

鋼橋の疲労強度を向上させるための 補修・補強設計について

舘石和雄（名古屋大学）

鋼橋の疲労強度を向上させるための 補修・補強設計について

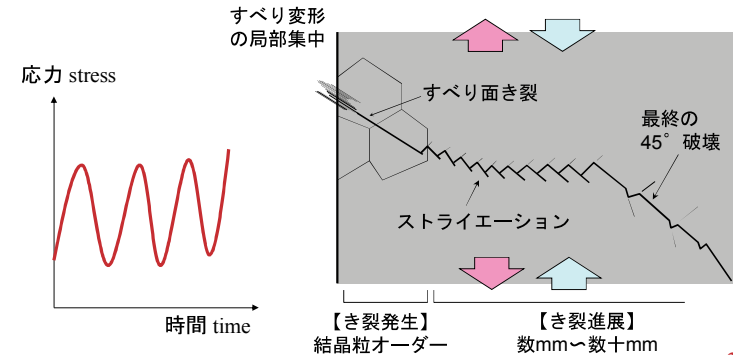
名古屋大学大学院 舘石和雄

配布資料は抜粋です。ご容赦ください。

1

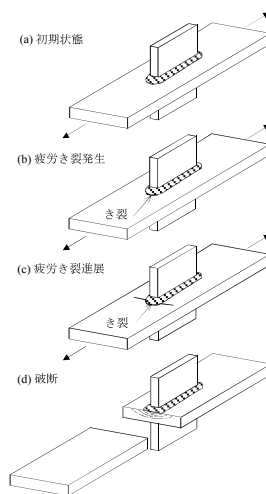
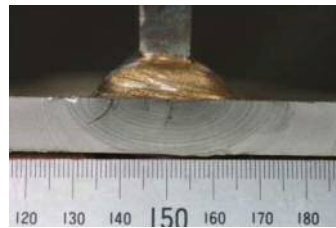
疲労破壊

- ・降伏強度以下の応力の繰返し→変形を伴わない
- ・応力繰返しに応じて、き裂発生、進展
- ・時間依存型破壊



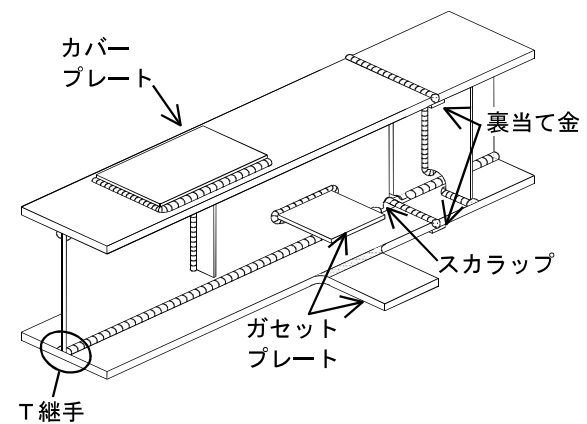
3

疲労破壊



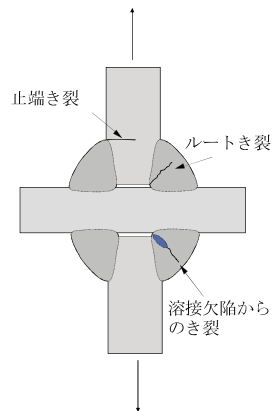
4

溶接構造物の例



5

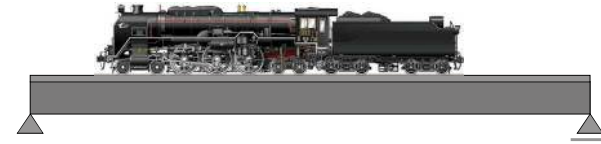
疲労き裂の起点



疲労き裂は、応力集中部(溶接止端, 溶接ルート)から発生する。

6

疲労に対する考え方: 鉄道橋



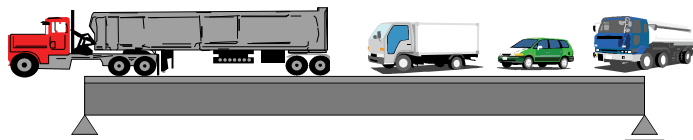
鉄道橋: 活荷重が大きい(機関車). 死活荷重比が小さい
従来より疲労設計を行ってきた。

東海道線、東海道新幹線 (1964年開通)

車両の軽量化は進んでいるが、路線によっては本数の増加による繰返し数の増加と高速化

19

疲労に対する考え方: 道路橋



道路橋: 死活荷重比が大きい。
疲労設計を行なってこなかった。
幹線国道 (1960~1970年, 急いで道路整備)
繰返し数の増加 (道路へモーダルシフト)
大型車の増加, 過積載車両の増加
疲労損傷事例の増加
疲労設計の導入(2002年)

