

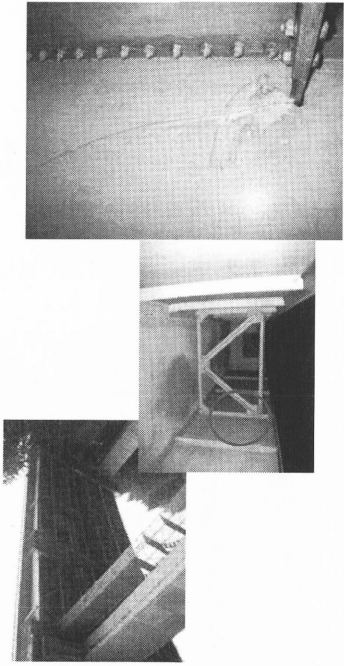
疲労のメカニズムと
疲労設計および疲労対策技術

森 猛

法政大学

疲労のメカニズムと疲労設計 および疲労対策技術

法政大学 森 猛



1

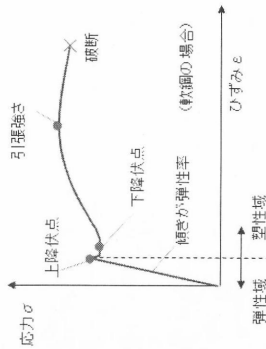
- 1993年4月
日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説
- 2002年3月
日本道路協会: 鋼道路橋の疲労設計指針
- 2010年11月?
日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説
(改訂版)

1. 鋼道路橋の疲労設計(疲労のメカニズム)
2. 疲労対策(疲労強度改善法)
3. 鋼桁橋の疲労耐久性(形式、支間、鋼材の影響)

2

鋼材の破壊

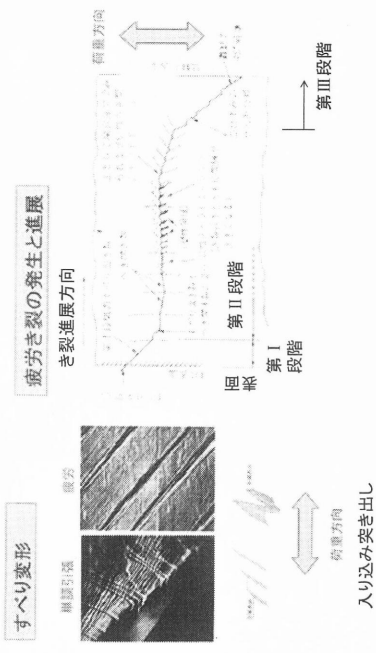
- 延性破壊
- 脆性破壊
- 疲労破壊
- 応力腐食割れ(遅れ破壊)



疲労

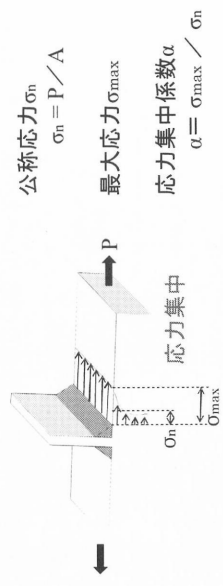
1回の作用では問題のない応力レベルであっても、繰り返し作用することにより、微少なき裂が発生して、それが進展し破断に至る現象

疲労のメカニズム



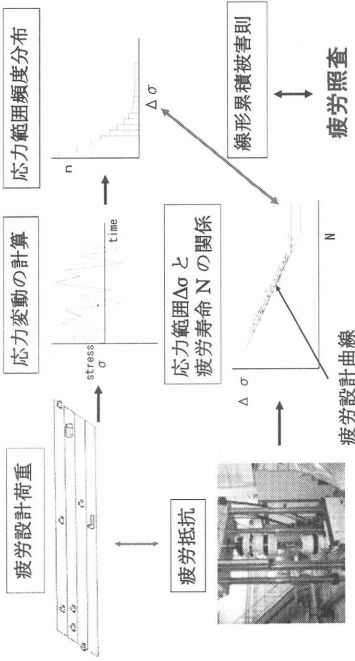
4

なぜ溶接継手で疲労が問題となるのか



形状不連続
溶接さず(アンダーカット、ブローホール)
残留応力

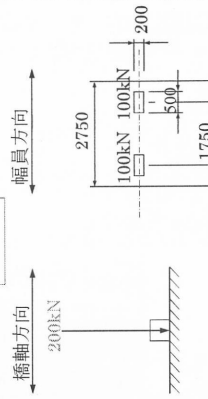
疲労設計の基本的な流れ・考え方



疲労設計荷重 荷重から応力への変換 疲労強度 疲労照査

5

疲労設計荷重
(鋼道路橋の疲労設計指針)



疲労設計荷重の補正

大型の走行頻度

重量の補正

$$\text{重量} = 200\text{kN} \times \gamma_1 \times (1+i/f)$$

γ_1 : 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)

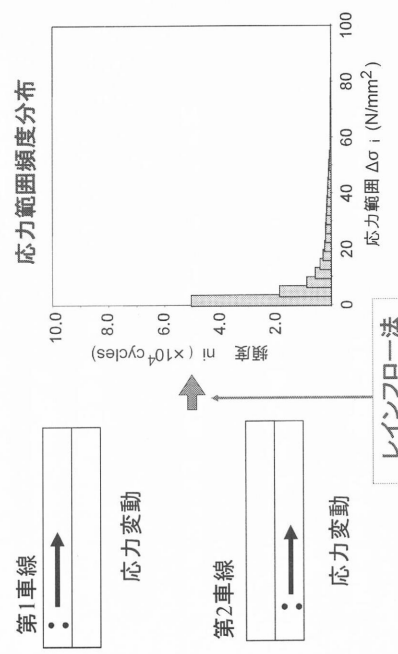
γ_{T2} : 同時載荷係数

γ_f : 衝撃係数

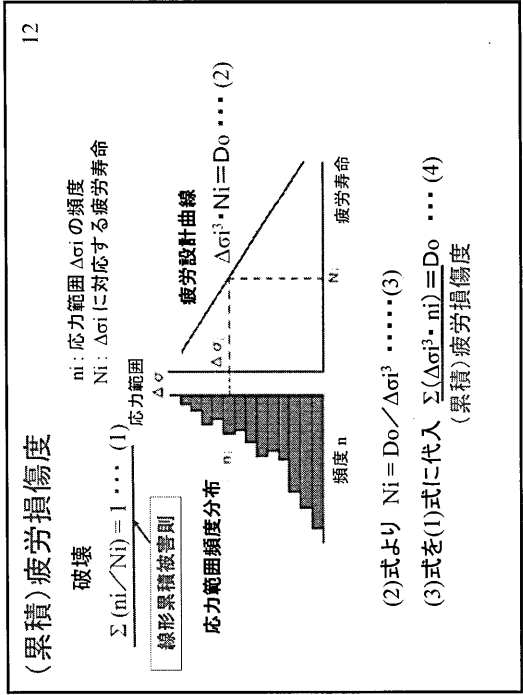
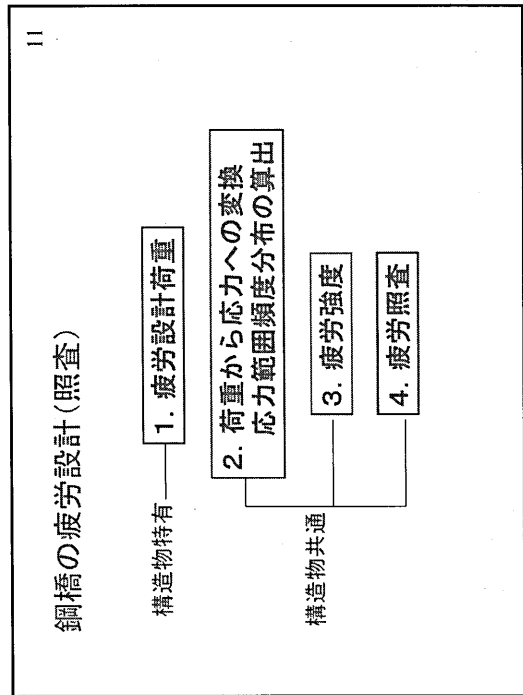
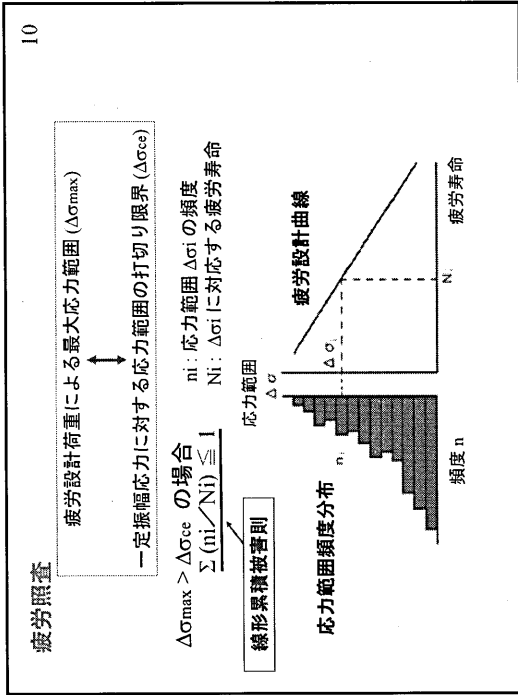
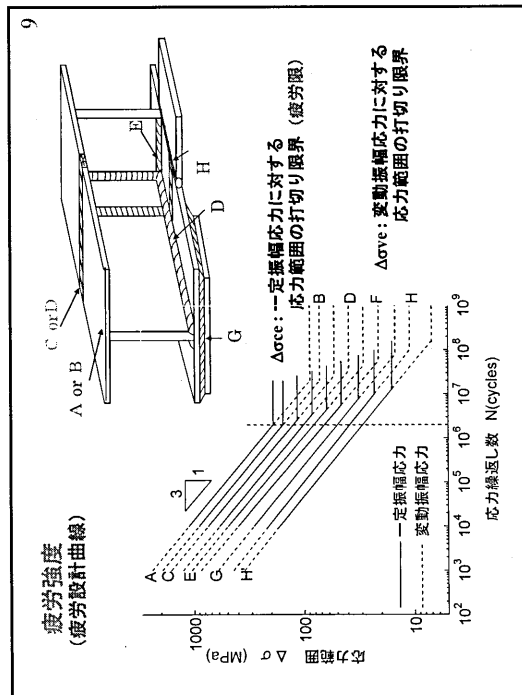
γ_{T1} : 単軸のT荷重で最大級重量の多軸車両をモデル化

