

疲労のメカニズムと 疲労設計

関西大学 工学部
都市環境工学科

坂野 昌弘

Email: peg03032@nifty.com

本日の概要

- 疲労って何???
- 疲労設計???

疲労って何？？？

鋼部材の劣化現象

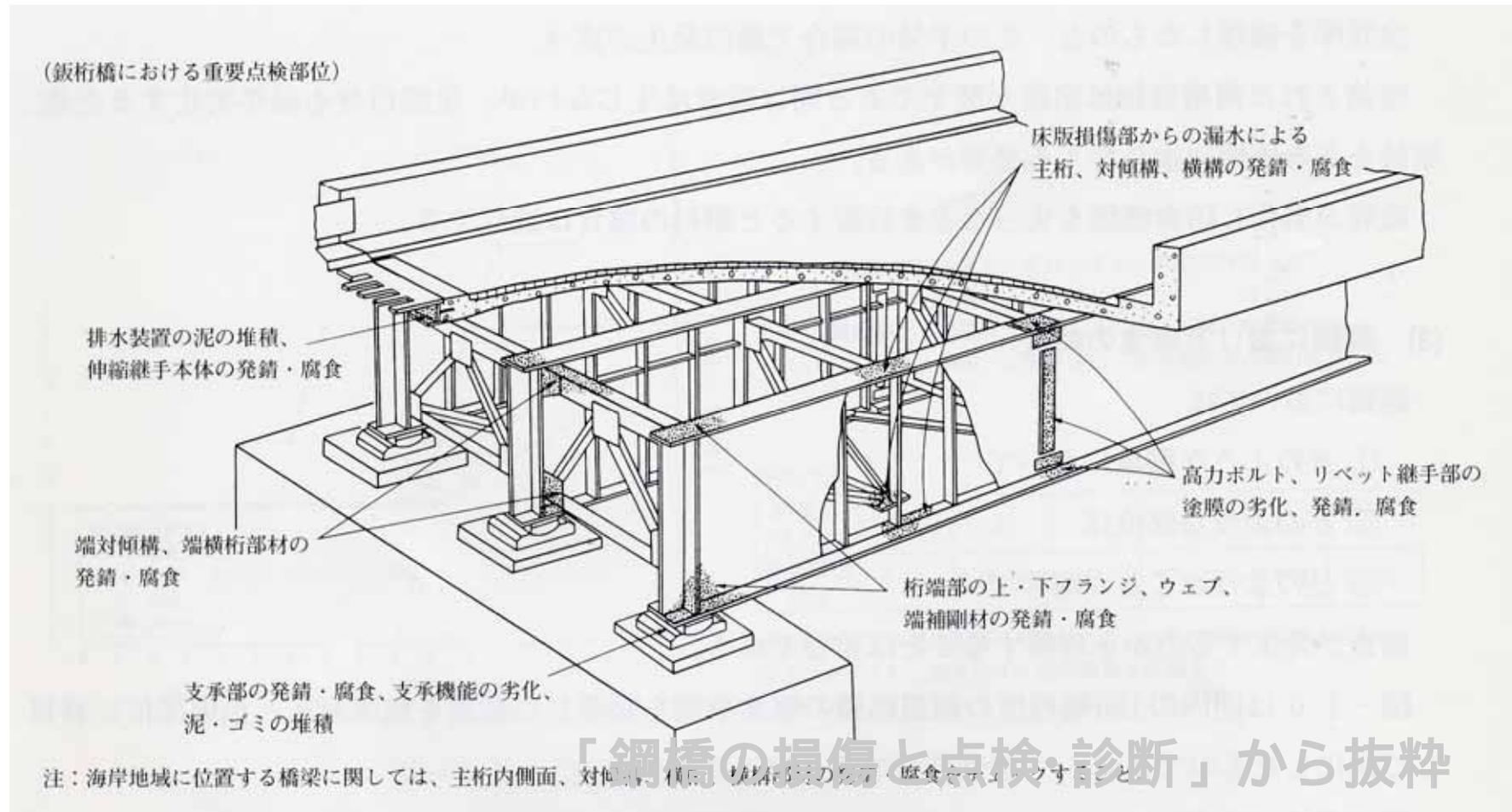
- 長所と短所は裏表。。。。
- 高強度 軽量 架設、地盤、耐震性
死荷重<活荷重 疲労！
- 高延性 加工性、変形性能 腐食！
- 疲労と腐食は時間的に蓄積
耐久性を支配する重要な劣化要因！

腐食

- 基本的に、鉄の酸化反応 遅い！
(板厚貫通までに数年以上。。。)
- 面的な広がり、錆汁 目立つ！
(発見が容易)
- 鋼材の腐食 鋼橋の腐食
構造的要因が重要
設計上の配慮！

鋼橋の腐食マップ

鋼材の腐食 鋼橋の腐食



疲労

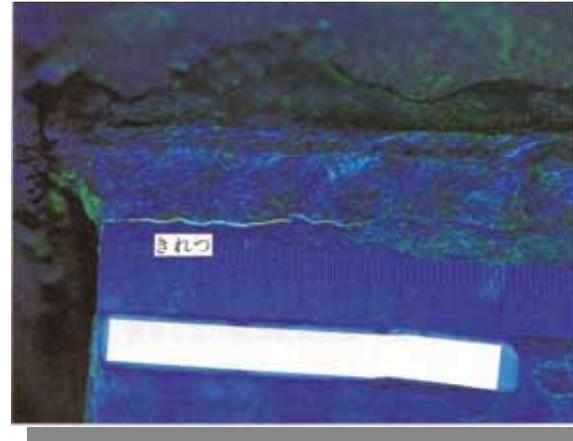
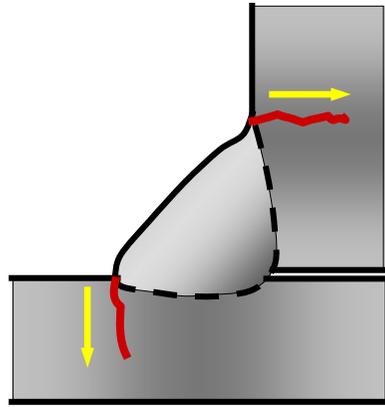
- 繰返し力や変形による亀裂の発生・進展過程
- 微小な亀裂の進展過程が寿命の大半！
- 塗膜や被膜の下 発見が困難！
- 大きな亀裂 急速に進展 脆性破壊！
- 一次応力と二次応力
- 設計上の仮定と実際の挙動の違い
(非合成、二次部材、部材の変形、、、)

