鋼橋の疲労亀裂進展シミュレーション手法 の開発とその維持管理への応用

プロジェクトリーダー

関西大学環境都市工学部教授 坂野 昌弘 参加メンバー

- (社)日本橋梁建設協会、(財)海洋架橋・橋梁調査会 産 阪神高速道路(株) 関西大学環境都市工学部
- 学

京都大学大学院工学研究科

国土交通省 近畿地方整備局 官

(道路部、大阪国道事務所、近畿技術事務所)

研究の背景 何が問題か?

<u>横リブのスカーラップ部</u>から疲労亀裂が発生



<u> 亀裂の発生原因と進展挙動の究明が必要!!</u>

研究の内容 どうアプローチしたか?







主な結論

- 実橋計測
 - 実態応力を把握できた
 - 補強効果を実測で確認
 疲労寿命は10~15年から
 100年以上に改善される
- 模型実験および数値解析
 - 汎用FEMソフトウェアへの XFEMプログラムの組込み
 - 疲労き裂の進展経路について 良い一致が得られた

- 疲労寿命を安全側で評価

リブA スカラップ溶接部





鋼床版バルブリブと横リブ交差部の 補強効果の確認

—— S橋応力計測結果報告 ——

国土交通省 近畿地方整備局 社団法人 日本橋梁建設協会

はじめに

- 本調査はS橋においてバルブリブと横リブ交差部から発生した疲労亀裂に着目し、試験車を用いた応力計測および実働車両に対する72時間連続応力計測を実施したものである。
- 応力計測は、補強前と補強後の両方に対して行い、 補強効果の確認を行った。
- 荷重車による計測結果から補強前後における着目 リブの応力状態の変化を確認し、72時間連続計測 結果から補強による疲労寿命の向上効果を確認した。







【調査対象橋梁】 • 1969(S44)年竣工[竣工後40年経過] • 3径間連続鋼床版箱桁×2連(上下線) • 中分側が阪神高速,路肩側が国道43号 • 上流側橋梁の国道部分,側径間箱桁内

疲労損傷状況と測定箇所

- ・疲労損傷は横リブと縦リブ交差部に見られる。 ・損傷は主桁ウエブから2本目,3本目の縦リブに多い。 ・亀裂はバルブリブ下側スカーラップの溶接止端部を始 点とし,斜め45度上方向へ進展している。
- ・バルブは180×9.5,下側スカラップはR25と小さい。
- ・応力測定箇所は損傷横リブに挟まれた健全横リブ部。





補強工法

・縦リブをL形鋼(130×130×9)
で挟み込み,HTBで取り付けて
補強(バルブ頭側にはフィラー)。
・損傷発生箇所はリブ両側補強。
・損傷のない箇所は予防保全対
策として片側(スリット側)補強。





計測内容(補強前後)



試験車載荷パターン(CASE1~6)



試験車の軸重と形状



mm ₁₂

試験車測定結果(応力分布,ケース1)

・発生応力はスリット上端部,バルブ始端部ともにコバ面(①,②)が最大を示す。
 ・補強前(青色)に比べ,補強後(赤色)のリブコバ面応力は1/3程度に低減している。
 ・三軸ゲージは表裏面でほぼ同程度の応力状態を示す(面外曲げ応力の影響なし)。





試験車測定結果(応力分布,ケース3)

・リブAの直上載荷では,リブAに大きな圧縮応力が作用している。

・補強後(赤色)のリブAのコバ面応力は,1/3~1/4程度に低減している。





リブAとリブBのコバ面応力分布



リブCとリブDのコバ面応力分布



縦リブ貫通空間上部コバ面

スカラップ溶接 コバ面

試験車による補強前後の最大計測応力比較





疲労寿命の試算(レインフロー法)

疲労寿命ならびに等価応力範囲は大幅に改善

応力分布



		補強前			補強後			
リブ	測点	疲労寿命(年)		等価応力範囲	疲労寿命	命(年)	等価応力範囲	
		強度等級E	強度等級F	N/mm2	強度等級E	強度等級 F	N/mm2	
^	1	34	13	15.8	2100	550	8.3	
^	2	35	14	15.7	2600	480	8.7	
Б	1	130	44	12.2	6400	2200	6.6	
В	2	120	46	11.8	3700	1200	7.2	
<u> </u>	1	270	92	10.8	∞	6500	6.4	
Ŭ	2	150	44	12.5	600	120	10.7	
	1	71	27	13.6	7800	1700	7.3	
D	2	100	38	13.2	870	190	10.4	
構ロブ	E-1	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	~	2.4	∞	~	2.7	
1页ワフ	E-2	5800	890	6.8	3500	790	6.7	