γ_{T2} : 車両の同時載荷

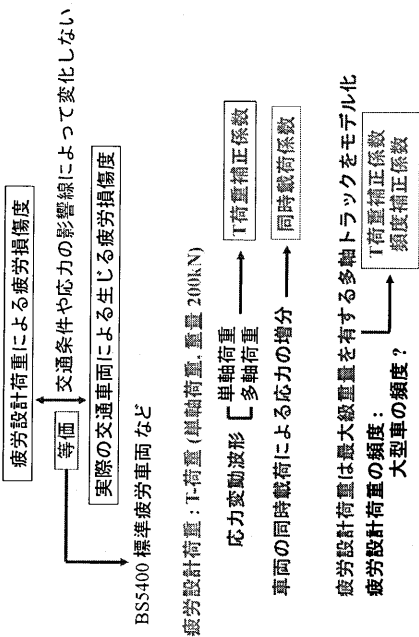
応力範囲頻度分布の計算



8

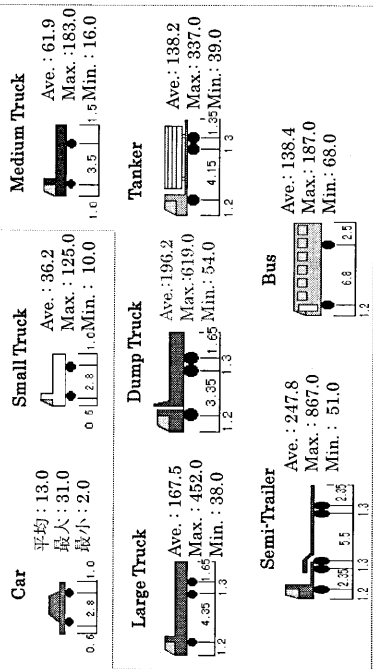


1. 疲労設計荷重の考え方

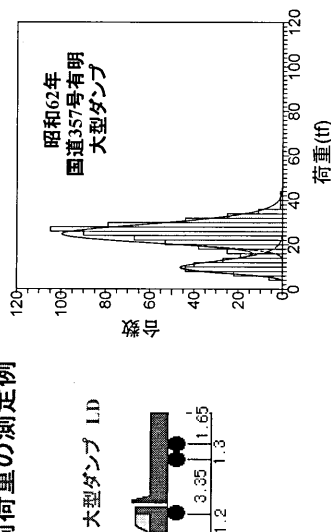


T 荷重補正係数

車両の形式と重量 (重量: kN)



車両荷重の測定例

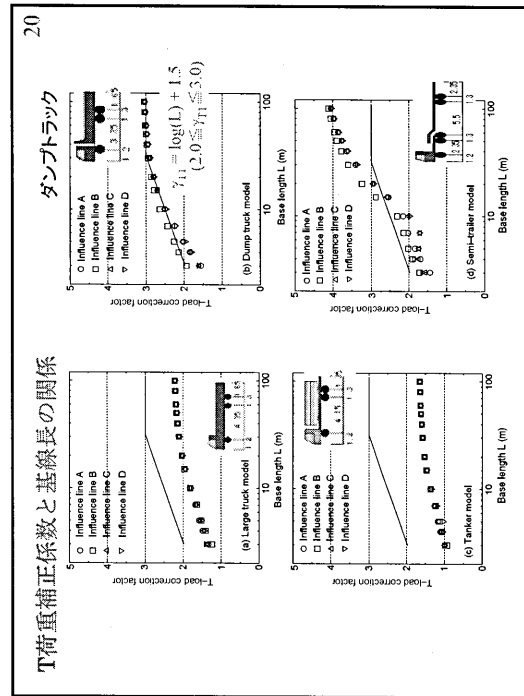
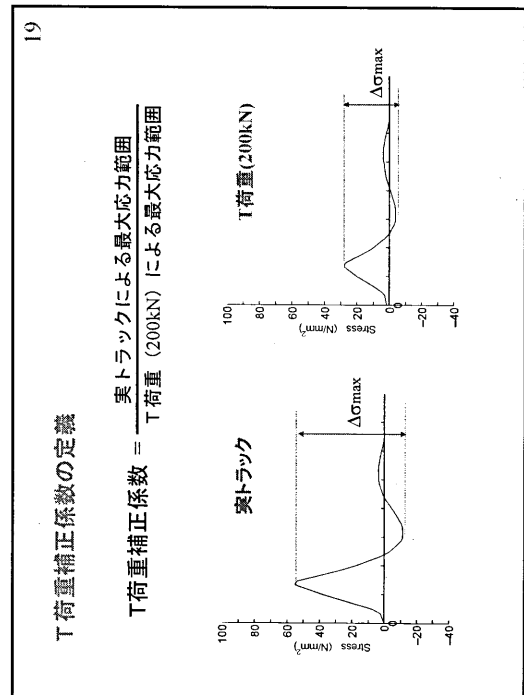
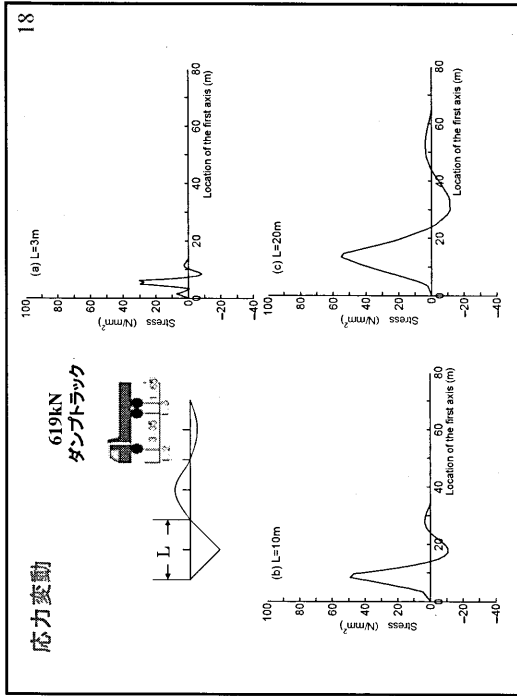
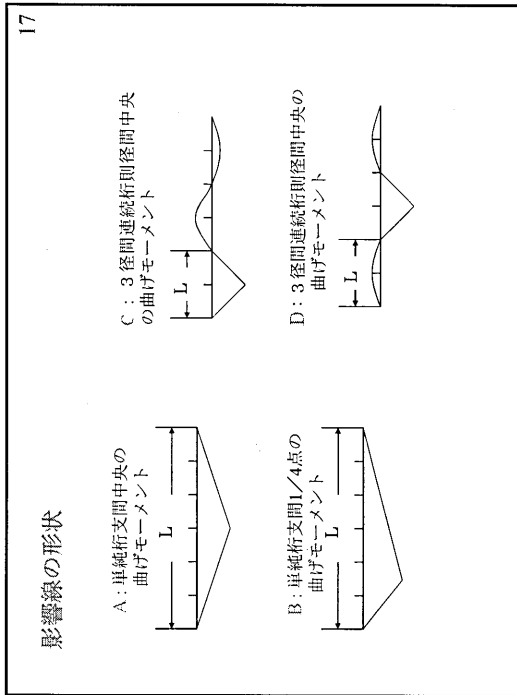