20

鉄道橋設計基準の変遷

年代	主な示方書・設計標準	特 徴
M26頃	Benjamin Baker の示方書	・鉄道創成期において適用した示方書
M28	C.W. Kinder の示方書	・「突如応力を受ける部材では引張、圧縮のうち大きい方の応力に小さい方の応力の1/2を加える」 →疲労を考慮 (以降、S31までの示方書においても適用)
M45	鋼鉄道橋設計示方書	・日本最初の設計示方書 ・アメリカの AREA の示方書を一部改訂補正 ・S31, クーパー荷重
S3	鋼鉄道橋設計示方書	・KS 荷重
S15	鋼鉄道橋標準設計示方書	・新幹線鉄道 (弾丸列車) 設計への適用 (実現なし) →幅広い KS 荷重 (KS-10~KS-28) ・鋼材規格も現行の構造用鋼材に近いものを規定
S31	鋼鉄道橋設計示方書	・リベット構造用の最後の示方書 ・各条文中解説が付記
S31	アーチ型鋼鉄道橋設計示方書案	・疲労許容応力度を規定 (溶接継手を5分級、応力比をパラメータ)
S34	高耐力鋼鉄道橋設計示方書案	・降伏点 32kgf/mm ² , 36kgf/mm ² の鋼材を規定
S35	溶接鋼鉄道橋設計示方書案	・JIS 溶接構造用圧延鋼材 SMA41, SMA50 を導入 ・東海道新幹線に適用, NP 荷重 ・疲労許容応力度の改定 (最新の疲労試験結果に基づく)
S45	建造物設計標準 (鋼鉄道橋)	・S31, S34, S35 の3つの示方書を統合 ・SMA 材, 高力ボルト追加
S47	全国新幹線鋼鉄建造物設計標準	・疲労許容応力度の改定 (継手の 95%非破壊検査を目安) ・支間による疲労許容応力度の補正
S58	建造物設計標準 (鋼鉄道橋)	・SMASS, SMA58 追加 ・基本許容応力度の改訂 ・疲労設計手法の改訂 (応力度範囲による補正, 継手分級 の拡充, 継手部剛性の本格的な採用)
H4	鉄道構造物等設計標準・同解説 編・合成構造物	・世界共通設計法 ・EA 荷重 (電気機関車), M 荷重 (電車・気動車) ・疲労設計手法の大幅な改訂 (疲労限の明記, 繰返し疲労の 明記, 継手分級の拡充, 疲労許容応力度範囲の改訂)
H21	鉄道構造物等設計標準・同解説 編・合成構造物	・性能調査型設計法 ・疲労設計手法の改訂 (疲労強度等級の一部改訂, 累積疲労 損傷度による照査)

← M28: 疲労を考慮

※応力振幅の影響を考慮

← S31: 疲労許容応力度を規定

← S58: 疲労設計手法の改定

※H4, H21にも改訂

21

道路橋示方書の変遷

年代	主な示方書・設計指針	特 徴
S14	鋼道橋設計示方書第1版	・高速度鉄道を使用するなどの特殊な場合以外は、交通応力の繰返しの影響を考慮しなくてもよい ・自動車重量は1等橋では13t、2等橋では9t
S31	鋼道橋設計示方書解説	・1等橋ではT-20（自動車重量20t） ・2等橋ではT-14（自動車重量14t）
S39	鋼道橋設計示方書解説	・鋼床版構造を規定 ・鋼床版の床版作用による繰リブ付定の繰リブ下縁の繰リ上げ圧縮応力度は、SM41およびSM41で1,300kg/cm ² 、SM50で1,800kg/cm ² とする。（一般より100kg/cm ² 低く設計）
S48	道路橋示方書 II 鋼橋編・同解説	・鋼桁ではT-20重量による断面力を大型車両載おおよび部材の長間により増大
S48	特定路線にからる高架の道路等の技術基準	・TT-43（トレーラー重量40t）を追加
S55	道路橋示方書 II 鋼橋編・同解説	・鋼床版ならびに道路橋に鉄道または鉄道を使用する場合などを除いて一般に疲労の影響を考慮しなくてよい ・鋼床版では200万回程度の繰返しに耐えて、疲労き裂が発生しないような応力範囲を疲労に対する許容応力度とし、応力範囲はT-20重量により生じる最大応力度・現場応度では疲労強度を20%低減させる ・高速度鋼桁と分岐アランジとは繰返し平均値もしくは適当な間隔を設ける
H12	道路橋示方書 II 鋼橋編・同解説	・設計自動車重量を250kNとし、大型の自動車の交通状況に応じてA活荷重及びB活荷重に区分 ・T-20重量は軸重200kN
H18	道路橋示方書 II 鋼橋編・同解説	・SI単位系 ・疲労現象の基礎知識 ・既設橋梁の疲労損傷とその対処法
H19	鋼橋の疲労	・疲労現象の基礎知識 ・既設橋梁の疲労損傷とその対処法
H14	道路橋示方書 II 鋼橋編・同解説	・疲労の影響を考慮するものとした
H14	鋼道橋の疲労設計指針	・疲労設計の基本、疲労強度と破断の分類、応力度による疲労損傷、構造詳細による疲労設計（鋼床版） ・応力による疲労損傷、繰返しの疲労強度
H24	道路橋示方書 II 鋼橋編・同解説	・鋼床版の構造詳細（一部のデッキプレートと最小板厚を16mmに増加、繰リブの継手は高力ボルトを標準等）

22

疲労設計の基礎

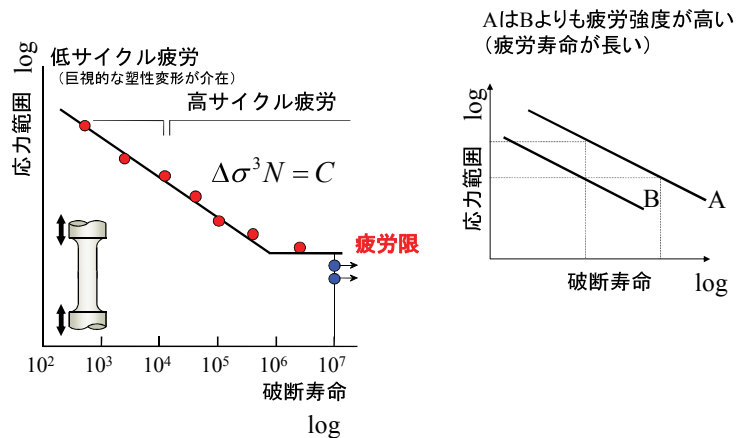
(1)「強度＞負荷」により照査(他と同様).