まとめ

①スカーラップ部の輪荷重による発生応力は,横リブせん断変形による応力と直接載荷による応力の和となっている。

②横リブせん断変形による応力は、スカーラップの向きと 輪荷重の位置により、圧縮や引張になる。

③輪荷重の直接載荷による応力は,圧縮応力となる。
④横リブウェブの面外変形の影響は小さい。
⑤スカーラップ部の応力は,補強により1/3程度に低減。
⑥応力頻度計測からは,強度等級Fを仮定して試算すると疲労寿命が10~15年程度→100年以上に改善。
⑦本補強工法は,予防保全対策としても有効である。



Kansai University: Steel Structure Design Lab.



平成21年5月29日

第6回新都市社会技術セミナー

「バルブリブ鋼床版の疲労試験」 研究報告

関西大学 環境都市工学部 都市システム工学科 鋼構造デザイン研究室



(a) 阪神高速道路

縦リブの種類	径間数	延長(km)
バルブリブ	633	43
しリブ	714	51
合計	1347	94

(b) 首都高速道路

縦リブの種類	径間数	延長(km)
バルブリブ、Iリブ、 バルブ-Uリブ併用	451	25
Uリブ, Yリブ	752	54
合計	1203	79

参考:厚板溶接継手に関する調査研究小委員会報告書 P157 平成19年10月

21



(a) 阪神高速道路

		縦リブ形式				스타	
	損傷タイプ	バルブリブ		リリブ			
		径間数	損傷数	径間数	損傷数	径間数	損傷数
1	縦リブとデッキプレートの溶接部(ビード貫通)	0	0	22	119	22	119
1)'	縦リブとデッキプレートの溶接部(デッキ貫通)	0	0	1	1	1	1
2	縦リブ突合せ溶接部	0	0	14	36	14	36
3	垂直補剛材とデッキプレートの溶接部	0	0	33	161	33	161
4	縦リブと横リブ交差部	29	1210	37	293	66	1503
5	その他	2	2	4	18	6	20
	合計	31	1212	1111	628	142	1840

(b)首都高速道路

		縦リブ形式					
	損傷タイプ	バルブリブ・Iリブ		Uリブ・Yリブ		合計	
		径間数	損傷数	径間数	損傷数	径間数	損傷数
1	縦リブとデッキプレートの溶接部(ビート貫通)	2	3	83	502	85	505
1)'	縦リブとデッキプレートの溶接部(デッキ貫通)	0	0	5	9	5	9
2	② 縦リブ突合せ溶接部		7	47	193	50	200
3	垂直補剛材とデッキプレート溶接部	7	117	36	1102	43	1219
4	縦リブと横リブ交差部	33	950	38	1259	71	2209
5	その他	20	165	15	441	35	606
	合計	65	1242	224	3506	289	4748

22

参考:厚板溶接継手に関する調査研究小委員会報告書 P157 平成19年10月





参考:田畑ら,鋼床版バルブリブと横リブ交差部の疲労損傷対策に関する実験的検討,土木学会³ 年次学術講演会,平成19年





参考:田畑ら,鋼床版バルブリブと横リブ交差部の疲労損傷対策に関する実験的検討,土木学会²⁴ 年次学術講演会,平成19年







実物大の試験体を用いて

- 1. <u>静的載荷試験</u>
- スリット部の応力影響線
- 載荷位置と実橋の疲労損傷発生位置の関係
- 2. <u>疲労試験</u>
- 疲労亀裂の発生・進展挙動
- 片側アングル補強による事後保全効果









<u>ひずみゲージ貼付位置と静的載荷試験載荷位置</u>

















載荷位置がD-5~7のスリット下部コバ面の応力範囲





① <u>スリット上下部コバ面の応力</u>

(a)スリット部のせん断変形により,

スリット上下部ともにバルブリブのスリット側に載荷すると

引張応力,スリットのない側に載荷すると圧縮応力が発生. (b)直上載荷の影響により,

スリット上下部ともに大きな圧縮応力が発生.