等価荷重 $P_{ei} = \sqrt[3]{\frac{\sum (\text{荷重} P_i^3 \times \text{頻度} n_i)}{\sum \text{頻度} n_i}}$ 24.45 tf

荷重の特性

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	小型トラック	中型トラック	大型トラック	大型ダンプ	タンクローリー	セミトレーラ	バス
C	ST	MT	LT	LD	TR	TT	BS
H4有明	3.13	4.72	7.43	18.82	24.68	17.83	33.22
S82有明	3.70	4.86	7.15	15.09	24.45	13.85	28.84
S59有明	1.92	4.26	7.15	17.41	21.56	16.27	30.74
S59藍谷	1.50	4.01	8.25	18.79	26.55	22.82	28.87
H4いわさ	2.80	3.71	8.80	23.26	26.83	20.29	32.92
H4千葉	2.59	3.88	7.28	21.46	31.32	14.47	44.29
H4草加	2.63	3.79	7.01	24.30	38.67	15.18	36.70
S82草加	3.32	4.59	7.42	18.42	31.72	14.47	31.52
S82八戸	3.49	5.19	7.48	17.96	26.82	17.21	23.28
							10.33



同時載荷係数

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

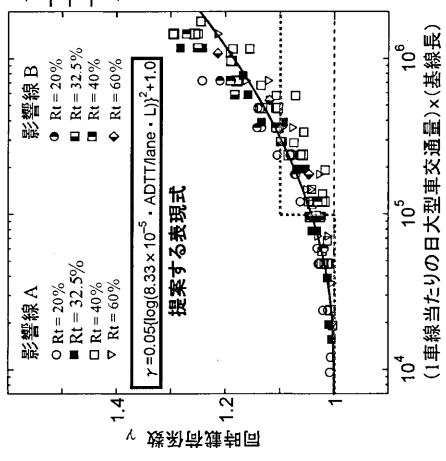
疲労損傷度 = $\Sigma (\Delta\sigma_i^3 \cdot n_i)$

モンテカルロシミュレーションの条件

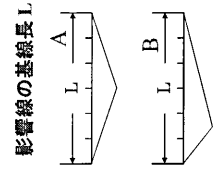
1車線当たりの交通量: 500 ~ 2500 台/時間
 車速: 50 ~ 100km/hr



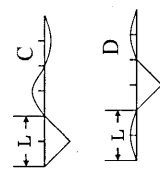
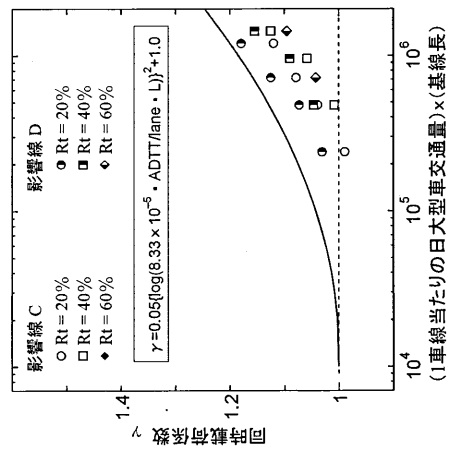
同時載荷係数の表現式



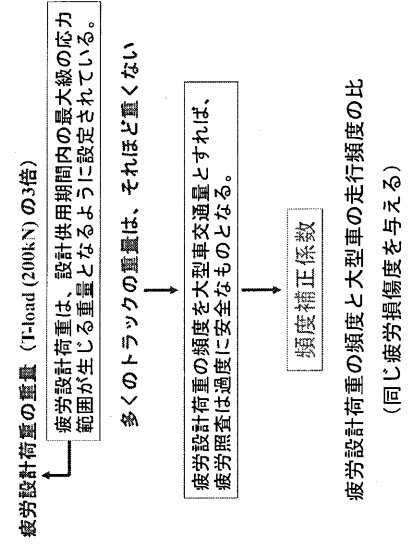
ADTT	L
~40m	40m
~2500	1.0
2500~	1.0
	1.1

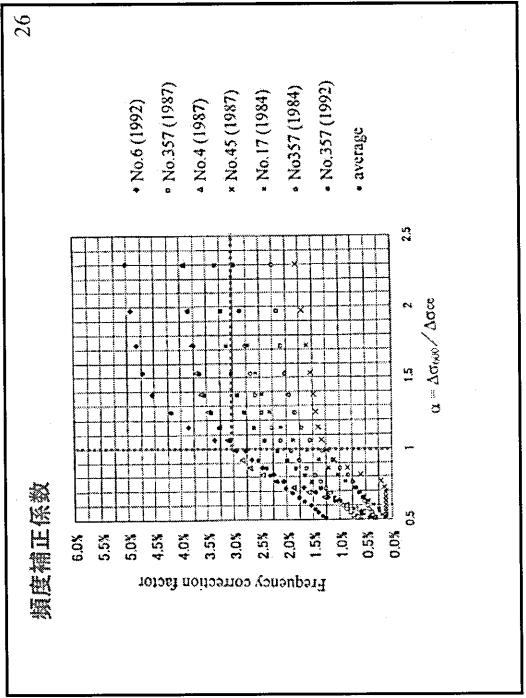
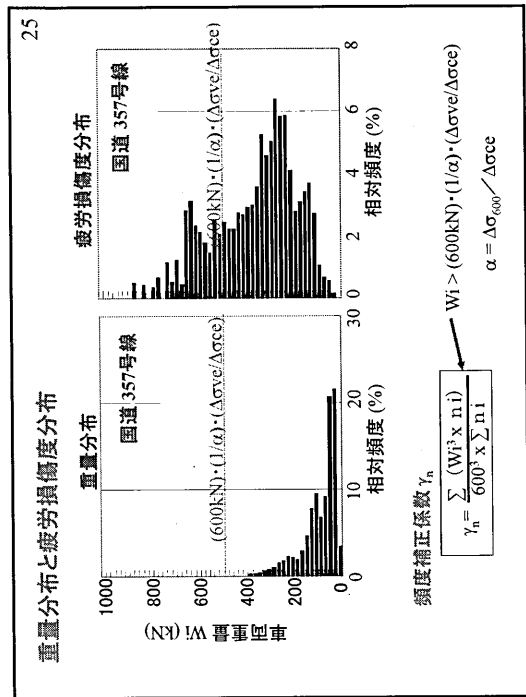


同時載荷係数 (影響線 C, D)



頻度補正係数





27

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_T)

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} : 同時荷重係数

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

i_T : 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)