(2)強度はS-N線図で与えられる.

(3)負荷とは対象箇所に生じる応力範囲とその繰返し回数.

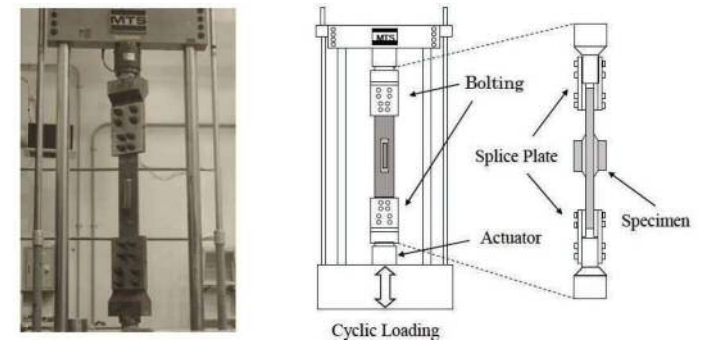
24

S-N線



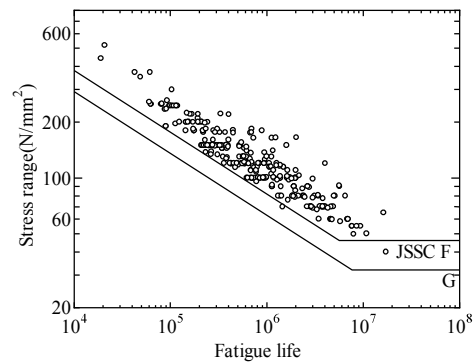
25

疲労試験の例



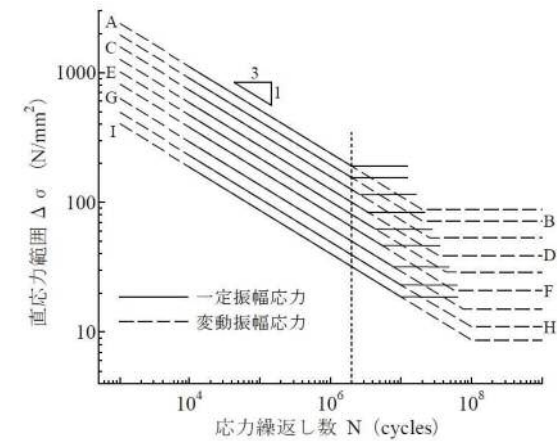
26

疲労試験結果



27

設計S-N線 (JSSC疲労設計指針)



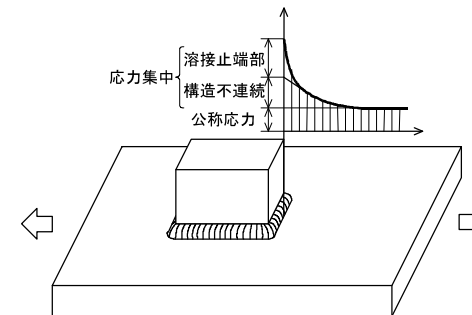
28

溶接部の疲労強度影響因子

- 応力集中 構造不連続
止端形状
- 残留応力 熱収縮
構造による拘束
- 材料組織 熱影響部
溶接金属
- 溶接欠陥 溶接施工条件
(適正化して発生を抑える)

29

応力集中



応力集中の程度は
継手の全体形状
溶接止端部の処理の有無
に大きく依存

30

継手等級分類

表 6.2.4 継手の強度等級分類 (つづき)

(e) ガセット溶接継手 (付加板を溶接した継手を含む)

継手の種類	強度等級 (JIS)	備考
面外ガセット	1. ガセットをすみ肉あるいは溶先溶接した継手 ($l \leq 100$ mm)	(1) 止端仕上げ E (80) (2) 非仕上げ F (65)
	2. フィレットを有するガセットを溶先溶接した継手 (フィレット部仕上げ)	E (80)
	3. ガセットをすみ肉溶接した継手 ($l > 100$ mm)	G (50)
	4. ガセットを溶先溶接した継手 ($l > 100$ mm)	(1) 止端仕上げ F (65) (2) 非仕上げ G (50)
面内ガセット	5. フィレットを有するガセットを溶先溶接した継手 (フィレット部仕上げ)	(1) $1/3 \leq r/d$ D (100) (2) $1/5 \leq r/d < 1/3$ E (80) (3) $1/10 \leq r/d < 1/5$ F (65)
	6. ガセットを溶先溶接した継手	(1) 止端仕上げ G (50) (2) 非仕上げ H (40)
	7. 重ねガセット継手の母材	H (40)
		※ (1.(1), 2., 4.(1), 5., 6.(1)) 仕上げはアンダーカットが浅いように行う。グ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.) 深さ 0.5 mm 以上のアンダーカットは除去する。