(c)スリット下部の方が上部より応力絶対値が大きい. (R=25mmの影響?)

③ <u>疲労き裂発生状況との対応</u>

(a) 疲労き裂発生状況 (リブ③と②に多発) と応力分布が近いの は載荷位置がD-6(リブ③と④の直上載荷)の場合である.



- ① 載荷位置D-6で疲労試験を行い, 実橋での疲労き裂 発生状況の再現を試みる.
 - (特にスリット下部の疲労き裂の進展挙動を詳細に検討する.)
- ① スリット下部の微小な疲労き裂に対して片側アングル 補強を施し,事後保全効果(=予防保全)の検証







シェル要素による3次元構造体のモデル化

■ 面内変形

純2次元問題(平面応力)と同一の定式化 XFEMによるき裂先端近傍特異場・き裂面不連続性を考慮

■ 面外変形

Kirchihoff理論(薄板理論)に基づいた定式化



☆
き裂の存在は考慮しない

面内変形に関するき裂の影響のみが 進展挙動に影響すると仮定(単純化)

疲労き裂の進展挙動の評価手法 疲労き裂の進展挙動の評価手法 進展方向 θ_c :最大周方向応力説 伝播速度da/dN:日本鋼構造協会 平均設計曲線

$$da/dN = C(\Delta K^{m} - \Delta K_{th}^{m})$$

$$\begin{pmatrix} C = 1.5 \times 10^{-11} \\ m = 2.75 \\ \Delta K_{th} = 2.9 \text{ MPa}\sqrt{m} \end{pmatrix}$$

之程

あらかじめシミュレーションの解析条件として∆aの値を 指定し、進展前後のK値より載荷繰り返し数を逆算する

疲労き裂の進展挙動の評価



汎用FEM解析ソフトウェアABAQUSへの XFEMによるき裂解析機能の組み込み

汎用のFEM解析ソフトウェアABAQUSをベースとして、 XFEMによるき裂解析機能を組込む.

■3次元構造体の解析モデルにおける板厚貫通疲労き裂の評価

 ソフトウェアのCAE (Computer Aided Engineering)による 解析モデル作成補助に直接対応したXFEMのモデル化

容易かつ効率的に疲労き裂進展シミュレーションを 実施可能な解析システム

汎用FEM解析ソフトウェアABAQUSへの XFEMによるき裂解析機能の組み込み















Case-1:初期き裂長さ a₀=1.60mm



全体的な傾向に良い一致 開発した解析システムの有効性が確認

ただし、進展序盤(溶接部近傍)において、

疲労試験 : 斜め方向に直線的に進展→屈折 シミュレーション : 全体的になめらかな曲線で進展



Case-2:初期き裂長さ a₀=9.45mm





進展経路に関して非常に良い一致 Case-1とCase-2と疲労試験との比較より き裂先端が溶接部に比較的近い進展の初期段階 残留応力や溶接部形状がき裂進展の再現性に影響



Case-2:初期き裂長さ a₀=9.45mm





汎用のFEM解析ソフトウェアABAQUSをベースとした 疲労き裂進展解析システムの開発

- ・3次元構造体における板厚貫通き裂の評価が可能
- ・CAEを利用した解析モデル作成補助の利用

疲労き裂進展シミュレーション

- ■バルブリブ鋼床版模擬試験体の疲労試験
 - 複雑な3次元構造体に対して、進展経路の傾向は試験結果と 良い一致
 - 本研究のモデル化に基づき算出した疲労寿命は、4倍程度安 全側の評価



XFEMによる疲労き裂進展シミュレーションシステムの より正確な解析精度の検討



今後の課題

より複雑な構造物への適用性拡大

- シェル要素におけるき裂の面外変形の考慮
 → Uリブ鋼床版への適用
- 3次元ソリッド要素への拡張

→ 溶接部・デッキ貫通過程への適用

■ 実橋への適用(載荷条件のモデル化)

疲労き裂進展挙動の高精度化

- 応力比・き裂開閉口の影響を考慮した進展則の確立
- 溶接部形状のより正確なモデル化
- 残留応力のモデル化