28

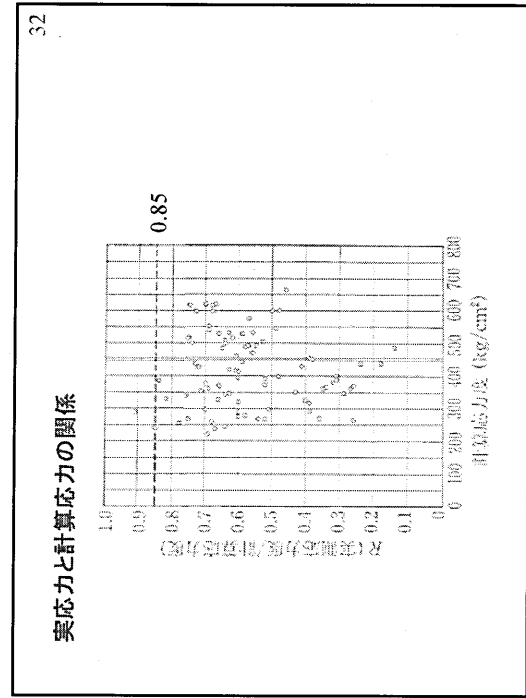
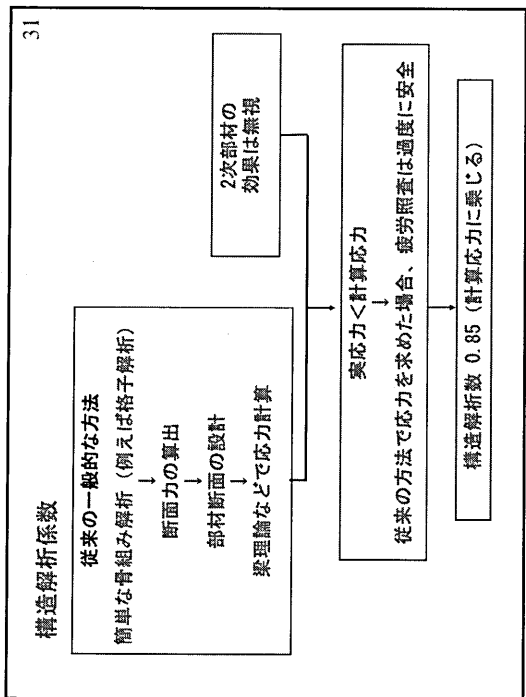
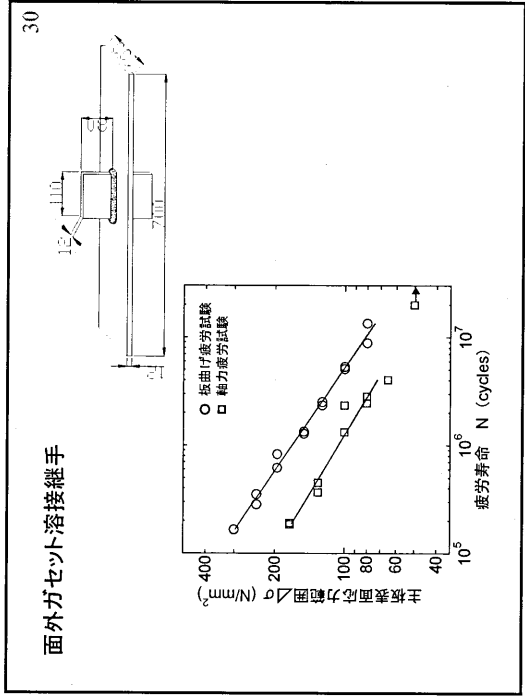
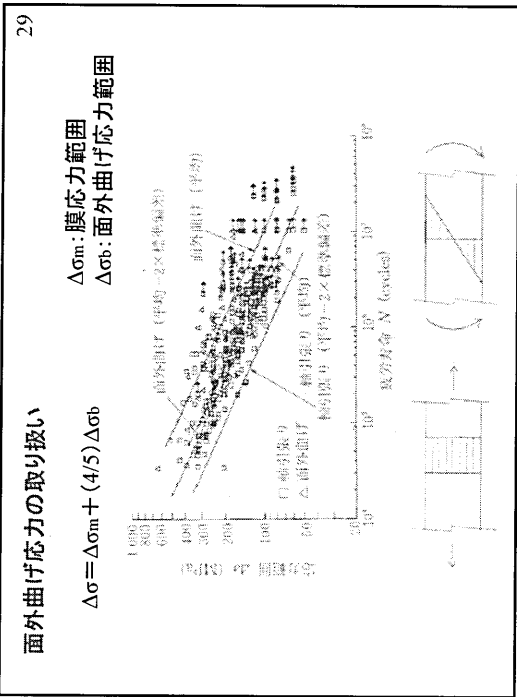
2. 荷重から応力への変換

着目位置の断面力の影響線 → 応力影響線
公称応力

stress σ

time

応力変動波形



実際の応力を求めるための方法

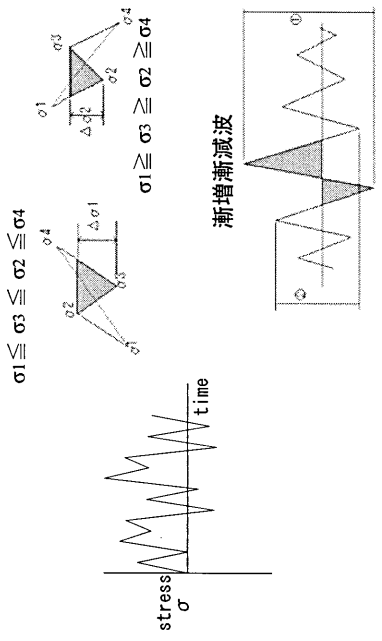
有限要素法の利用
(2次部材などを含めて橋梁全体を対象)

- ・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

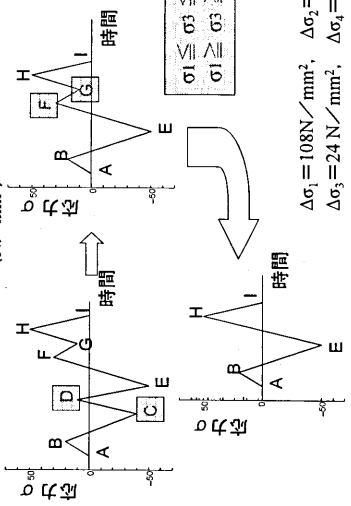
- ・どの程度までモデル化するのか
- ・要素の大きさや種類をどうするか
- ・どの部分の応力を疲労照査に用いるか

応力変動→(レインフロー法)→応力範囲頻度分布



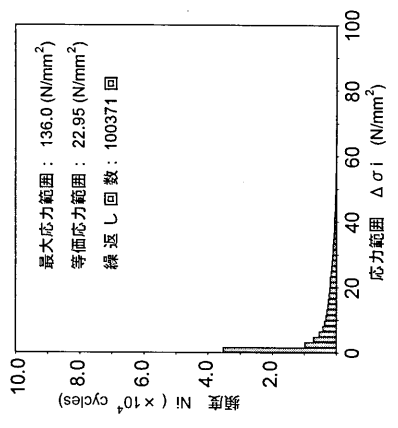
応力範囲の計算手順

$\sigma_A = 0$ $\sigma_B = 20$ $\sigma_C = -40$ $\sigma_D = 8$ σ_E
 $= -48$ $\sigma_F = 32$ $\sigma_G = 8$ $\sigma_H = 60$ $\sigma_I = 0$
 (N/mm²)



$\Delta\sigma_1 = 108 \text{ N/mm}^2$, $\Delta\sigma_2 = 48 \text{ N/mm}^2$
 $\Delta\sigma_3 = 24 \text{ N/mm}^2$, $\Delta\sigma_4 = 20 \text{ N/mm}^2$

設計寿命中の応力範囲頻度分布



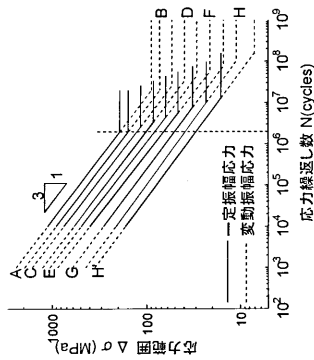
3. 疲労強度 ($\Delta\sigma-N$ 関係)

疲労寿命 = 亀裂発生寿命 + 亀裂進展寿命
 疲労発生寿命 : 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 ($\Delta\sigma-N$ 関係)

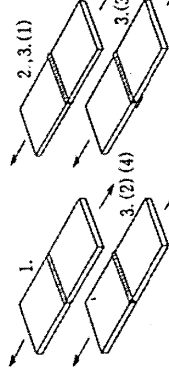
継手形式
 溶接部の仕上げ
 溶接さす

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



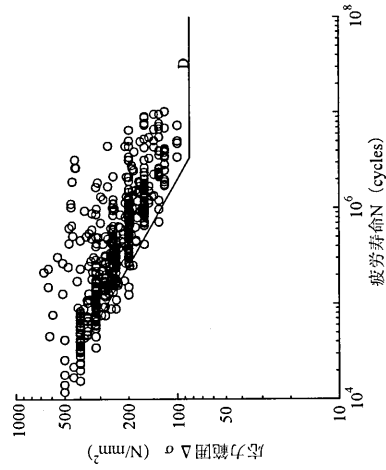
突合せ溶接継手

余盛を削除した継手 B (155MPa)
 非仕上げの両面溶接 D (100MPa)



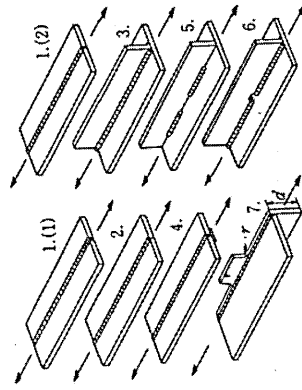
※ 完全溶込み溶接で、溶接部が継合であることを前提とする。
 ※ 継手部にチークが付く場合には、その勾配を1/5以下とする。
 ※ 深さ0.5mm以上のアンダーカットは除去する。
 ※ (1, 2)仕上げはアンダーカットが残らないように行う。仕上げの方向は応力の方向と平行とする。

非仕上げの両面溶接継手



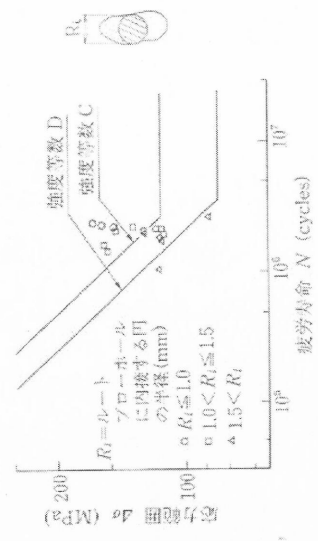
縦方向溶接継手

・すみ肉溶接継手
 ・部分溶け込み溶接
 C (125MPa)
 D (100MPa)
 溶接部の品質による



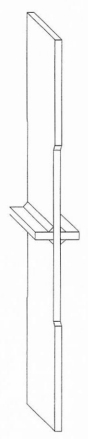
※ (1)(2), 2, 3.) 棒継ぎにより生じたピード表面の著しい凸凹は除去する。
 ※ (2, 3.)内径する穴幅(ブローホールなどの孔を帯びたものの)の幅が1.5mm、高さが4mmを超えないことが確かめられた場合には、強度等級を1つとすることができる。