31

鋼箱桁橋に用いられる継手の例

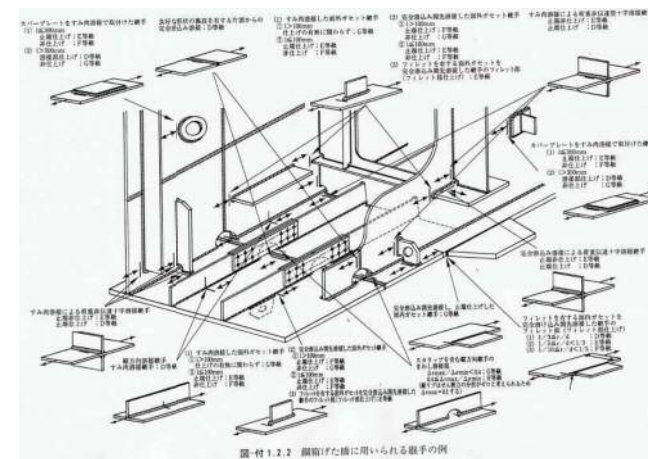
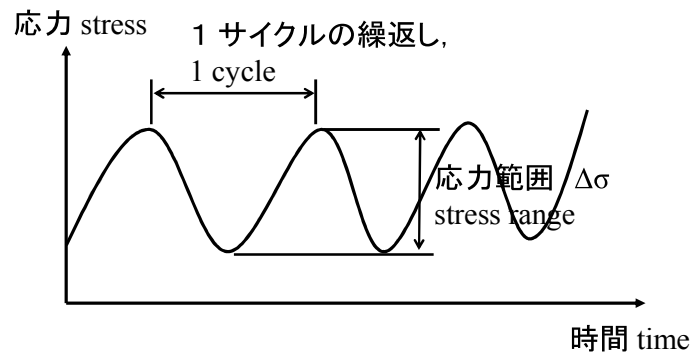


図-付 1.2.2 鋼箱桁に用いられる継手の例

道路橋の疲労設計指針 2002年

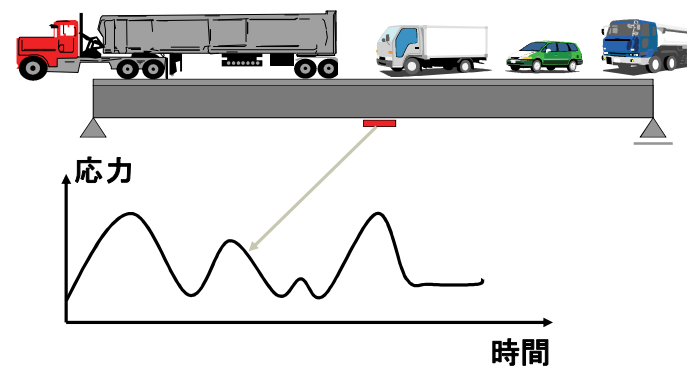
32

疲労を引き起こす応力変動



33

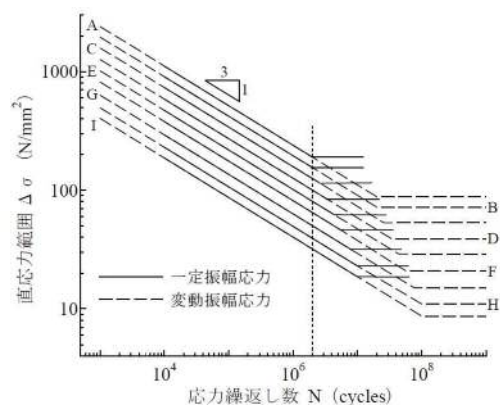
実働応力



橋に発生する応力範囲はランダムに変動する。
→どう取り扱えばいいのか？

34

2つの打ち切り限界

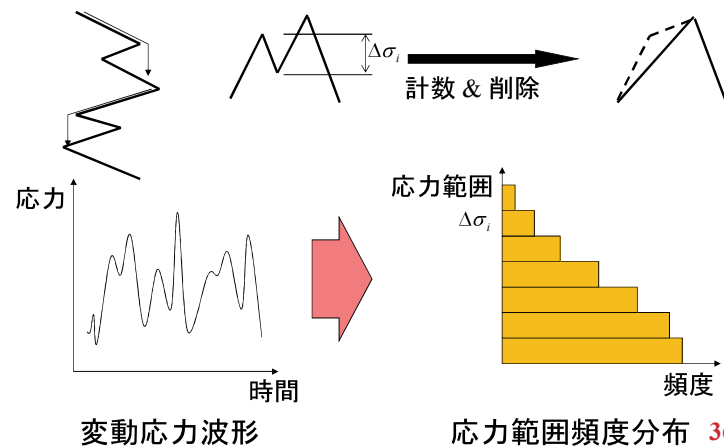


実線:一定振幅応力(CA)に対する線
破線:変動振幅応力(VA)に対する線

35

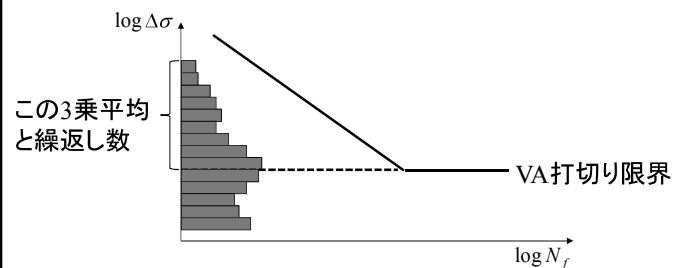
応力範囲頻度分布

レインフロー法:波数係数法の一つ.



