令和6年度「橋梁技術発表会及び講演会」 2024年11月1日

鋼橋の低サイクル疲労破壊 の予測と防止



鋼橋における疲労問題

極低サイクル疲労

N < 10 cycles

低サイクル疲労

塑性変形の繰返し N < 10³ or 10⁴ cycles Ex. 地震荷重

高サイクル疲労

弾性変形の繰返し N > 10⁴ or 10⁵ cycles Ex. 交通荷重

超高サイクル疲労

N > 10⁷ cycles



土木構造物と低サイクル疲労性状

奥村敏恵,堀川浩甫:土木構造物と低サイクル疲労性状 溶接学会誌,第37巻,第5号,pp.494-501,1968, https://doi.org/10.2207/qjjws1943.37.494

1. はしがき

(前略)・・・,現状では鋼橋においては,低サイクル疲労の影響を 設計の基準の中には取り入れておらず,したがって構造物設計の 基礎的条件を確立するための低サイクル疲労に関して実験も行わ れていない.しかし,構造部材の性格によっては,設計をより合理 的なものにするためには,近い将来において低サイクル疲労の考 え方を取り入れる必要が生じるものと考えられる.・・・

鋼橋の低サイクル疲労破壊 no.1

<u> 兵庫県南部地震 (1995)</u>



鋼製橋脚の角溶接部の 割れによる圧壊

鋼製橋脚基部

鋼製橋脚隅角部

出典:土木学会鋼構造委員会鋼構造震災調査特別小委員会,阪神・淡路大震災における 鋼構造物の震災の実態と分析,土木学会論文集,No.647/l-51, pp.17-30, 2000.

鋼橋の低サイクル疲労破壊 no.2

東北地方太平洋沖地震 (2011)

長時間継続地震動 (about 240 sec) →構造物が大きく揺れる回数が増加する





アーチ橋横構ガセット接合部の破断

トラス橋横下弦材格点の破断

出典:土木学会鋼構造委員会東日本大震災鋼構造物調査特別委員会,東日本大震災 鋼構造物調査特別委員会報告書,2012.

5

鋼橋の低サイクル疲労破壊 no.3

<u>東北地方太平洋沖地震 (2011)</u>

長時間継続地震動 (about 240 sec) →構造物が大きく揺れる回数が増加する



|桁橋のニーブレースフランジ付きの垂直補剛材の破断

出典:土木学会鋼構造委員会東日本大震災鋼構造物調査特別委員会,東日本大震災 鋼構造物調査特別委員会報告書,2012.

土木学会鋼·合成構造標準示方書



耐震設計編 2008年制定版 部会長:宇佐美勉先生

4章「耐震性能照査」 枠囲いの中に低サイクル疲労 に関して明文化

土木学会鋼·合成構造標準示方書



耐震設計編 2018年制定版 小委員長:後藤芳顕先生

4章「耐震性能照査」 補遺4-5において,低サイクル 疲労照査法が具体に記載







- き裂発生を予測する技術の開発

- き裂進展を予測する技術の開発
- 疲労強度を向上する技術の開発

- 疲労照査法の開発



- き裂発生を予測する技術の開発

- き裂進展を予測する技術の開発
- 疲労強度を向上する技術の開発

- 疲労照査法の開発





砂時計型試験体 (圧縮時の座屈を防止)

- ・試験可能なひずみの大きさに<mark>限界がある</mark>
- ・試験断面は一断面のみであり, 溶接継手に適用することが困難

極低サイクル疲労領域における 溶接部の疲労強度を明らかにすることは難しい





画像計測により試験体に生じるひ ずみを計測し、その値を制御しな がら曲げ変形を繰り返し与える





<u>疲労寿命の定義</u>:き裂長0.5mmのときの繰返し数

低サイクル疲労寿命予測モデル

$$D = D_{cyclic} + D_{ductile} = 1.0$$
(き裂発生)

$$=\sum_{i}\frac{n_{i}}{N_{i}} \qquad if \Delta \varepsilon_{max} \leq \varepsilon_{pD}$$

ひずみレベルが小さい(低サイクル疲労領域) → Miner則(従来の評価方法と整合)

$$= \sum_{i} \frac{n_{i}}{N_{i}} + \frac{\Delta \varepsilon_{max} - \varepsilon_{pD}}{\varepsilon_{f} - \varepsilon_{pD}} \quad if \Delta \varepsilon_{max} > \varepsilon_{pD}$$