溶接きず(ブローホール)の影響

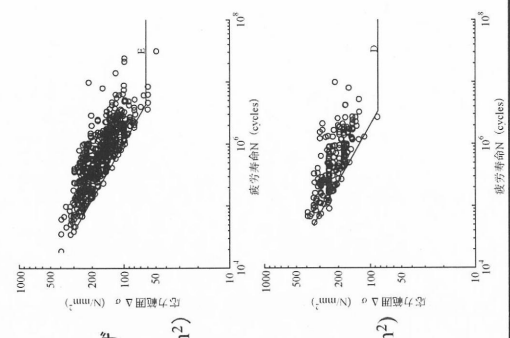


十字溶接継手

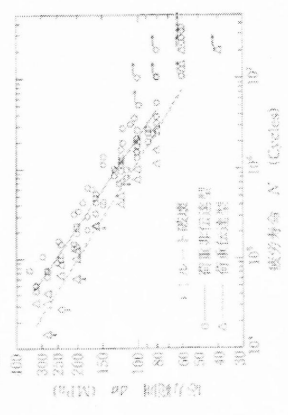
- 荷重非伝達型継手 D (100MPa)
- 止端仕上げした継手 E (80MPa)
- 非仕上げの継手 E (80MPa)
- 荷重伝達型 (止端破壊) E (80MPa)
- 止端仕上げした継手 F (65MPa)
- 非仕上げの継手 F (65MPa)



止端仕上げの効果 十字すみ肉溶接継手



荷重伝達型と荷重非伝達型継手



45

ガセット溶接継手
面外ガセット継手
 F (65MPa) $L \leq 100\text{mm}$
 G (50MPa) $L > 100\text{mm}$
 L: ガセットの取り付け長さ

※ (1.(1), 2., 4.(1), 5., 6.(1)) 仕上げはアンダーカットが壊れないように行う。クラインダーで仕上げる場合には仕上げの方向を応力の方向と平行とする。
 ※ (1.(2), 3., 4.(2), 6.(2), 7.) 長さ 0.5mm 以上のアンダーカットは除去する。

46

ガセットの取付け長さの影響
 100mm以下
 F (65MPa)
 100mm以上
 G (50MPa)

(1.(1), (2)) アンダーカットを必ず取り除く。あるいは面外溶接した継手(面外、長さ100mm、非仕上げ)
 疲労寿命 N (cycles)
 (1.(3)) アンダーカットを必ず取り除いた継手(面外、長さ100mm、非仕上げ)
 疲労寿命 N (cycles)

47

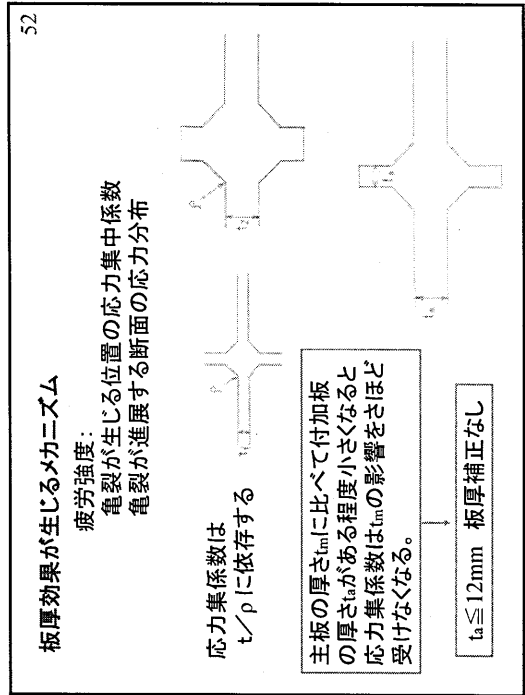
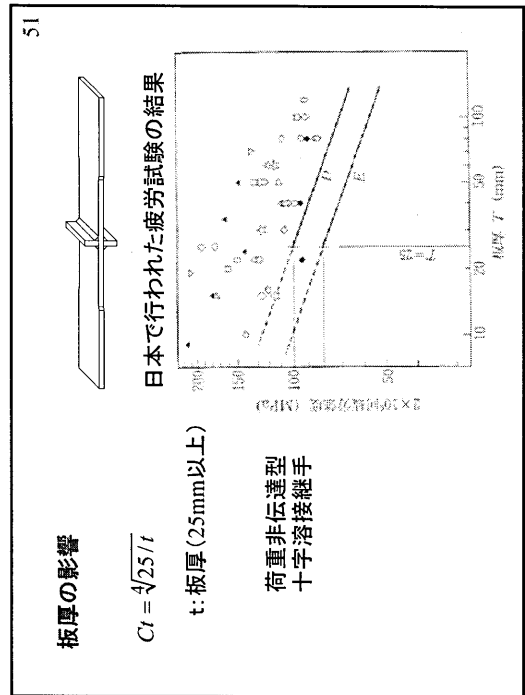
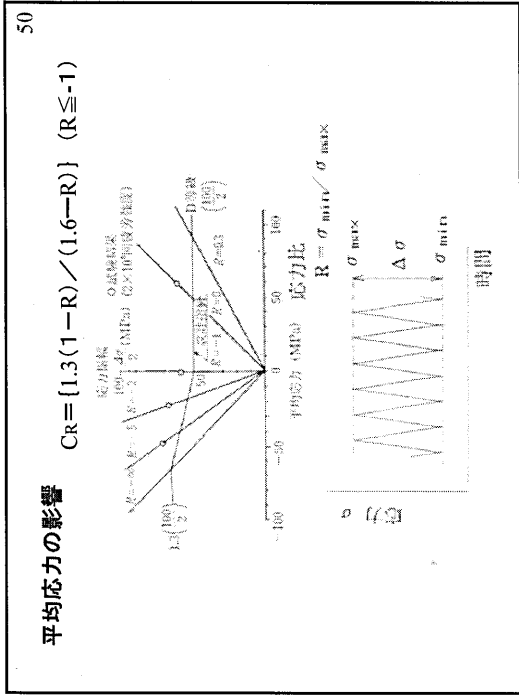
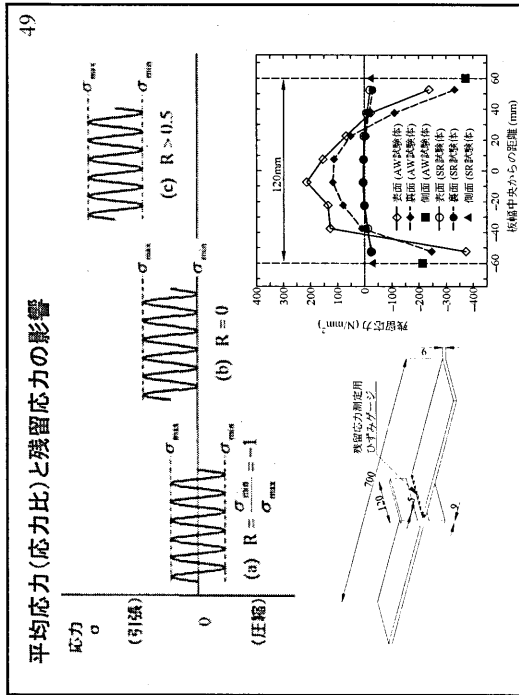
その他の溶接継手
カバープレート溶接継手
 非仕上げ
 G (50MPa)
 溶接部仕上げ
 D (100MPa)

※ (1.(1), 2.(1)) 仕上げはアンダーカットが壊れないように行う。クラインダーで仕上げる場合には仕上げの方向を応力の方向と平行とする。
 ※ (1.(2), 2.(2)) 長さ 0.5mm 以上のアンダーカットは除去する。
 ※ (2.(1)) 細長 s_A, s_B は $s_A \geq 0.8L, s_B \geq 2s_A$ とする。

48

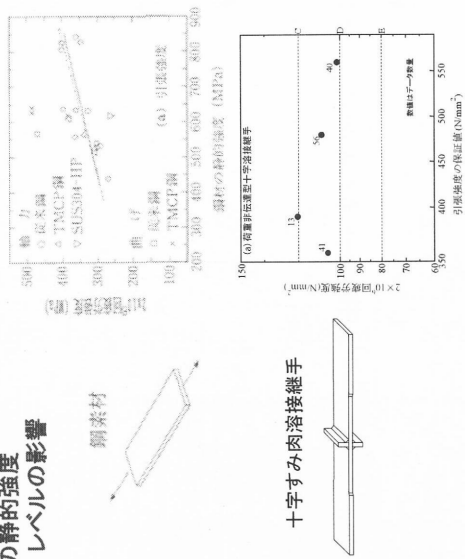
溶接部仕上げの効果
 溶接部仕上げ
 D (50MPa)
 非仕上げ
 G (50MPa)