疲労って何？？？

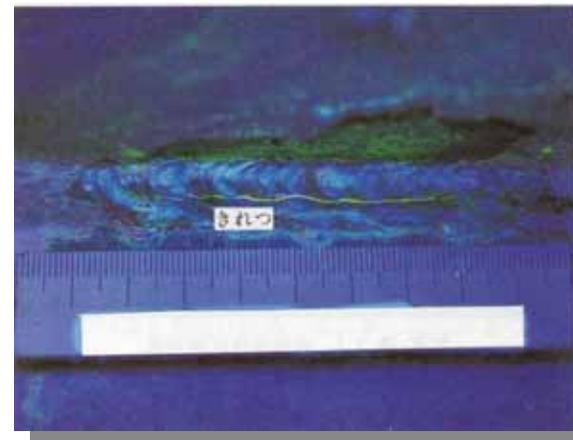
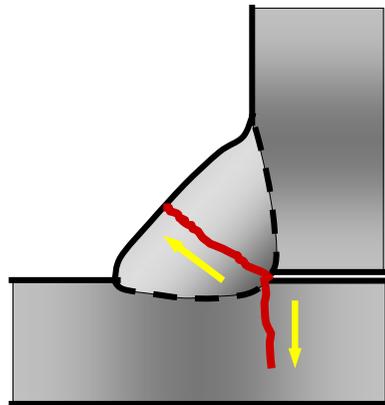
- S-N線？？
- マイナー則？？
- 継手等級？？

疲労亀裂 (すみ肉溶接の場合)

止端破壊

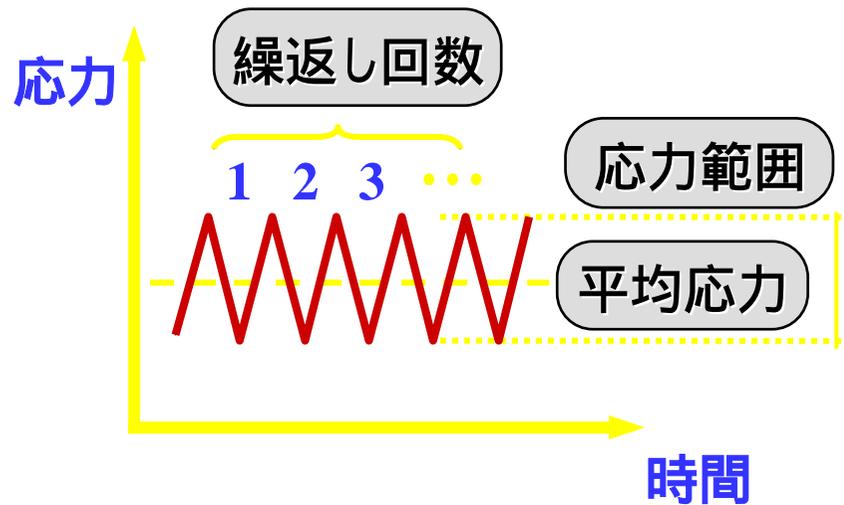


ルート破壊

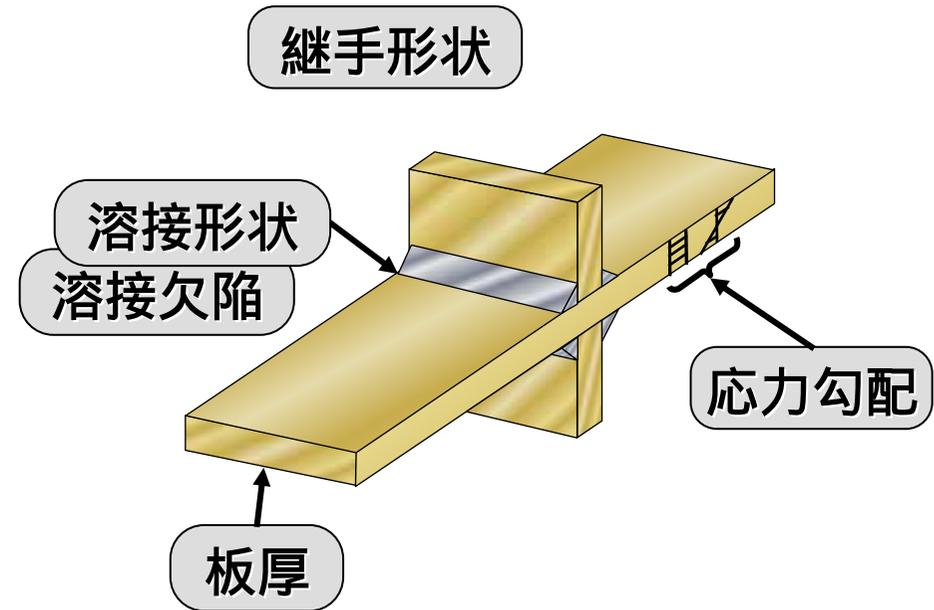


疲労強度に影響を及ぼす因子

外力的因子



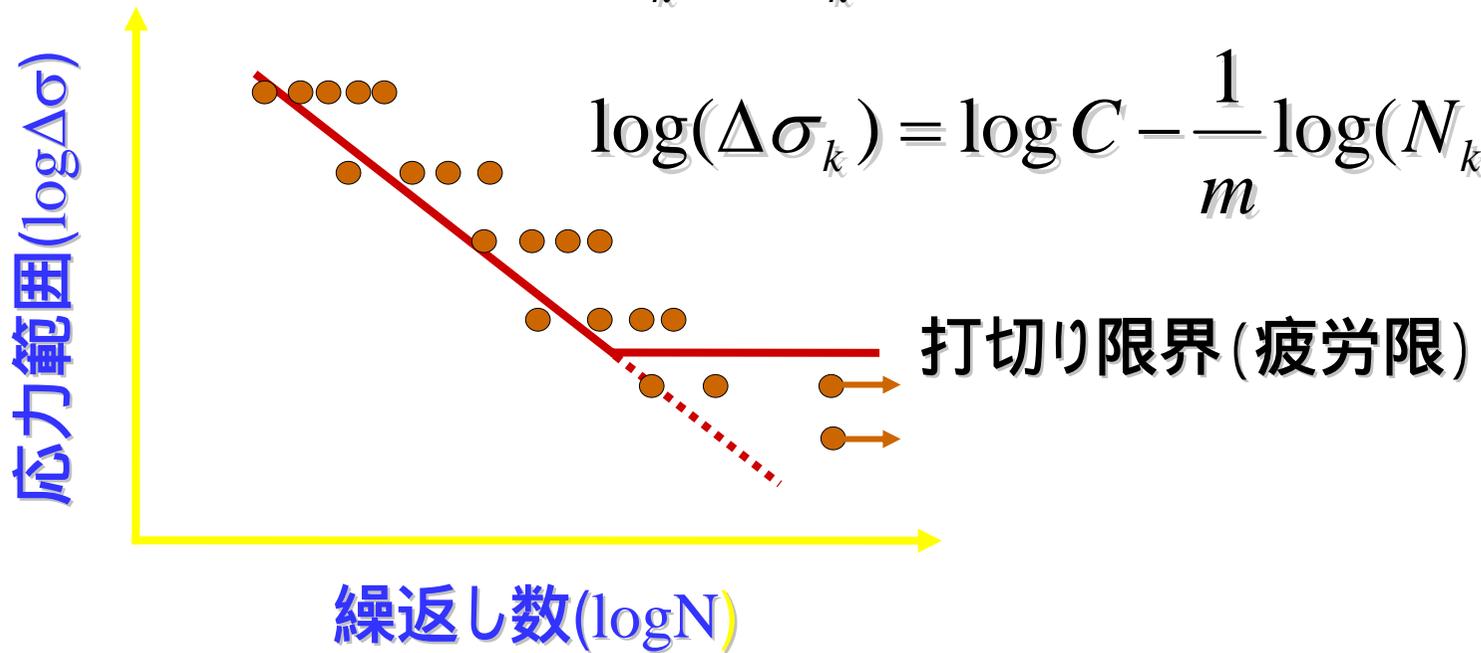
構造的因子 (溶接継手の場合)