ひずみレベルが大きい (極低サイクル疲労領域) → 塑性損傷 D_{dutile} を考慮

低サイクル疲労寿命予測モデル

$$\boldsymbol{\varepsilon}\cdot \boldsymbol{N}^{k}=\boldsymbol{C}\cdot\boldsymbol{C}_{m}$$

$$C_{m} = \begin{cases} 1.0 & \text{if } \Delta \varepsilon_{max} \leq \varepsilon_{pD} \\ \left(\frac{\varepsilon_{f} - \Delta \varepsilon_{max}}{\varepsilon_{f} - \varepsilon_{pD}}\right)^{k} & \text{if } \Delta \varepsilon_{max} > \varepsilon_{pD} \end{cases}$$

- C_m :大きな塑性変形による損傷を考慮するための係数
- *ε_{pD}* :損傷発生限界ひずみ
- ε_f :破断延性
- k, C :材料定数
 - 鋼素材 : k=0.587, C=0.392
 溶接金属 : k=0.587, C=0.261
 HAZ : k=0.587, C=0.203

溶接部の低サイクル疲労強度曲線



<u>疲労寿命の定義</u>:き裂長0.5mmのときの繰返し数







TYPE-1 specimen



TYPE-2 specimen

変位振幅 TYPE-1 specimen → 4, 6, 8mm TYPE-2 specimen → 35mm



溶接継手におけるき裂発生点



低サイクル疲労き裂 溶接金属部とHAZの境界から少し 溶接金属部に入った位置で発生

溶接継手試験体の 低サイクル疲労強度 ⇔ <mark>溶接金属部</mark> の疲労強度に依存

有限要素解析による局部ひずみの算出



止端半径 ρ = 0.73 mm 止端角 θ = 134.6 deg.

硬さ試験結果より 降伏強度を推定



局部ひずみに基づく疲労強度評価











既存橋脚隅角部に多くの溶接未溶着が内在



出典:三木千壽, 平林泰明:施工の不具合を原因とする疲労損傷, 土木学会論文集A, Vol.63, No.3, pp.518-532, 2007.

24

落橋防止装置等の溶接不良

落橋防止装置等の溶接不良に関する有識者委員会 中間報告書(概要)



25

未溶着を含む溶接継手試験体



鋼材:JIS SM400 降伏強度:299 N/mm² 引張強度:451 N/mm² Partial penetration weld



Fillet weld

未溶着を含む溶接継手試験体



H: 溶接脚長, 2a: 不溶着寸法, tp: 主板厚, 2a/tp: 不溶着比, H/tp: 溶接脚長比

27



Specimen category	FP	PP		FL		
Macro- graphs						
<mark>2a</mark> / t _p	0%	44%	73%	71%	80%	82%
H / t _p	45%	50%	48%	33%	56%	77%
Specimen name	FP	PP40	PP70	FL30	FL50	FL70

H: 溶接脚長, 2a: 不溶着寸法, tp: 主板厚, 2a/tp: 不溶着比, H/tp: 溶接脚長比

28

溶接継手の引張強度の比較



低サイクル疲労試験方法

・変位計の出力値(変位)を制御

·一定振幅変位

0.8, 1.0, 1.2 mm

·最小変位

0 mm

- ·載荷速度 0.05 mm/s
- ・試験中は試験体側面を写真撮影し
 き裂発生・進展挙動を記録.
- ・最大荷重が急激に減少した段階で 繰返し載荷は終了.静的載荷により 破断分離.







Displacement range 0.8 mm





Displacement range 0.8 mm











Displacement range 0.8 mm





Displacement range 0.8 mm



止端 – ルート破壊




き裂発生および進展状況 no.3





Displacement range 0.8 mm

き裂発生および進展状況 no.3





Displacement range 0.8 mm



ルート破壊





疲労寿命の整理



40 疲労寿命:き裂長が0.5 mmに達したときの繰返し数

有限要素解析

繰返し変位



- ABAQUS program

- 平面ひずみ要素

母材(BM) 溶接金属(WM) HAZ 繰返し変位 R1.0 R1.0 Sym. 溶接止端近傍 溶接ルート近傍 Sym. - 応力ひずみ関係 BM:引張試験結果 WM, HAZ: 母材の20%増しの強度を仮定 (硬さ試験結果を基に) - 複合硬化則 - 最小要素サイズ 0.05mm - 弾性係数とポアソン比 200 kN/mm², 0.3

局部ひずみによる疲労寿命の整理



相当ひずみ分布による破壊形式の予測



止端破壊



止端 - ルート破壊



相当ひずみ分布による破壊形式の予測



溶接形状パラメータと破壊形式の関係





トラス橋格点部の低サイクル疲労破壊

<u>東北地方太平洋沖地震 (2011)</u>

弦材のき裂, 座屈 (下路トラス橋)







FCM (Fracture Critical Member): 引張応力を受ける部材もしくは部材の一部が破断することにより、その橋梁が崩壊 もしくは橋梁としての機能を失う場合

出典:土木学会鋼構造委員会東日本大震災鋼構造物調査特別委員会,東日本大震災 鋼構造物調査特別委員会報告書,2012.