応力範囲頻度分布 36

等価応力範囲



VA打ち切り限界以上の応力範囲成分の3乗平均値を等価応力範囲という。これを代表値として用いることができる(線形被害則を仮定している)。

$$\Delta\sigma_{eq} = \sqrt[3]{\frac{\sum \Delta\sigma_i^3 n_i}{\sum n_i}} \quad N = \sum n_i$$

37

2つの疲労照査方法

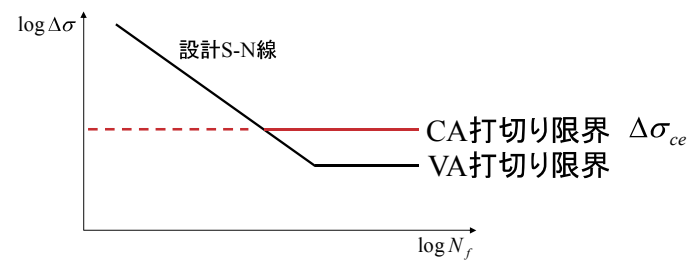
1. 最大応力範囲に着目する方法

最大応力範囲とCAに対する打ち切り限界を比較

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

これが満たされれば疲労寿命は無限。

疲労限照査, 簡便な照査などと呼ばれる。



※実際には板厚, 応力比, 曲げ応力の補正などを考慮するが, ここでは省略。 38

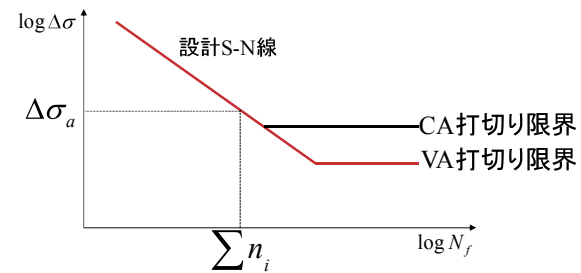
2. 等価応力範囲に着目する方法

等価応力範囲と基準疲労強度(繰返し回数から与えられる疲労強度)を比較

$$\gamma \Delta \sigma_{eq} \leq \Delta \sigma_a$$

繰返し数を予測する必要がある。

有限寿命設計, 繰返し数を考慮した照査などと呼ばれる。



※実際には板厚, 応力比, 曲げ応力の補正などを考慮するが, ここでは省略。

39

疲労設計の例題

設計条件

対象とする継手: 右写真

ガセット長さ: 80mm

想定する橋の寿命: 100年

一日あたりの応力頻度分布

応力範囲 (MPa)	頻度
10	500
20	300
30	200
40	100
50	50
60	20



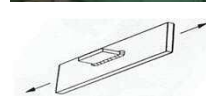
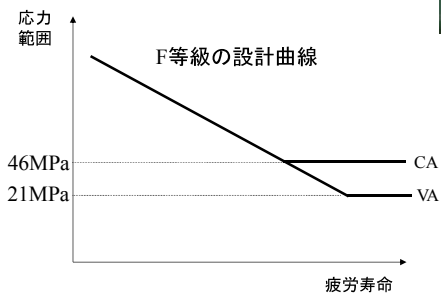
安全係数 γ : 1.0

40

疲労強度

継手強度等級

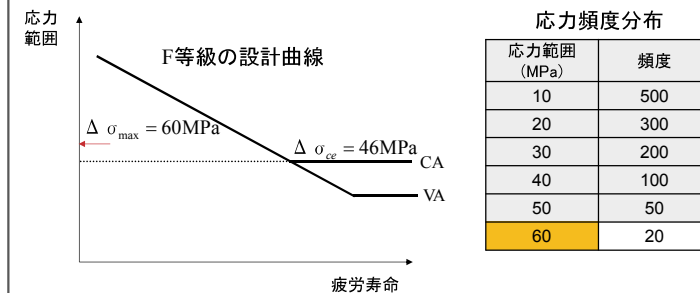
面外ガセット継手 ($L < 100$, 非仕上げ) にモデル化できるので, F等級