疲労強度曲線

$$N_k \cdot \Delta\sigma_k^m = C$$

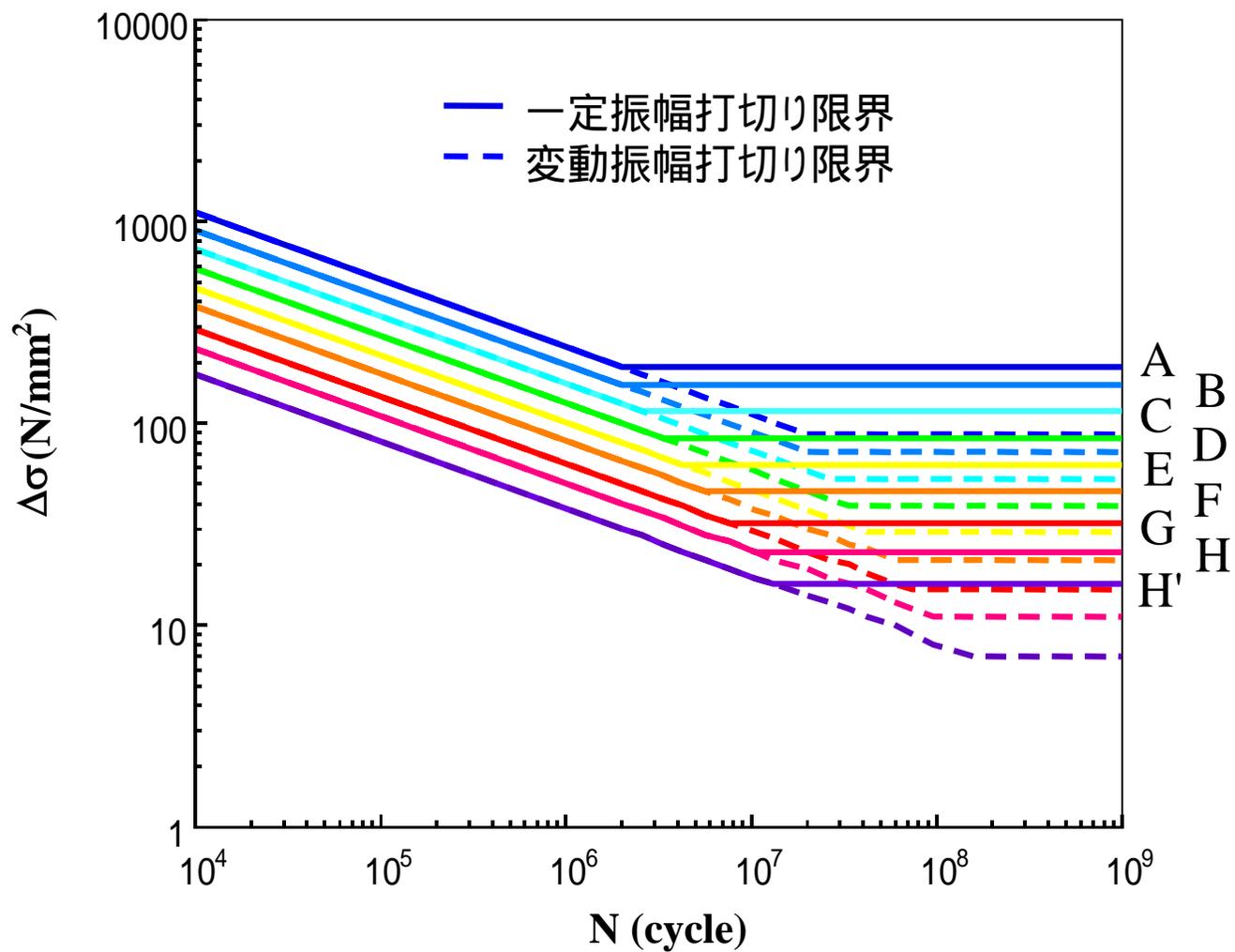
$$\log(\Delta\sigma_k) = \log C - \frac{1}{m} \log(N_k)$$



S-N 曲線

疲労強度等級

疲労強度曲線



継手分類

道路協会：疲労設計指針の例

注意すべき継手

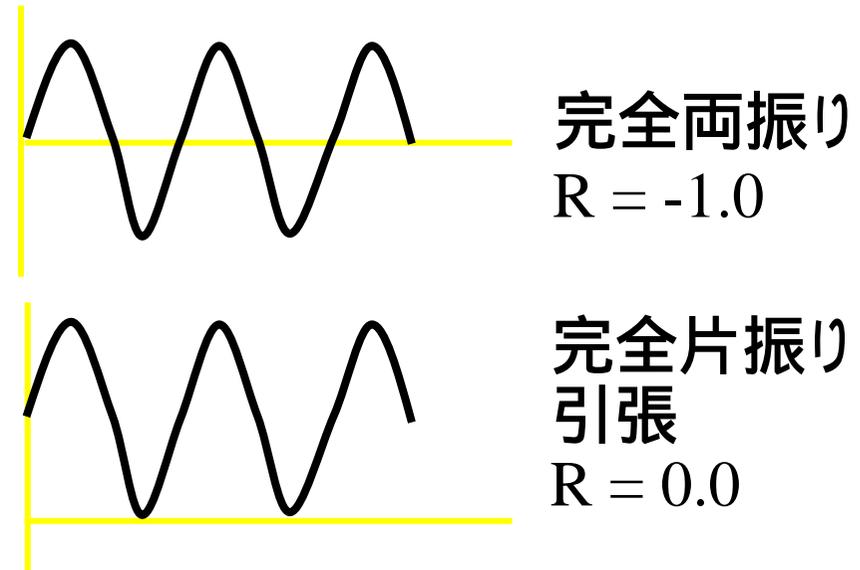
- 裏当て金付き
片面溶接
- スカーラップ, ガセット
プレートの回し溶接
- 荷重伝達型
十字すみ肉溶接
- カバープレート
重ね継手