(1.(1)) 溶接部仕上げを必ず行う。あるいは面外溶接した継手(長さ100mm、非仕上げ)
 疲労寿命 N (cycles)
 (1.(2)) アンダーカットを必ず取り除いた継手(長さ100mm、非仕上げ)
 疲労寿命 N (cycles)



鋼材の静的強度
レベルの影響

53



十字すみ肉溶接継手



疲労強度改善法 (疲労対策、予防保全)

54

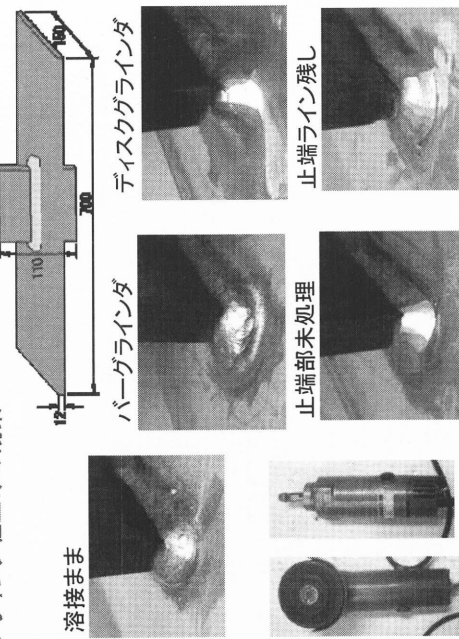
応力集中の軽減 (溶接止端形状の改善)
グラインダ処理、TIG処理

圧縮残留応力の導入
低変態温度溶接材料

応力集中の軽減 + 圧縮残留応力の導入
ピーニング (ブラスト、ハンマー、UIT、.....)

グラインダ仕上げの効果

55

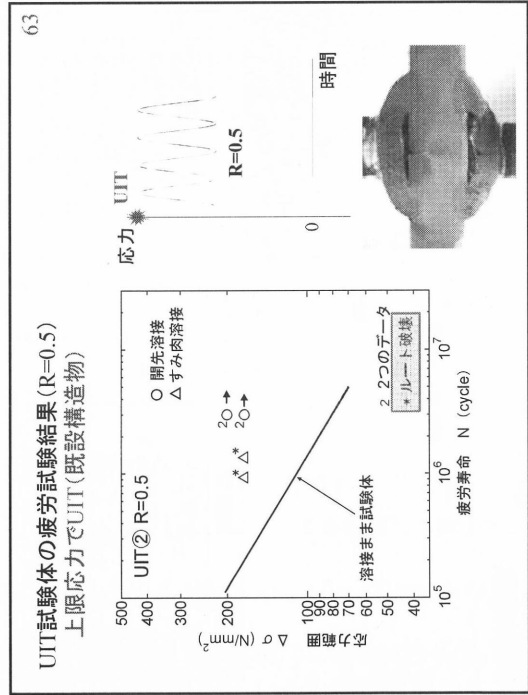
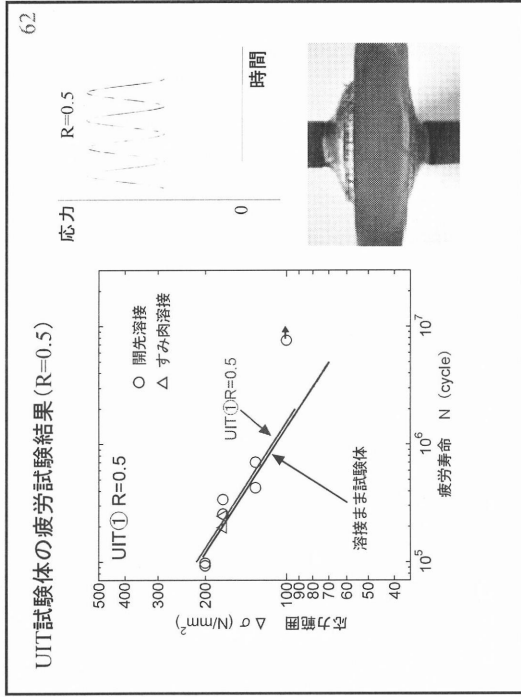
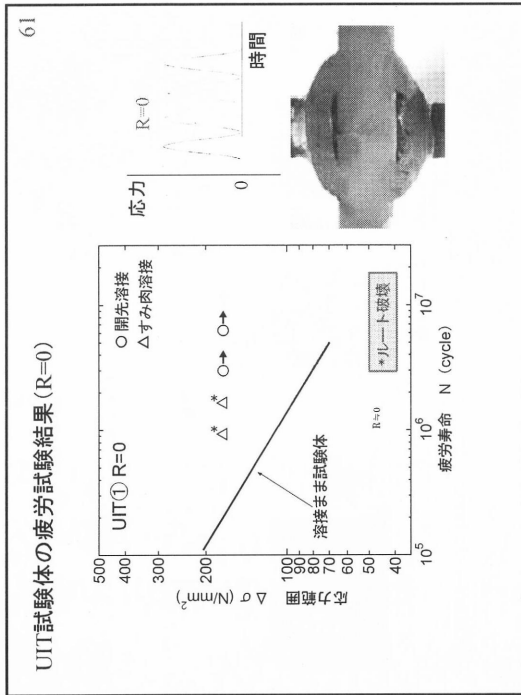


溶接部形状

56



溶接部形状	フランク半径	フランク角
溶接まま	0.6mm	120°
止端部未処理	0.5mm	116°
止端ライン残し	0.5mm	125°
バーグラインダ	5.7mm	121°
ディスクグラインダ	8.3mm	147°



64

疲労強度のまとめ

設計・製作上の留意点

- 溶接継手の疲労強度：溶接継手の形式的だけでなく、溶接部の局所的な形状にも依存する。

↓
溶接さず

疲労強度の向上法：応力集中の軽減（グラインダ仕上げなど）
圧縮残留応力の導入

疲労設計の基本

- 継手の疲労強度とそれを支配する因子を正しく理解する。
- 疲労強度の低い継手をできるだけ使用しない。
- 目標とした疲労強度を製作で実現する。

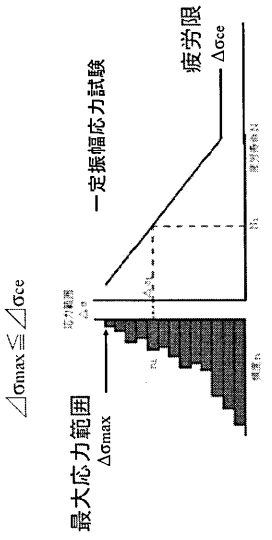
↑

疲労破壊に対する危険性は格段に改善される

4. 疲労照査

<疲労照査>

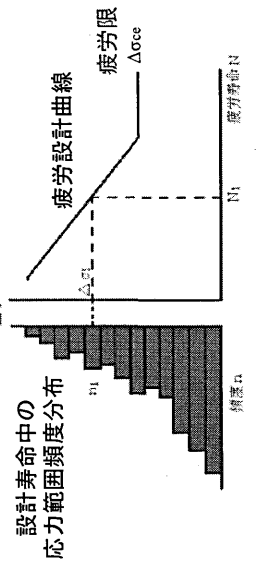
着目部に生じる最大応力範囲が疲労限界を超えなければ疲労亀裂は生じない。



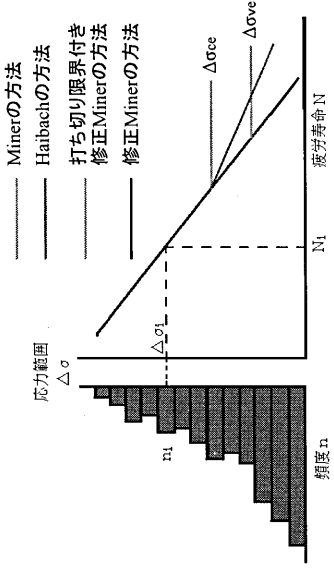
<累積疲労損傷度を用いた照査>

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

マイナーの方法

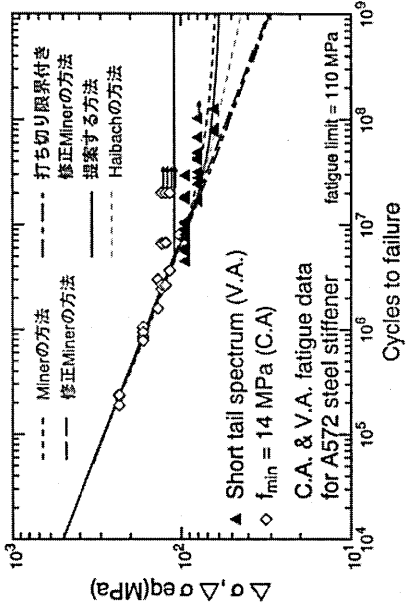


累積疲労損傷度算出上の問題点



どの寿命評価方法を用いるべきか？
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

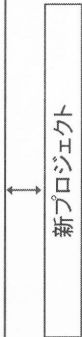


変動応力のパターンは無限にある。

道路橋を対象として設計供用期間100年を考えた場合、応力繰り返し数が $10^9 \sim 10^{10}$ 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。