41

疲労限照査

最大応力範囲とCAの打ち切り限界を比較



応力頻度分布

応力範囲 (MPa)	頻度
10	500
20	300
30	200
40	100
50	50
60	20

$\gamma \Delta \sigma_{max} > \Delta \sigma_{ce}$ なので満足しない. 寿命を考慮した照査へ

42

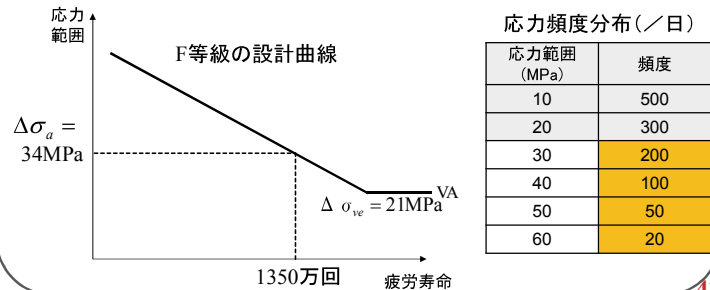
繰返し数を考慮した照査

VAの打ち切り限界以上の応力範囲の日当たり繰返し回数

$$\sum n_{id} = 200 + 100 + 50 + 20 = 370$$

設計期間(100年)中の繰返し回数

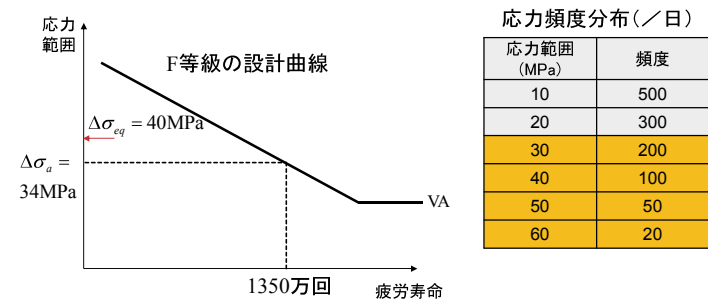
$$\sum n_i = 370 \times 365 \times 100 = 1350 \text{ 万回}$$



43

等価応力範囲

$$\Delta\sigma_{eq} = \sqrt[3]{\frac{200 \times 30^3 + 100 \times 40^3 + 50 \times 50^3 + 20 \times 60^3}{200 + 100 + 50 + 20}} = 40 \text{ MPa}$$

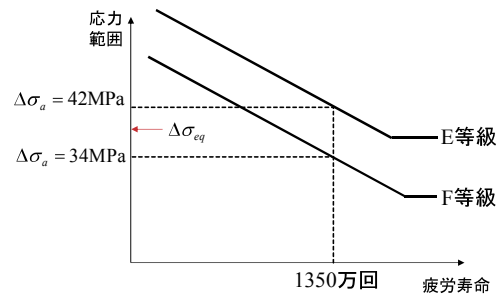


$\gamma\Delta\sigma_{eq} > \Delta\sigma_a$ だから満足しない. 何らかの変更が必要.

44

疲労照査を満足させるために

①強度を上げる

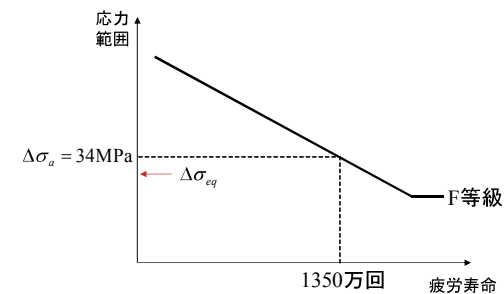


具体的には止端仕上げを実施.

※実際の計算では, 等級を変えると等価応力範囲の値も変わる. 45

疲労照査を満足させるために

②応力範囲を下げる



具体的には, 板厚増, ガセット取付位置の変更, 構造系の変更などを実施.

※実際の計算では, 応力範囲を下げると等価応力範囲の値も変わる. 46

補修・補強と疲労設計

これまでに見てきた疲労設計手法で、補修・補強の効果をそのまま取り入れることができるのは、

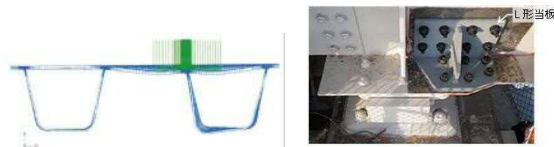
◇止端処理による疲労強度向上効果。

◇継手の全体形状を変えずに公称応力を低減した場合の効果のみ！

では、例えば次のような場合にどうするのか？

◇公称応力が明確でない場合の設計は？鋼床版など。

◇表に示されていない継手の設計は？補強構造など。



48

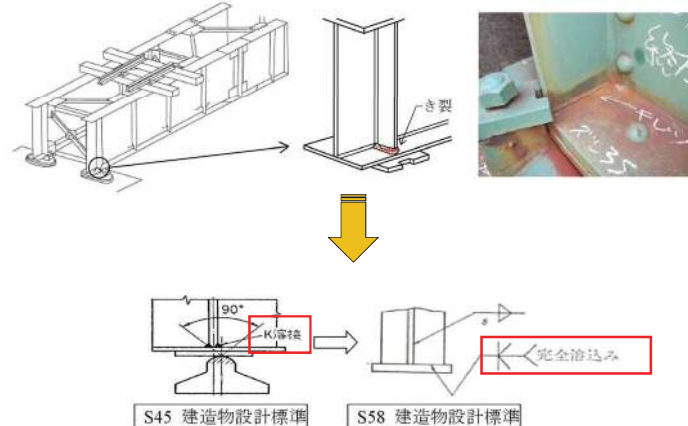
対応策

1. 疲労に強いことが確認されているディテールを用いる。
 - ・最近ではこれも「疲労設計」と称される。
 - ・「疲労に強い」ことを疲労試験によって確認する必要がある。
 - ・ある意味で経験則。だが、適用は容易であり、効果も大きい。
2. FEMを前提とした疲労設計
 - ・局部応力基準の疲労設計。
 - ・設計疲労強度曲線とセットで考える必要がある。
3. 破壊力学を用いた疲労設計
 - ・適用できる対象は限られる。