(e) 荷重伝達型十字溶接継手

継手の種類		強度等級 ($\Delta\sigma_f$ (N/mm ²))	備考						
1. 完全 溶込み溶接	(1) なめらかな止端を有する継手	D (100)							
	(2) 止端仕上げした継手	D (100)							
	(3) 非仕上げの継手	E (80)							
	(4) 中空断面 部材 (片面溶接)	1) 裏当て金なし F (65) 2) 裏当て金あり G (50)							
	1) なめらかな止端を有する継手 2) 止端仕上げした継手	E (80) E (80)	<p>注) 1. (1), 1. (2), 1. (3) の継手の強度等級は、溶接内部のきず寸法が次のものを対象とする。</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>厚板 t</th> <th>きず寸法</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>t ≤ 18 mm</td> <td>3 mm 以下</td> </tr> <tr> <td>t > 18 mm</td> <td>1/6 以下</td> </tr> </tbody> </table> <p>これらの継手において、溶接内部のきず寸法を板厚の 1/6 をこえ、板厚の 1/3 以下とした場合は、強度等級は F 等級としなければならない。</p> <p>注) 1. (1), 2. (1) の継手において、アンダーカットは除去する。このとき、仕上げは応力の方向と平行に確実に行わなければならない。</p>	厚板 t	きず寸法	t ≤ 18 mm	3 mm 以下	t > 18 mm	1/6 以下
厚板 t	きず寸法								
t ≤ 18 mm	3 mm 以下								
t > 18 mm	1/6 以下								

応力比(平均応力)の影響

応力比 $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$



- 溶接残留応力(引張降伏)があるため、応力比の影響は小さい。
- 平均応力が圧縮の場合は、亀裂の進展で引張残留応力が解放 亀裂進展が遅くなる

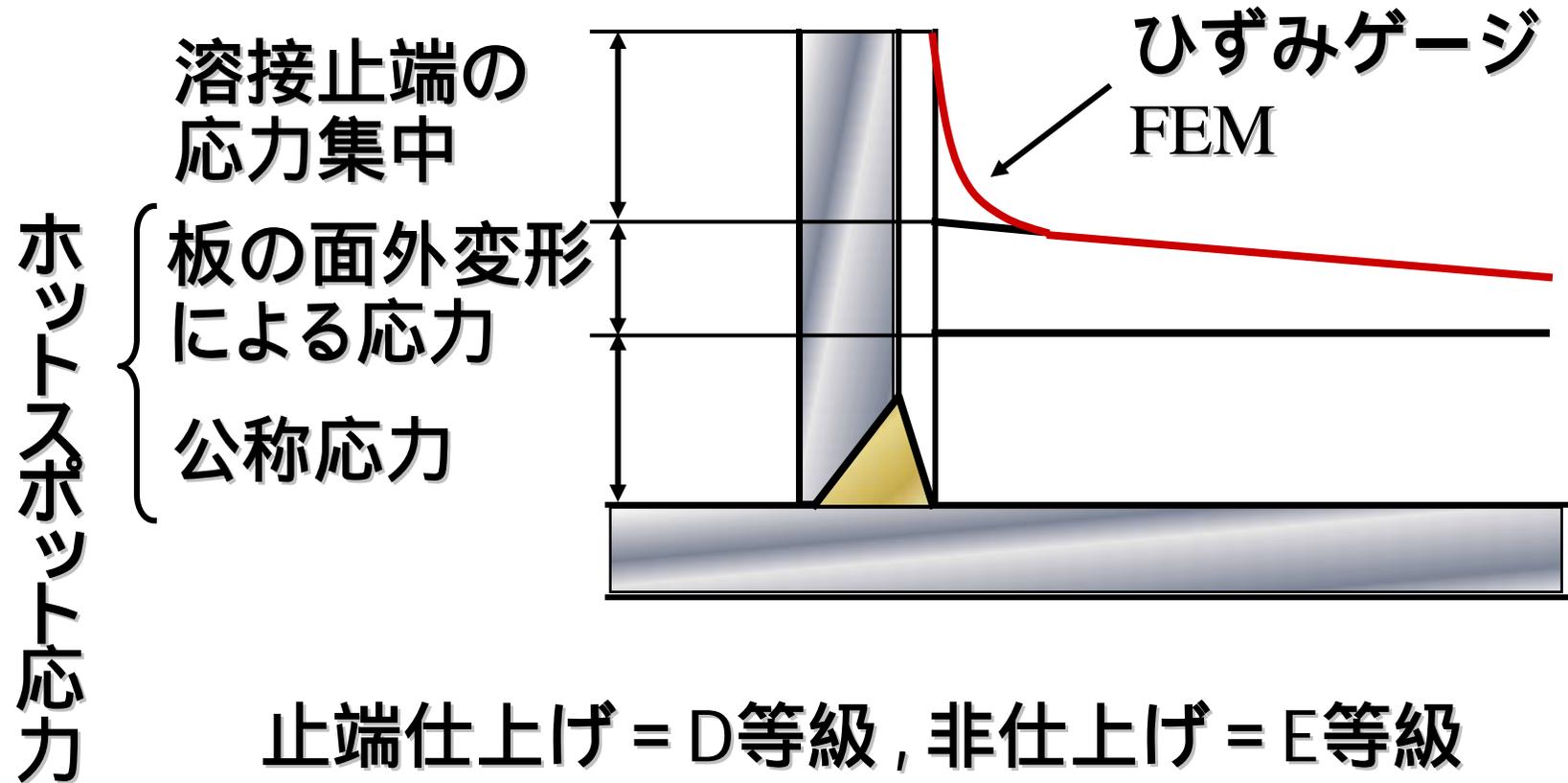
板厚効果

- 継手形式によっては、板厚により応力集中および応力分布が相違する。
- 上の原因で、厚板ほど疲労強度が低下する。

板厚効果が確認されている継手

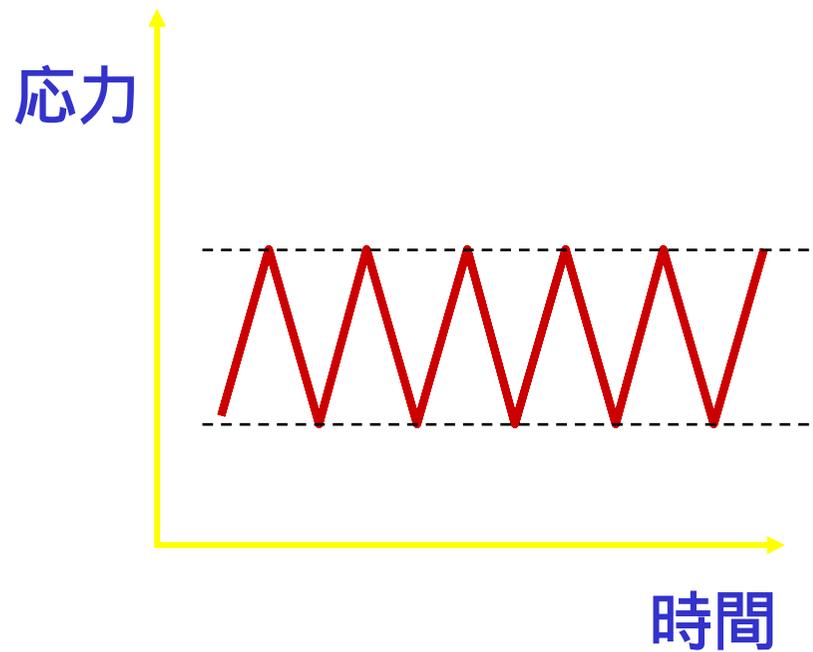
- 非仕上げの荷重非伝達型十字継手
- カバープレート継手
- 面外ガセット継手…