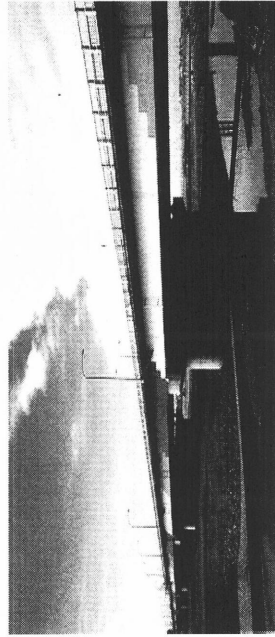
変動振幅応力を受ける溶接継手の疲労強度評価
 $10^9 \sim 10^{10}$ 回 (10億~100億回) に達するような長い寿命を対象



10^9 回 (10億回) の疲労試験

10^8 Hz → 1日80万回 → 1ヶ月2500万回 1年3億回 → 4年10億回

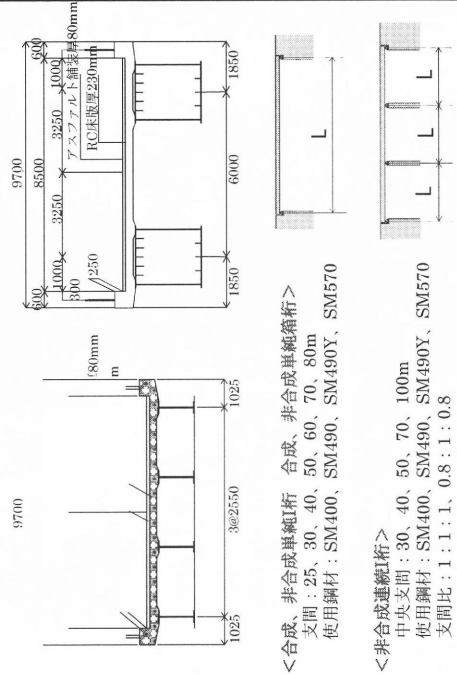
疲労耐用年数に対する橋梁形式・支間・使用鋼材の影響



<検討方法>



<橋梁の断面設計>



<合成、非合成単純桁 合成、非合成単純箱桁>
支間：25、30、40、50、60、70、80m
使用鋼材：SM400、SM490、SM490Y、SM570

<非合成連続桁>
中央支間：30、40、50、70、100m
使用鋼材：SM400、SM490、SM490Y、SM570
支間比：1：1：1、0.8：1：0.8

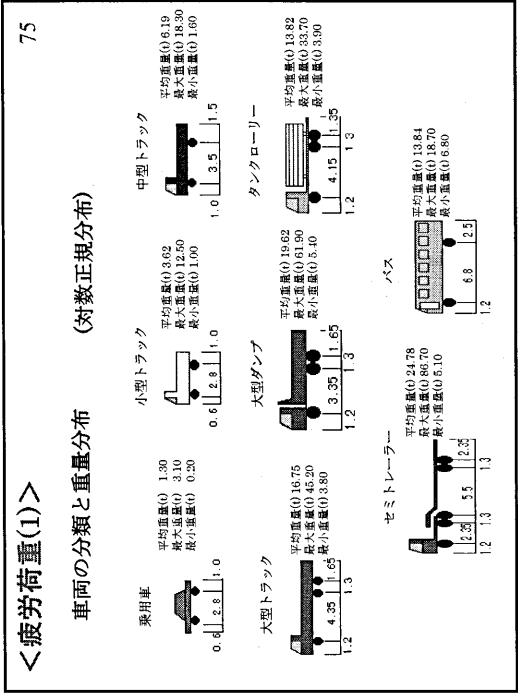
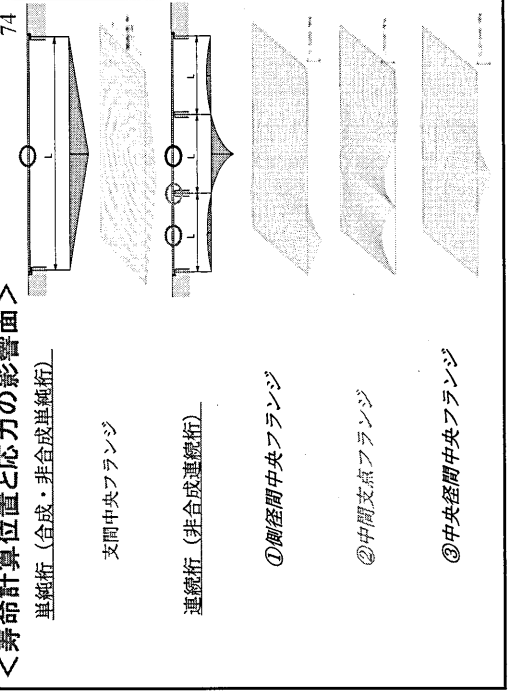
73

＜橋梁断面設計例＞

非合成単純I桁 使用鋼材：SM490Y

厚さ t_w (mm)	22	29	32	38	40
ウェブ高さ h_w (mm)	1650	2200	2700	3700	4250
厚さ t_f (mm)	9	11	11	13	15
断面積A (mm ²)	346.5	590	732.2	1081.4	1301.5
上下フランジ応力度(kgf/cm ²)	2070	2088	2084	2085	2093
設計許容応力度(kgf/cm ²)	2100	2100	2100	2100	2100

設計計算応力度 → 鋼材の許容応力度の 97～99%の範囲



76

＜疲労荷重(2)＞

「共通条件」

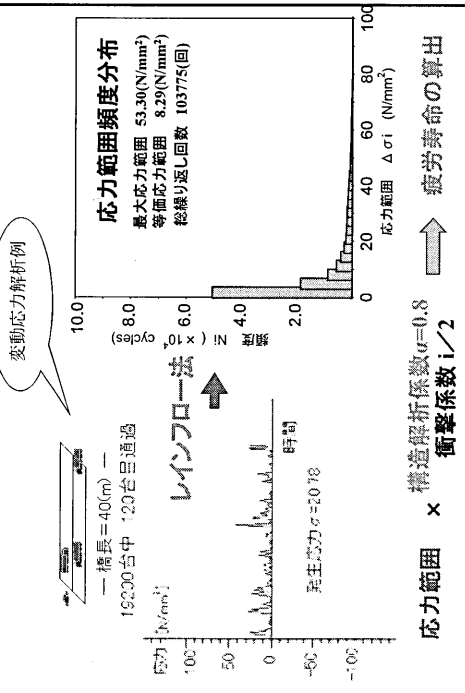
- ・時間交通量：1車線当たり 1000 台/時間
- ・総交通量：192000台(4日分)
- ・走行速度：50 km/hr
- ・大型車混入率：32.5% ・日大型車台数：7800台
- ・車種構成(国道357号線・有明で測定)

「交通荷重の影響」

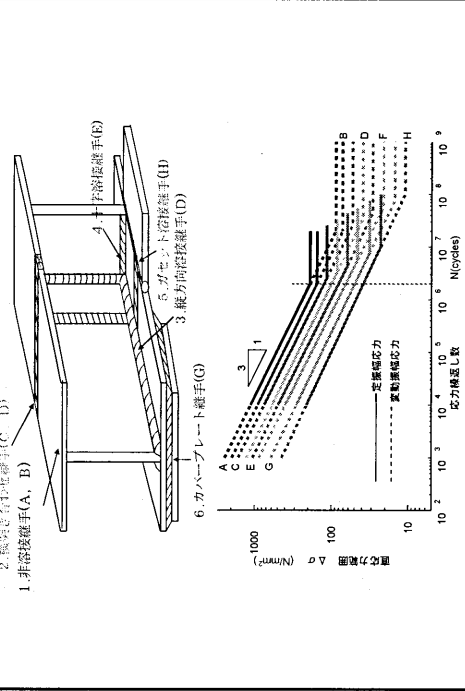
- ・時間交通量：1車線当たり 200,1000,1500 台/時間
- ・大型車混入率：5,10,20,30,32.5,40,60%

車種	大型車混入率					
	10%	20%	32.5%	40%	60%	60%
乗用車 C	73.5	65.3	55.1	32.7	32.7	32.7
小型車	16.5	14.7	12.4	7.3	7.3	7.3
大型トラック ST	4.0	8.1	13.1	24.2	24.2	24.2
中型トラック MT	3.2	6.3	10.3	19.0	19.0	19.0
大型クランプ LT	0.9	1.8	3.0	5.6	5.6	5.6
タンクローリー TR	0.5	1.1	1.7	3.2	3.2	3.2
セミトレーラー TT	1.1	2.1	3.4	6.3	6.3	6.3
大型バス BS	0.3	0.6	1.0	1.7	1.7	1.7

