラックをモデル化

疲労設計荷重の頻度：大型車の頻度？ → T荷重補正係数
頻度補正係数

疲労設計荷重 T荷重 (単軸荷重、200kN)

重量の修正

重量 = 200kN x γ_T x (1+i_f)

γ_T : 活荷重補正係数 (= γ_{T1} x γ_{T2})

γ_{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)

多軸の車両を1軸の荷重とみなす, 最大級重量の車両

γ_{T2} : 同時載荷係数

日大型車交通量 ADTT	基線長 (m)	
	>40m	≤40m
>2500台/車線	1.0	1.1
≤2500台/車線	1.0	1.0

衝撃係数 i_f : 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)

83

疲労設計荷重 T荷重 (単軸荷重、200kN)

重量 = 200kN x γ_T x (1+i_f)

γ_T : 活荷重補正係数 (= γ_{T1} x γ_{T2} x γ_{T3})

γ_{T1} : T荷重補正係数 (= $(\log(L) + 1.5) / 3$, $0.7 \leq \gamma_{T1} \leq 1.0$)

L: 影響線の基線長 (m)

γ_{T2} : 同時載荷係数

γ_{T3} : 路線係数 (予想交通状態による, 決め方のガイドライン)
標準的には1.0

衝撃係数 i_f : 断面設計に用いられる衝撃係数の半分

疲労設計荷重の頻度

設計供用期間内の大型車交通量

頻度補正係数を廃止して, 路線係数の導入

84

構造計算の高度化

桁形式の鋼橋の断面設計 → 格子解析

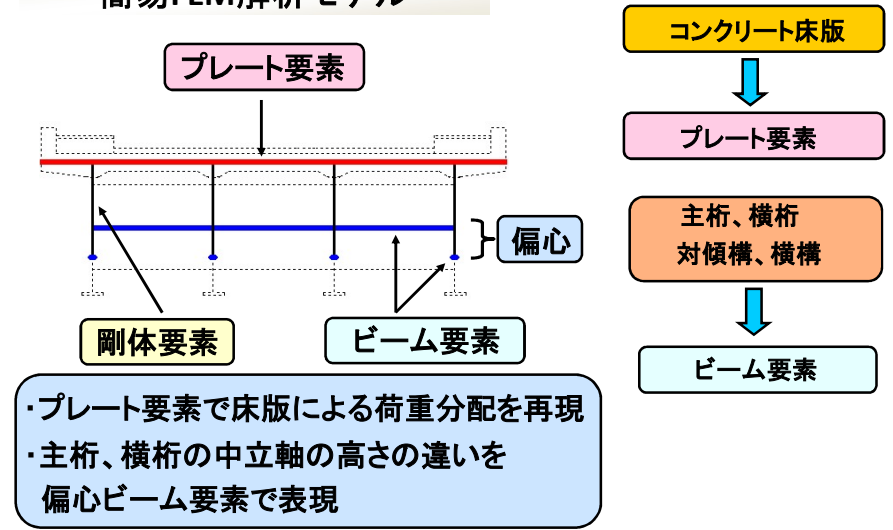
格子解析の問題点

- ・主桁・横桁交差部を単純化している！
- ・床版の上フランジとしての効果を有効幅のみ！

実際の応力状態を正確に表すのは困難！

ソリッド要素を用いた実橋モデルによる有限要素解析が望ましい！

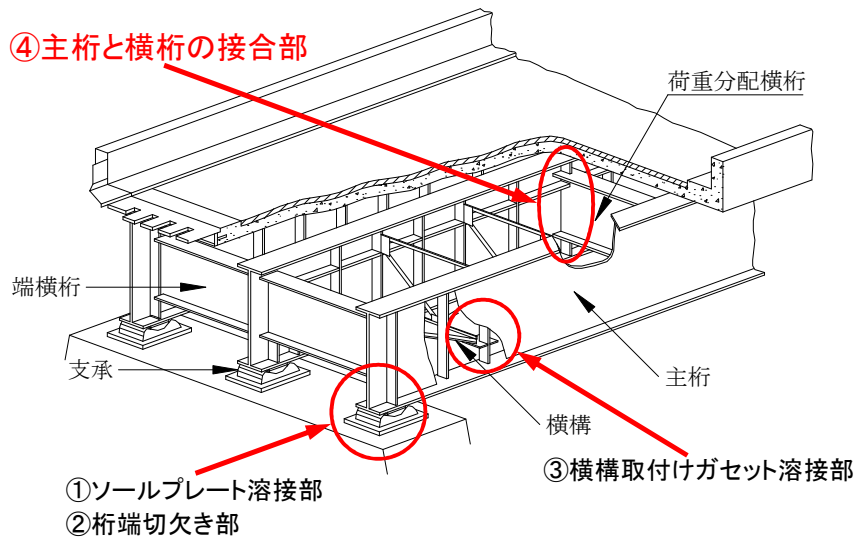