公称応力とホットスポット応力

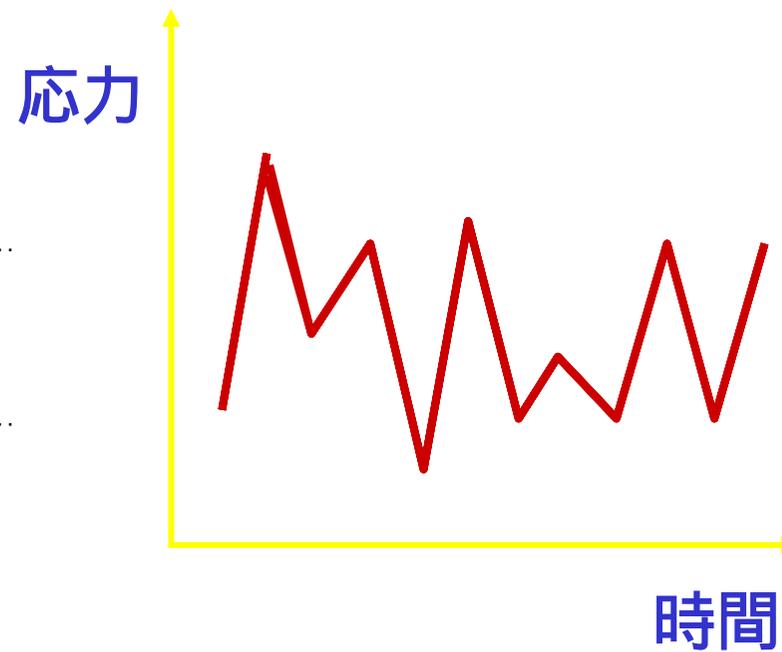


止端仕上げ = D等級, 非仕上げ = E等級
(荷重伝達すみ肉・部分溶け込みでは
仕上げ = E等級, 非仕上げ = F等級)

変動振幅応力の取り扱い



一定振幅応力

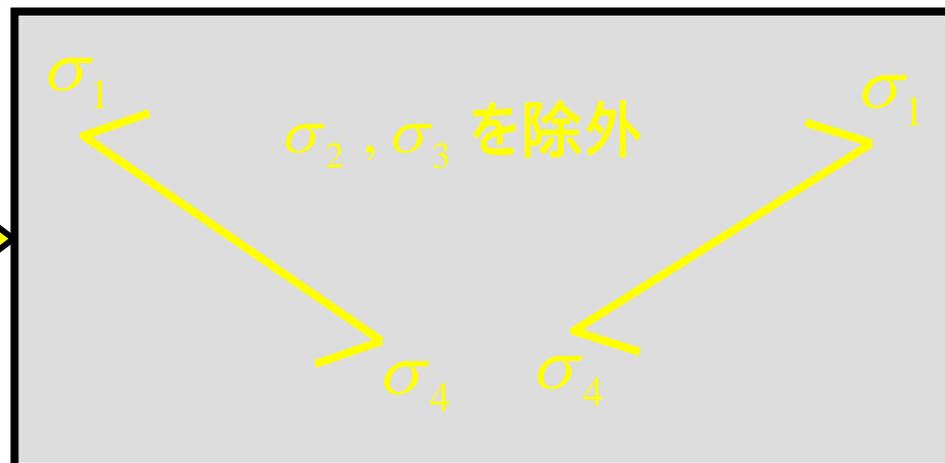
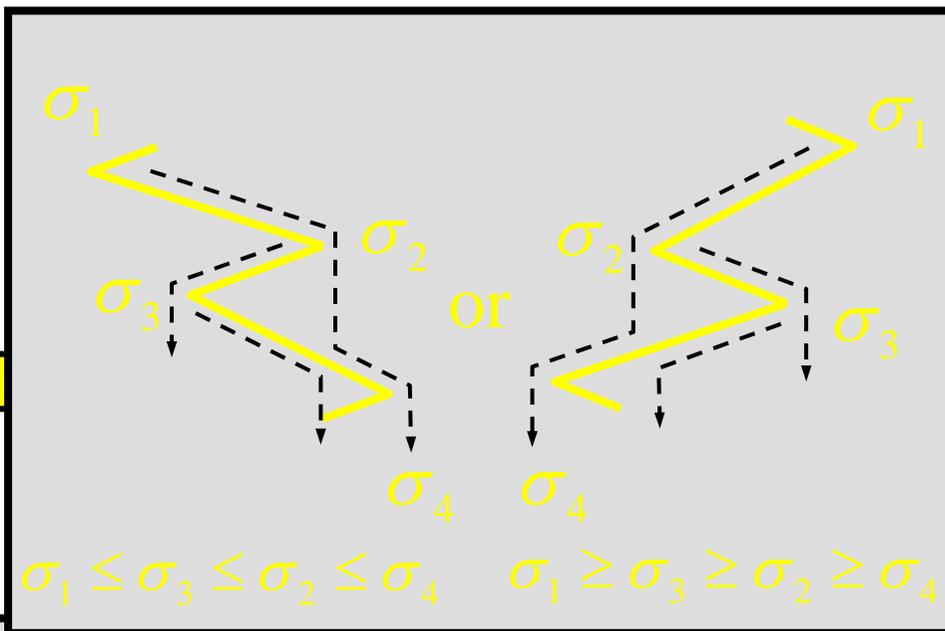