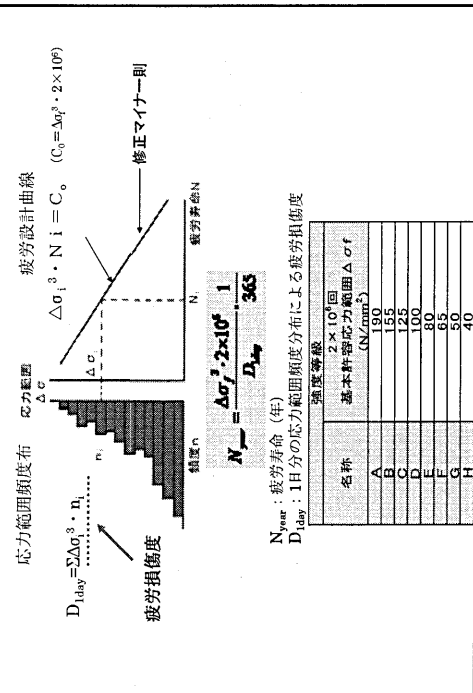
<応力範囲頻度分布>



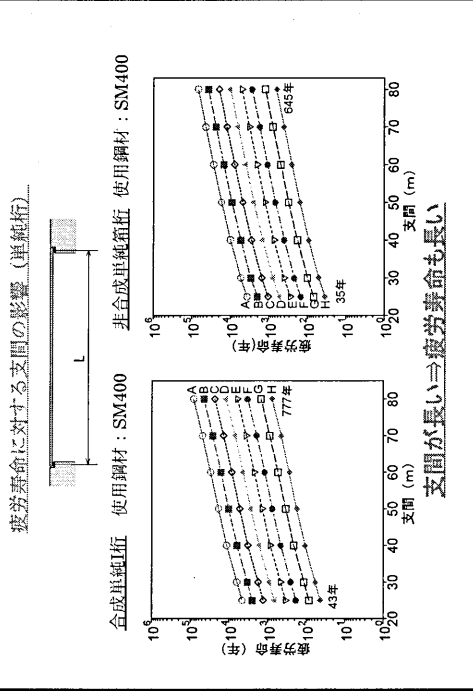
<疲労寿命を計算する継手(1)>

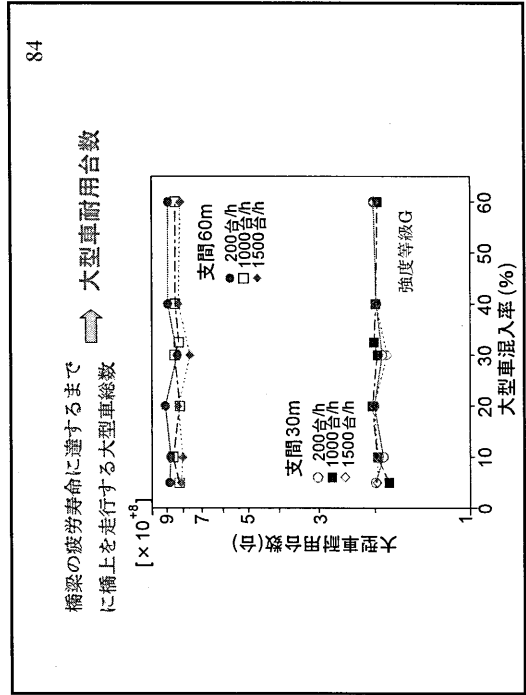
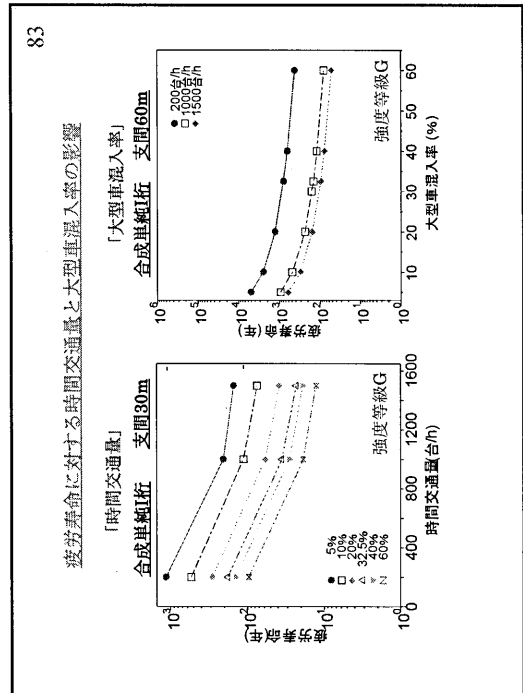
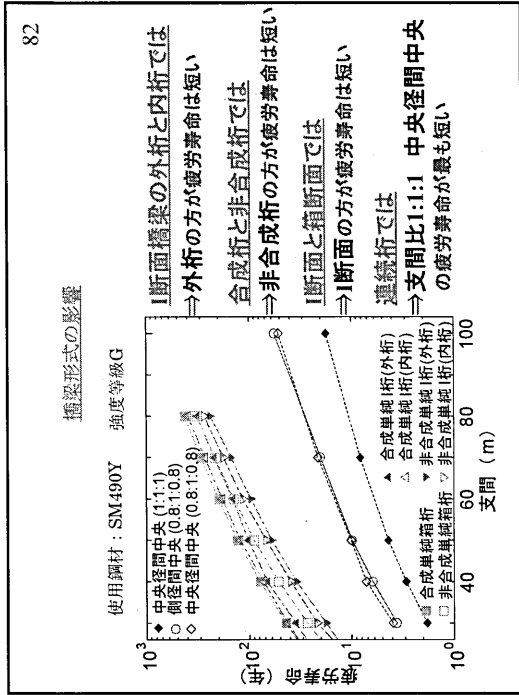
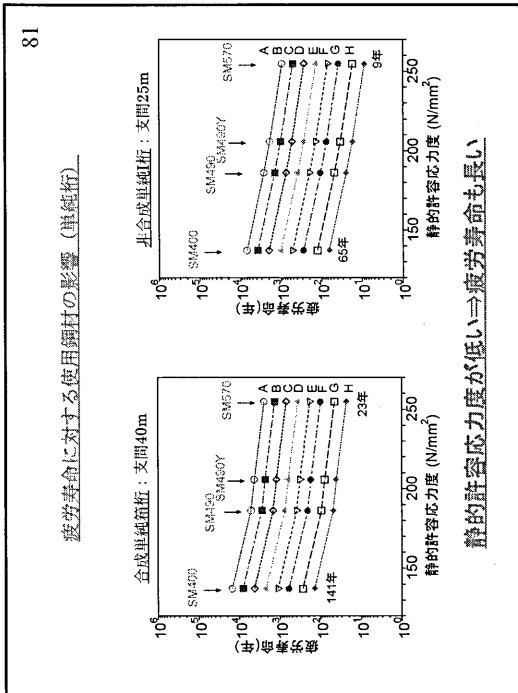


<疲労寿命を計算する継手(2)>



<疲労寿命計算結果>





今後の課題と期待

- (1) 新しい疲労強度改善法の開発
応力集中の緩和、残留応力の調整
疲労に強い鋼材の開発
- (2) 疲労強度改善方法・改善部の品質保証方法の確立
- (3) 変動振幅応力を受ける溶接継手の疲労寿命評価法の確立
- (4) 最新の知識に基づいた疲労設計法の再構築(新JSSC指針)
- (5) 疲労損傷の補修方法と補修部材の強度・寿命評価法の確立
- (6) 効率的な維持管理体制の構築
- (7) 疲労に対する関心・知識の習得

安心して使えるように、橋を作り、守る

「鋼床版の疲労」講習会 開催の案内

日 時:平成22年12月21日(火), 13:30~17:00
場 所:土木学会「土木会館」2階講堂
参加費:会員5,000円, 非会員7,000円, 学生4,000円
(テキスト代を含む)

プログラム

13:30~13:35 改訂本策定の経緯, 講習会の趣旨 【司会】 横河ブリッジ 井口 進
13:35~14:05 鋼床版の設計 法政大学 森 猛
14:05~14:35 鋼床版の施工 川田工業 小笠原 照夫
14:35~15:05 疲労損傷事例と点検調査 首都高速道路技術センター 柳沼 安俊
休 憩(10分) 首都高速道路 梶原 仁
15:15~15:45 鋼床版の補修・補強事例 首都高速道路 梶原 仁
15:45~16:15 鋼床版の疲労に関する研究動向 琉球大学 下里 哲弘
16:15~16:45 疲労に強い新しい鋼床版に向けて 三井造船 内田 大介
16:35~17:00 質疑応答