簡易FEM解析モデル



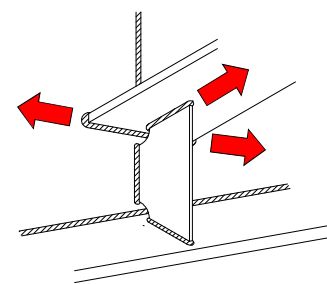
断面力の算出 → 公称応力の算出

複雑な応力場の疲労強度

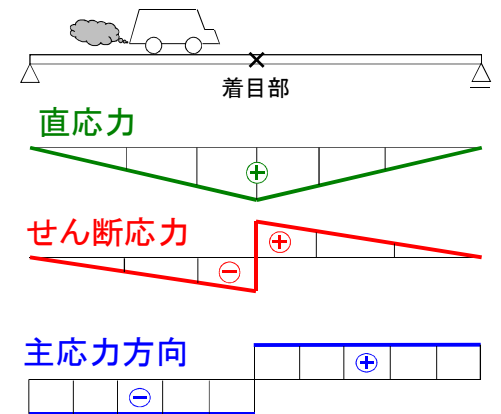
④主桁と横桁の接合部



多軸応力



主応力方向の変化

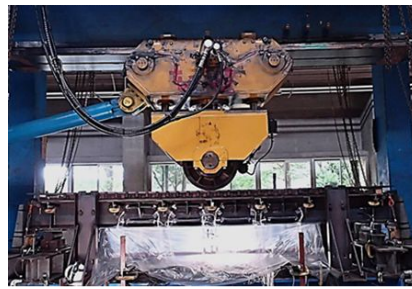


主応力方向の変化

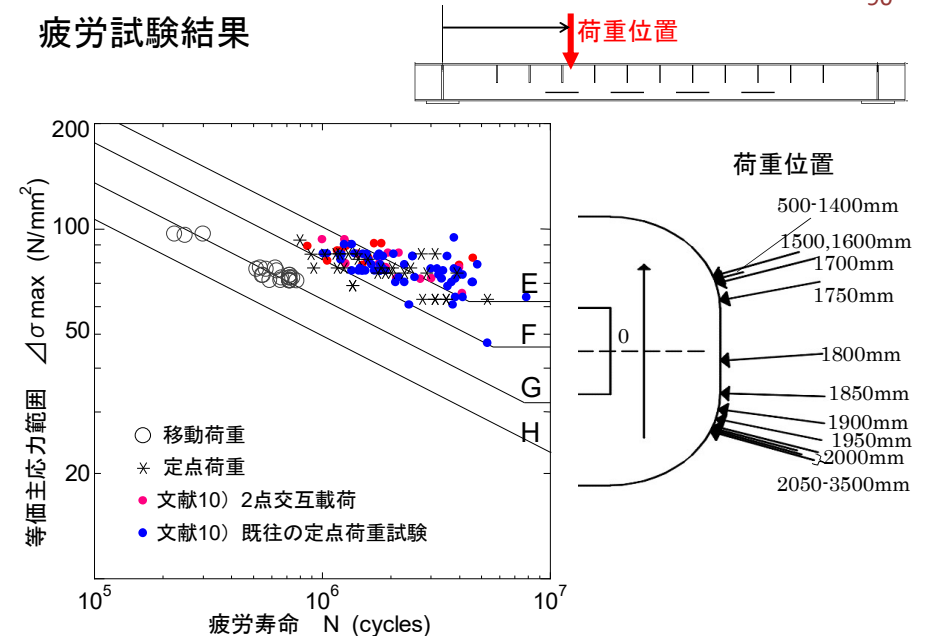
定点荷重疲労試験



移動荷重疲労試験

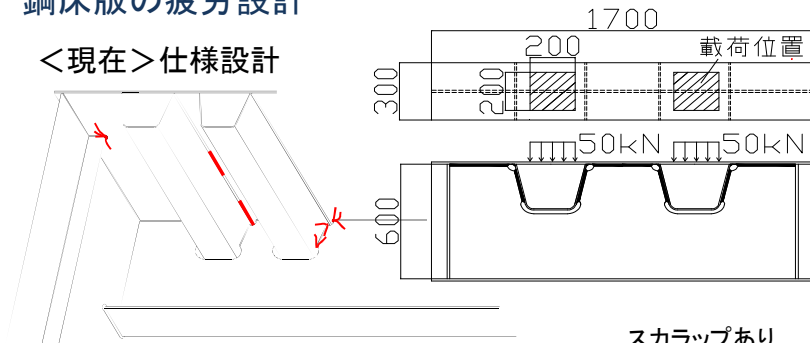


疲労試験結果



鋼床版の疲労設計

<現在>仕様設計



- (1) 縦リブ (トラフリブ) 支間を2.5m以下とする。
- (2) 幅320mmのトラフリブを用いる。
- (3) トラフリブとデッキプレートの溶接の溶込みはリブ板厚の75%以上とする。
- (4) トラフリブどうしの接合は高力ボルト摩擦接合継手とする。
- (5) 縦リブと横リブの交差部にはスカルップは設けない。
- (6) デッキプレート厚は16mmを標準とする。

スカルップあり
↓
スカルップなし

デッキプレート厚12mm

↓
デッキプレート厚16mm

スカルップなしの構造

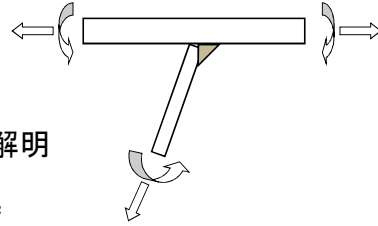


応力ベースの疲労照査

疲労設計荷重(車輪)
断面力の計算→応力計算

小型試験体による疲労強度の解明

応力計算結果 ↔ 疲労強度



新しい疲労設計

現在の不備を改善する, 最新の知識・知見を導入する
理解しやすい・使いやすい

- ・道路協会・橋梁委員会・鋼橋小委員会・疲労WG
「鋼道路橋の疲労設計指針」2002年
の改定(芝浦工業大学 穴見先生)
- ・鋼構造協会「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」
1974年, 1993年, 2012年, 次は?

施工法や品質と疲労強度の関係?

日本橋梁建設協会の役割?
疲労フリーの鋼橋?