変動振幅応力

応力頻度解析

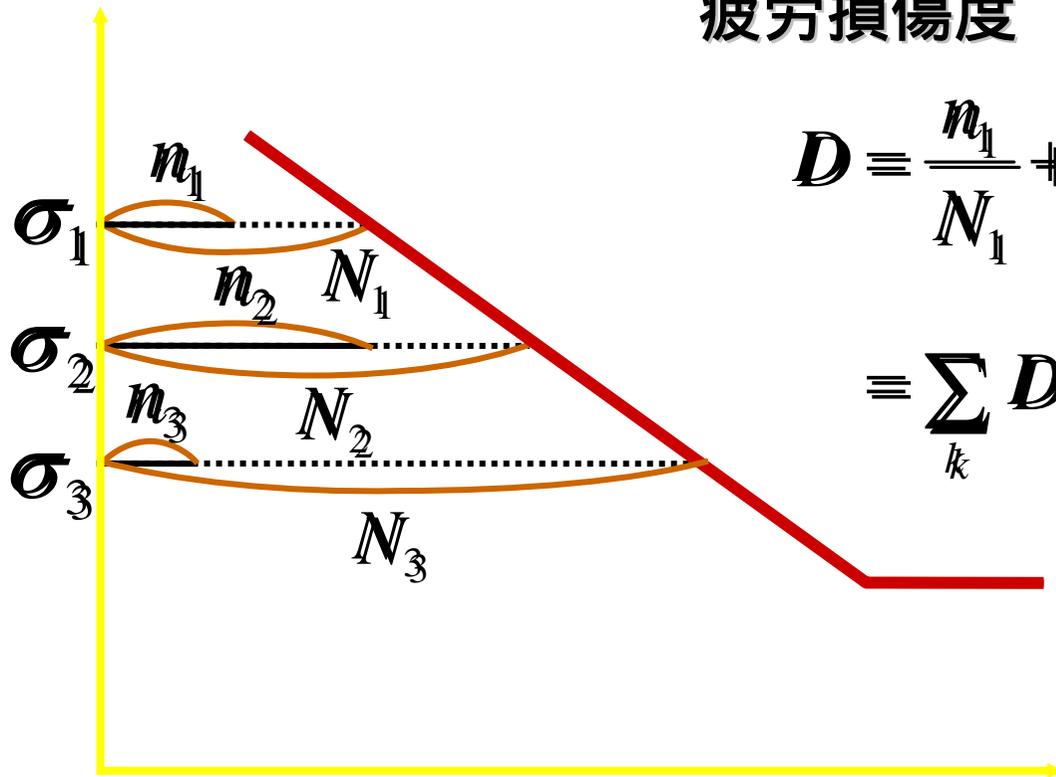
インフロー法

$|\sigma_2 - \sigma_3|$ を計数



線形被害則 (マイナー則)

応力範囲



疲労損傷度

$$D \equiv \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \Lambda$$

$$\equiv \sum_k D_k \equiv \sum_k \frac{n_k}{N_k} \leq 1$$

繰返し数 N

等価応力範囲・等価繰返し数

$$N_{lk} \cdot \Delta\sigma_{lk}^{mn} = C \Rightarrow N_{lk} = \frac{C}{\Delta\sigma_{lk}^{mn}}$$

$$D = \sum_{lk} \frac{n_{lk}}{N_{lk}} = \sum_{lk} n_{lk} \cdot \frac{\Delta\sigma_{lk}^{mn}}{C} \leq 1 \Rightarrow \sum_{lk} (n_{lk} \cdot \Delta\sigma_{lk}^{mn}) \leq C$$

等価応力

$$\sum_{lk} (n_{lk} \cdot \Delta\sigma_{lk}^{mn}) = \sum_{lk} n_{lk} \cdot \frac{\sum_{lk} (n_{lk} \cdot \Delta\sigma_{lk}^{mn})}{\sum_{lk} n_{lk}} = \left(\sum_{lk} n_{lk} \right) \cdot \underline{\Delta\sigma_{eq}^{mn}}$$

等価繰返し数

$$\sum_{lk} (n_{lk} \cdot \Delta\sigma_{lk}^{mn}) = \frac{\sum_{lk} (n_{lk} \cdot \Delta\sigma_{lk}^{mn})}{\underline{\Delta\sigma^{mn}}} \cdot \Delta\sigma^{mn} = \underline{N_{eq}} \cdot \Delta\sigma^{mn}$$

腐食と疲労

- 足し算 = 腐食部材の疲労
- 掛け算 = 腐食疲労 (疲労限の消失)
- 応力腐食割れ (遅れ破壊)
- 古い付き合い 長所も弱点もよく把握
弱点さえ作らなければ長持ち！

疲労設計？？？

道路橋示方書改訂(平成14年版)

「疲労の影響を考慮しなくてもよい」

「疲労の影響を考慮するものとする」

180度、正反対の方針の転換！

21世紀

二つの高齢化(老朽化)

人間と社会基盤

団塊の世代！

持続可能な発展

「使い捨て」文化

「良いものを、長く、大事に使う」

「良いもの」とは？

見分ける目、採用する目
造る力

説明責任

情報公開

安全性？

厳しい世間の目！

「隠す」

構造物の寿命

何年もつ？

永久に大丈夫？

保証できる？

疲労設計

- なぜ必要か？
- 何が変わるのか？
- 基本的な考え方は？

なぜ必要か？

疲労で落ちた橋はあるか？

外国では有り！

日本では？

疲労で落橋！？

- Point Pleasant 橋、1967
- Mianus Riv. 橋、1983
- 聖水橋、1994
- 大垣大橋、1991
- 山神橋、1992
- Hoan橋、2000
- JR中央線、2004
- ？ ？ ？、2005 ？