49

疲労に強い構造ディテールの採用

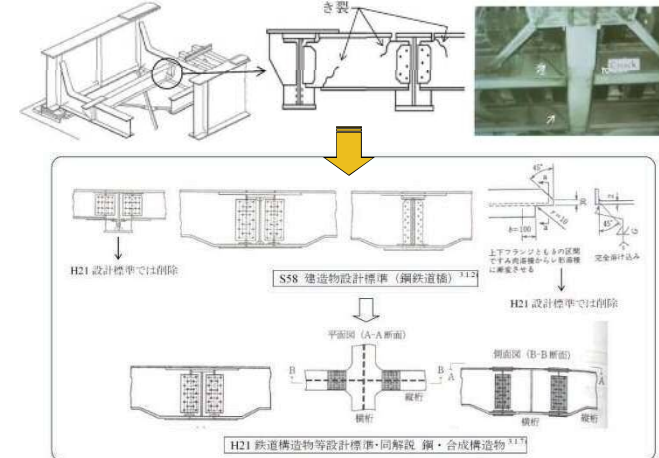
端補剛材下端溶接部



51

疲労に強い構造ディテールの採用

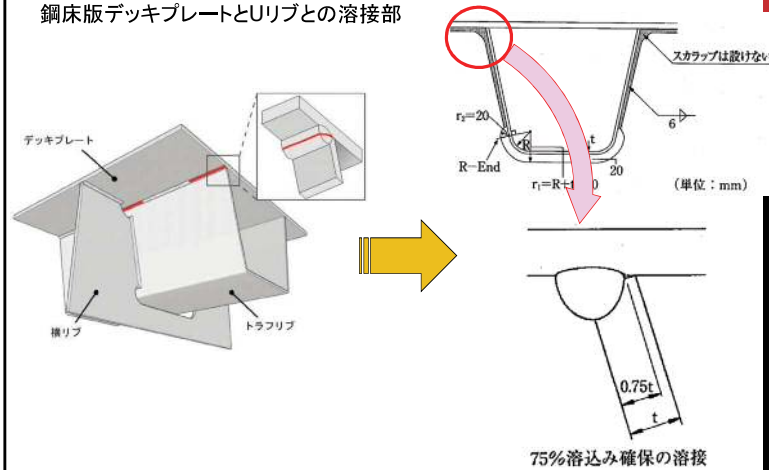
縦桁・横桁接合部の縦桁フランジ切欠き部



52

疲労に強い構造ディテールの採用

鋼床版デッキプレートとUリブとの溶接部



57

局部応力基準の疲労設計法

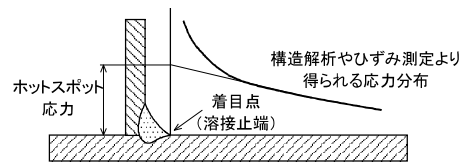
- ◇き裂発生点近傍の応力を用いる設計法.
- ◇局部応力には応力集中の影響が取り込まれている.
- ◇そのため, 局部応力で整理した疲労強度は継手形状によらない. どんな形状のものにもOK!

ただし,

- ◆局部応力を求めるには詳細なFEM解析が必要.

59

ホットスポット応力

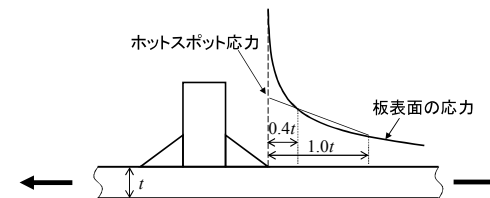


構造による応力集中を考慮
溶接ビード形状による応力集中は考慮せず

FEM, ひずみ計測などから算出

60

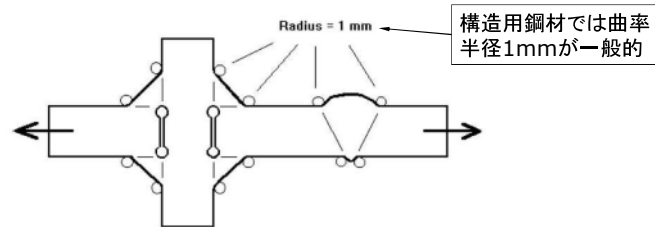
2点外挿法



61

エフェクティブノッチ応力

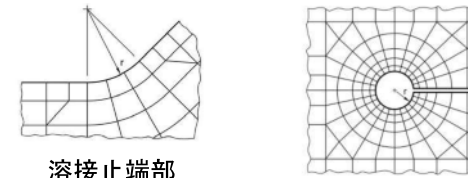
溶接止端部もしくはルート部に円孔(これをエフェクティブノッチと呼ぶ)を仮定し, その円弧上にて弾性計算により算出される最大応力。