解析対象としたトラス橋

鋼3径間連続上路式トラス橋と 2径間連続RC中空床版橋からなる橋梁 (昭和59年に供用開始)



Unit: mm





入力地震動



ひずみ集中点





溶接止端部を仕上げることにより(R=6mm程度)損傷度を1以下に低減



- き裂発生を予測する技術の開発

- き裂進展を予測する技術の開発

- 疲労強度を向上する技術の開発

- 疲労照査法の開発



繰返し積分範囲の定義





繰返し
J積分
$$\Delta J = \int_{\Gamma} \left(\frac{W}{W} dy - \Delta T \frac{\partial \Delta u}{\partial x} ds \right)$$

Range of strain density

Traction vector range

$$W' = \int_0^{\Delta \varepsilon_y} \Delta \sigma_{ij} d\Delta \varepsilon_{ij}$$



解析コード:Abaqus.6.13 解析モデル:平面ひずみ要素を用いた1/2モデル 構成則:バイリニア型,移動硬化則 弾性係数:200 kN/mm² ポアソン比:0.3

き裂進展速度と繰返し」積分の関係



角継手のき裂進展試験





有限要素モデル







Crack direction in specimen





角継手のき裂進展挙動の予測





- き裂発生を予測する技術の開発

- き裂進展を予測する技術の開発
- 疲労強度を向上する技術の開発
- 疲労照査法の開発







グラインダー 処理 TIG処理



溶接まま



溶接止端部を滑らかにすることにより ひずみ集中を低減でき,疲労強度を 向上できる可能性がある



止端処理による疲労強度向上効果





鋼製橋脚基部への止端処理の適用



鋼製橋脚基部への止端処理範囲の検討





- き裂発生を予測する技術の開発

- き裂進展を予測する技術の開発
- 疲労強度を向上する技術の開発

- 疲労照査法の開発

鋼製橋脚基部に対する簡易な疲労照査法案



局部ひずみと公称ひずみの関係

ソリッド要素によりモデル化



公称ひずみを基準とした疲労強度曲線案



提案した疲労強度曲線の検証



鋼製橋脚基部の低サイクル疲労照査フロー案








入力地震動

入力加速度(東北地方太平洋沖地震)

継続時間:4分

也震応答解析	地盤 種別	記録場所及び成分	呼び名	最大加速度 (gal)
	I種	開北橋周辺地盤上 EW成分	I - I -2	480
公称ひずみの 時刻歴波形		新晚翠橋周辺地盤上 NS成分	I - I -3	583
	Ⅱ種	仙台河川国道事務所構内地盤上 EW成分	I - II -2	675
		阿武隈大堰管理所構内地盤上 NS成分	I - II -3	509
ひずみ振幅の 頻度分布	Ⅲ種	山崎震動観測所地盤上 NS成分	I -Ⅲ-2	533
		土浦出張所構内地盤上 EW成分	I-Ⅲ-3	398

(平成24年 道路橋示方書 タイプ I 地震動)



鋼製橋脚の

モデル化

解析ケース:28橋脚×6地震動=168ケース

公称ひずみの時刻歴波形と頻度分布



各ひずみによる疲労損傷度の算出



77





溶接止端処理による疲労強度向上効果



溶接止端処理により長時間継続地震動下での低サイクル疲労 き裂の発生を防止できる可能性が示された

まとめ

- き裂発生を予測する技術の開発
 - → き裂発生点の局部ひずみによりき裂発生寿命 を予測できることを示した.
- き裂進展を予測する技術の開発
 - → 繰返し」積分範囲によりき裂進展速度を評価 可能であることを示した.
- 疲労強度を向上する技術の開発
 - → 溶接止端処理により疲労強度を向上できる ことを示した.
- 疲労照査法の開発
 - → 比較的簡易な構造計算により求められる公称ひずみ により、鋼製橋脚基部の低サイクル疲労照査を行う 仕組み案を示した.

さいごに

ものがどのように壊れるかを,実際に目で見て 学ぶことが,ものを壊さないように守ることにつ ながると考えています.

実験による実現象の解明を大切にしつつ,最 新の数値解析技術・デジタル技術等も取り入 れながら,今後も,価値あるものを未来に残 すための技術開発に取り組んでまいります.