疲労損傷の傾向

- 二次応力で二次部材
-
- 二次応力で一次部材
-
- 一次応力で一次部材！

何が変わるのか？

コストアップ？

100年間の耐用保証
LCC評価で有利！

構造のシンプル化
製作費も減少？

基本的な考え方は？

疲労設計はマニアック？

疲労寿命は倍半分の世界！

弱点を作らなければOK！

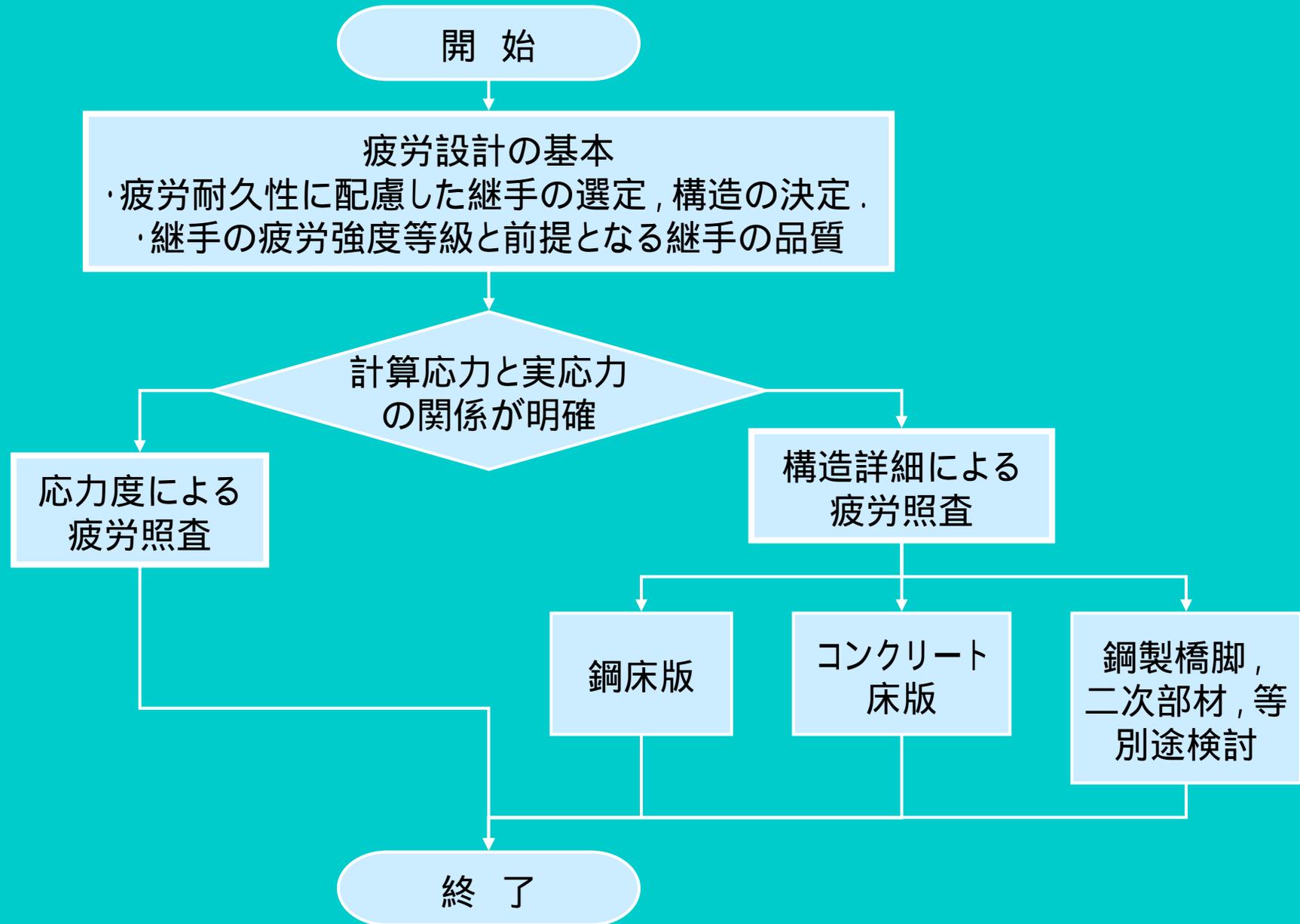
構造詳細

疲労照査(諸条件、疲労限、損傷度)

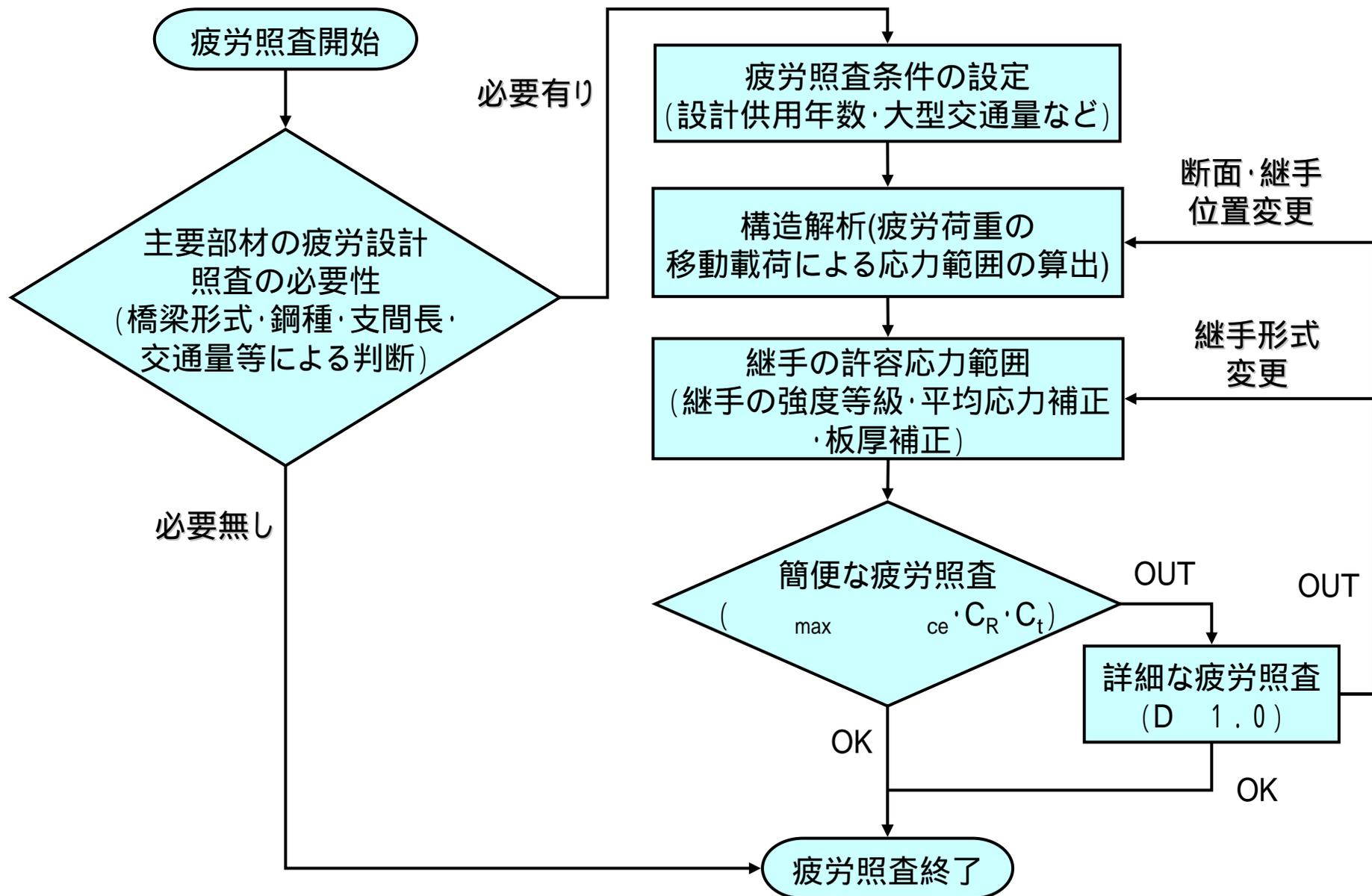
疲労設計の基本

- 疲労強度が著しく低い継手(H等級)や,過去に疲労損傷が報告されている構造を避ける(構造詳細).
- 強度が明らかかな継手を採用する(継手の強度等級表) 応力照査が可能
- 溶接施工,非破壊検査が困難な継手は採用しない(継手強度の前提).