62

エフェクティブノッチ近傍の要素分割例

応力集中による応力の急変を求めることができるように, 十分に小さい要素を配置する必要がある。



溶接止端部

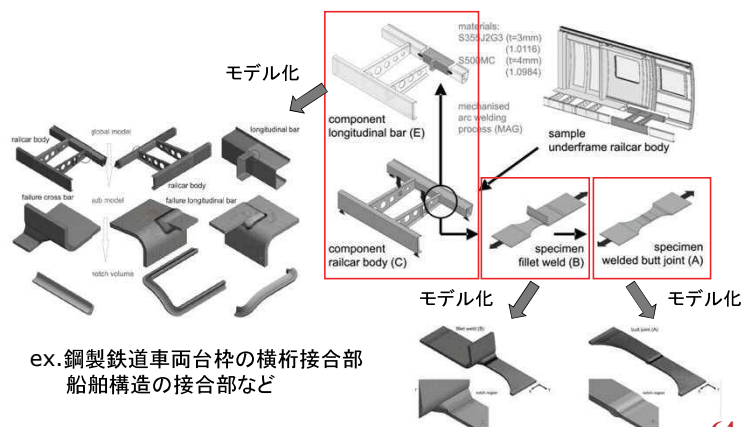
溶接ルート部

2次要素のとき $r/4$ 以下

1次要素のとき $r/6$ 以下

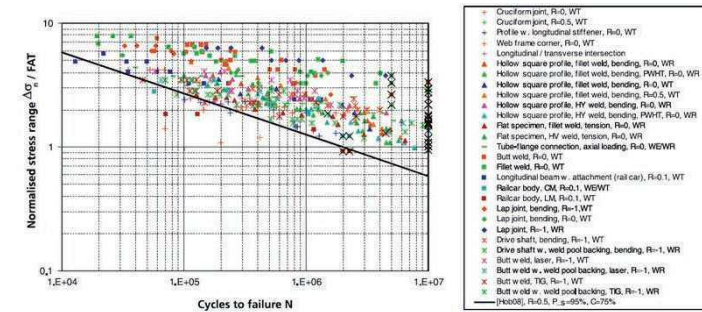
63

さまざまな構造部位を対象とした疲労試験



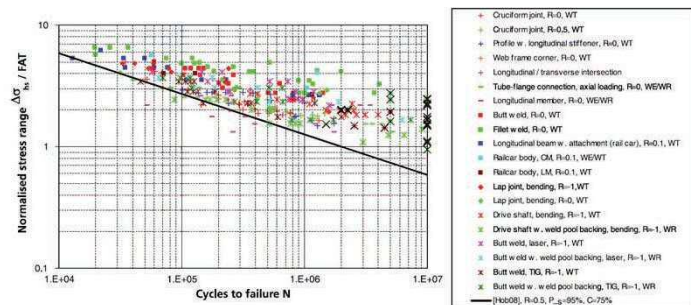
64

公称応力による整理



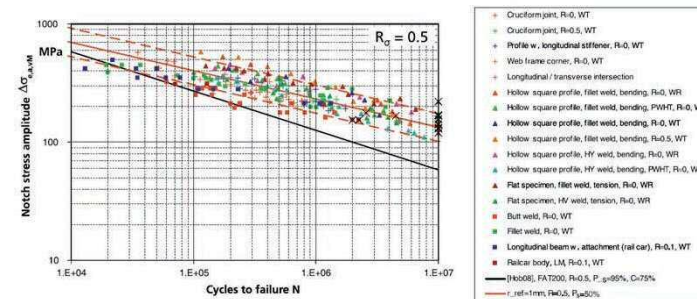
65

ホットスポット応力による整理



66

エフェクティブノッチ応力による整理

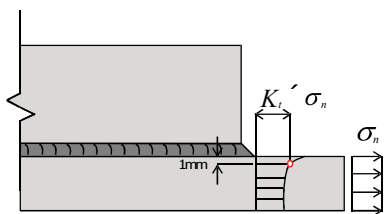


67

1mm法 by 山田健太郎 名古屋大学名誉教授

き裂の起点から、き裂の進展方向に1mm離れた位置での応力によって疲労強度を評価する方法.

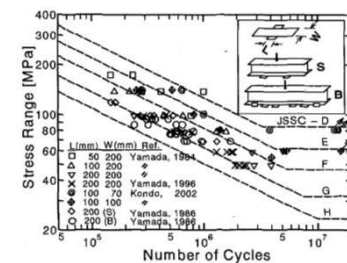
ホットスポット応力による疲労強度の評価法と同様に、溶接継手の構造的な応力集中を考慮した手法。



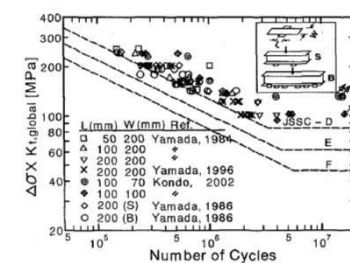
68

適用事例

面内ガセット溶接継手



公称応力による整理



1mm法による整理

69

まとめ

◇疲労設計の歴史的変遷

- ・鉄道橋では古くから疲労を考慮. それでも疲労は発生.
- ・道路橋に疲労設計が導入されたのは2002年. 特にそれ以前の橋への配慮が重要.

◇現行の疲労設計(公称応力基準)

- ・簡単に行うことができる.
- ・補修・補強設計への適用は限られる.

◇補修・補強と疲労設計(将来に向けて)

- ・疲労に強いディテールの蓄積とその適用
- ・局部応力基準の疲労設計手法の高精度化と普及
が期待される.

70



コードNo.	P823
ISBN	978-4-8106-0823-6
編集	鋼構造委員会 鋼橋の疲労対策に関する新技術調査研究小委員会
発行年月	2013/12
版型:頁数	A4判, 257ページ, 並製本
重量	786g
税込定価	¥2,730
会員特価	¥2,460
送料	¥470

71