疲労設計の流れ



応力度による疲労照査フロー



疲労に対する安全性が確保されていると見 なす条件 (第1段階)

橋梁形式	コンクリート床版を有する鋼げた橋
使用継手	疲労強度等級 A ~ F 等級
使用鋼種	SS400, SM400, SM490Y, SM520, SMA400, SMA490, SMA490Y, SMA520
支間長	最小支間が 50 m 以上
大型車交通量	1000 台 / (日・車線) 以下

簡便な疲労照査 (第2段階)

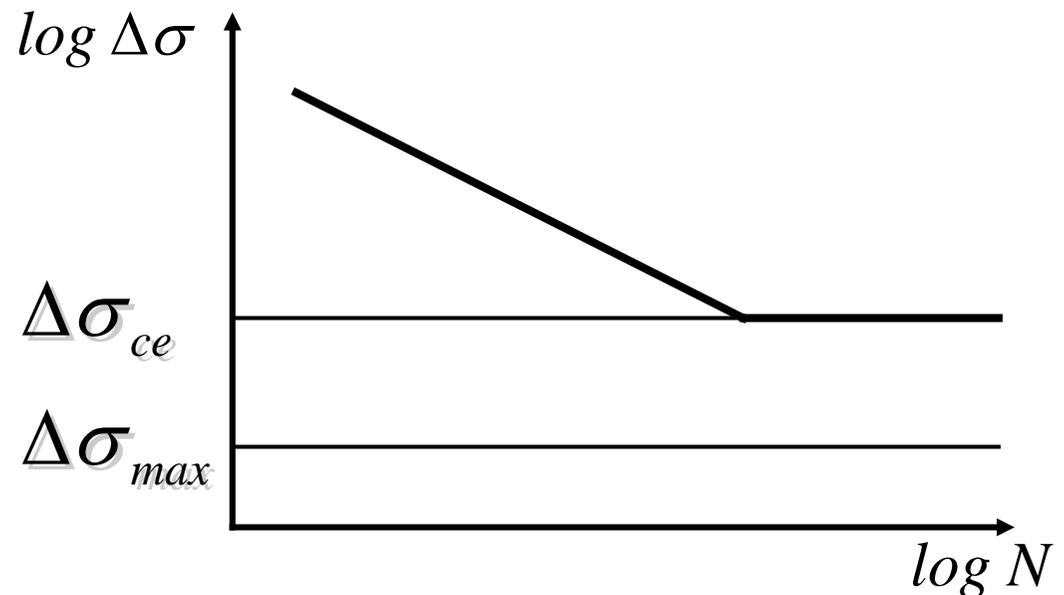
- 寿命無限 -

$$\Delta\sigma_{max} \leq \Delta\sigma_{ce} \cdot C_R \cdot C_t$$

$\Delta\sigma_{ce}$: 打ち切り限界 (一定振幅応力)

C_R : 平均応力の影響

C_t : 板厚の影響



詳細な疲労照査 (第3段階)

- 寿命有限 -

載荷回数(車線ごと) $n_{Ti} = ADTT_{SLi} \cdot \gamma_n \cdot 365 \cdot Y$

$ADTT_{SLi}$: 車線 i の日大型車交通量 = $ADTT/n_L \times \gamma_L$

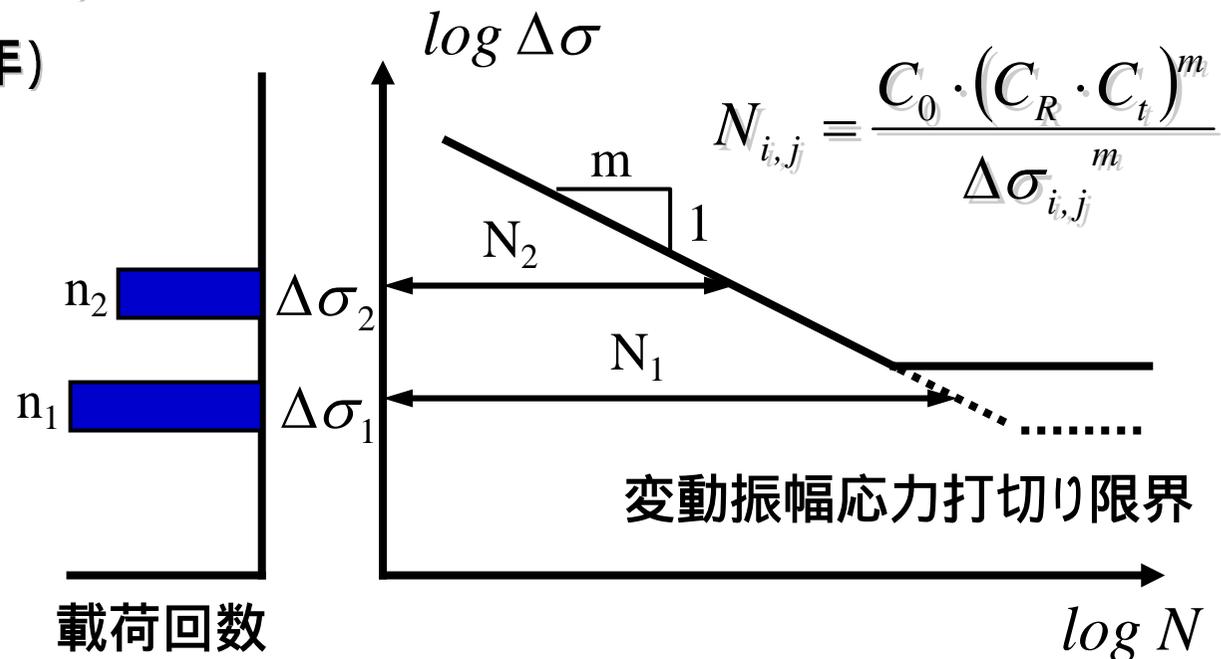
n_L : 車線数, γ_L : 車線交通量の偏り係数

γ_n : 頻度補正係数(0.03)

Y : 設計供用期間(年)

累積損傷度

$$D = \sum_i \frac{n_{ti}}{N_{i,j}} \leq 1.0$$



載荷回数

照査を満足しない場合の改善 (一般論)

● 疲労強度改善

止端破壊 …… 止端仕上げ

ルート破壊 …… のど厚増加, 完全溶け込み

継手種類変更 …… ボルト継手

……

● 作用応力低減

板厚増加

継手位置変更

……

構造詳細による疲労設計

- **鋼床版** (疲労設計指針 第5章)
- **疲労耐久性上望ましくない構造**
(疲労設計指針 参考資料1.3)
- **継手構造の改善例**
(疲労設計指針 参考資料1.4)

鋼橋(鋼構造)の特長

- ・軽量 耐震性高い
- ・工期が短い 改良、架替に有利
- ・高耐久性 LCCで有利！
 再利用(リユース)可能！

ご静聴ありがとうございました！

