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

坂野 昌弘 (関西大学環境都市工学部 教授)

プロジェクトメンバー

產 (社)日本橋梁建設協会、(財)海洋架橋・橋梁調査会 阪神高速道路(株)

学

関西大学 環境都市工学部 坂野 昌弘

京都大学大学院 工学研究科 宇都宮 智昭

国土交通省 近畿地方整備局

(道路部、大阪国道事務所、近畿技術事務所)

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

研究の目的

経年した鋼橋に発生する疲労亀裂を対象として、その発生および進 展挙動を精度よく予測できる解析手法およびプログラムを開発する ことで、疲労亀裂を生じた鋼橋の補修・補強および点検等の維持管 理の合理化に役立てることを目的とする。

研究の概要

鋼橋に生じる疲労亀裂のうち、特に数の多い鋼床版縦リブと横リ ブの交差部から横リブに伝播した疲労亀裂を対象とし、その発生およ び進展挙動を精度よく予測できる拡張有限要素法(X-FEM)に基づい た解析手法を開発する。更に、その妥当性を実験および実橋における 疲労亀裂進展状況との比較・検討により検証する。

活動の期間

平成19年3月~平成21年3月

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

本研究では、拡張有限要素法(X-FEM)を用いて、疲労き裂 進展解析プログラムの開発をおこないます。これにより、実 橋梁の安全性評価への適用を視野に入れた研究をおこないま す。左下図は、X-FEMによるき裂の表現の概念図、右下図は、 き裂進展にともなう試験片の変形図を示します。





朝日新聞 朝刊 平成18年8月26日(土)

阪神高速道路における鋼床版ストックと損傷発生状況 (土木学会厚板溶接継手に関する調査研究小委員会報告書2007年10月より引用)

(a) 鋼床版ストックの現状

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

(b) 鋼床版き裂の発生状況

			縦リン	스타				
	損傷タイプ	バル	バルブリブ		バ			
		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)	0	0	1	1	1	1	
1)'	縦リブとデッキプレートの溶接部(デッキ貫通)	0	0	22	119	22	119	
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	111	628	142	1840	

注) 径間数・橋梁数は最も多い損傷タイプに計上

2重計上になる場合は、損傷タイプで番号が小さい方に計上



<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>

平成19年度活動計画

本年度の活動は以下の3ステップから構成

- ステップ1: 実橋計測(近畿地方整備局、
 日本橋梁建設協会)
- ステップ2: FEM解析(京都大学)
- ステップ3:模型実験(関西大学)

ステップ1: 実橋計測 (近畿地方整備局、日本橋梁建設協 会)

 大阪国道事務所管内の重交通路線に位置 するA橋を対象とし、動ひずみ計を用い てバルブリブと横リブの交差部の応力を 72時間連続計測し、同時に交通車輌のビ デオ撮影を行う。計測結果等により、交 差部各部の応力分布と載荷位置の関係の 把握および疲労寿命の推定を行う。



 A橋のFEM解析を行い、実橋各部の応力・ 変形挙動を推定する。さらに、X-FEMによ り実橋の境界条件を考慮した亀裂進展解 析を行う。

ステップ3:模型実験 (関西大学)

 着目部位の実物大部分模型(2主桁1横リ ブモデル)を製作し、静的載荷試験に よって縦リブと横リブの交差部各部の応 力分布を計測して実橋計測結果およびFEM 解析結果と比較する。さらに疲労試験を 行い、疲労亀裂の発生・進展挙動をX-FEM 解析結果と比較する。

次年度以降の活動計画

- 疲労亀裂の発生・進展挙動を正確に把握し、
 その原因を抑えることのできる効果的な補強
 対策を提案する。
- 同様な2次元的な疲労亀裂の発生・進展問題に適用する。
- さらに、複雑な3次元的な疲労亀裂の発生・
 進展問題への適用を試みる。

A橋の現地調査計画概要 (交通荷重による応力頻度計測ほか)



平成20年1月24日 国土交通省近畿地方整備局 (社)日本橋梁建設協会



1.調査目的・内容

本調査は,バルブリブを有する鋼床版の横リ ブへの疲労亀裂の進展メカニズムを究明するた めのプロジェクトの一環で,重交通路線である 国道1号に架かるA橋の現地調査に関するもので ある.

塗膜割れ箇所の

磁粉探傷









5.対象橋梁の溶接ビード形状











9.塗膜われの調査





10.磁粉探傷の原理

対象物に磁気を作用させ、 磁粉と呼ばれる磁性微粉 末を散布する。





欠陥のある部分から表面 に漏れ出して来た漏洩磁 束に磁粉が吸い寄せられ、 指示模様を形成する.





11. 応力測定箇所

リブ番号	測点記号	測定内容	測点の説明	備考		
		1軸ひずみ	横リブとデッキプレート溶接部 (小スカラップ上側コバ面)			
		1軸ひずみ	横リブと縦リブ上側溶接部 (小スカラップ下側コバ面)			
1 ~ 3		1軸ひずみ	横リブとデッキプレート溶接部 (縦リブ貫通空間上側コハ'面)	1軸ゲージ		
		1軸ひずみ	縦リブと横リブの下側回し溶接部 (スカラップ溶接コバ面)			
		1軸ひずみ	縦リブと横リブの下側回し溶接部 (縦リブ貫通空間下側コル面)			
	 3軸ひずみ 傍	横リブとデッキプレート溶接始端部近	3軸ゲージ(水平方向)			
		3軸ひずみ	傍(縦りブ貫通	〃 (斜め方向)		
			空間上側 大阪面)	" (上下方向)		
	 3軸ひずみ	横リブとデッキプレート溶接始端部近	3軸ゲージ(水平方向)			
		3軸ひずみ	傍(縦リブ貫通	〃 (斜め方向)		
			空間上側 京都面)	" (上下方向)		
				3軸ゲージ(水平方向)		
		3軸ひずみ	横りノと縦りノト側 𝒴-フッノ 浴接部 近傍 (大阪面)	〃 (斜め方向)		
				" (上下方向)		
	3軸ひずみ		3軸ゲージ(水平方向)			
		3軸ひずみ	傾りして縦りして側スル-フック 冷接部 近傍 (京都面)	〃 (斜め方向)		
				" (上下方向)		
	合計CH		17CH × 3リブ = 5	1CH		









15.現地作業工程

	作業	内容	時間工程時間工程											
	TF耒		0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
	仮設備	調查用足場架設					-		•					
	注明われ上校	塗膜われ目視確認												
1日目	空族1016点快	磁粉探傷								-				
	測空進供	測定機器搬入												
	別化牛桶	ひずみゲージ貼付								•				
		ひずみゲージ貼付					-							
	測定進借	延長ケーブル配線						_						
2日目	测定午桶	測定本部設置							_					
		機器調整								_				
	測定	72時間連続測定												
200	调中	72時間連続測定							7 2 時	, 間連約	測定	, (1日	- 目)	
2018	—————————————————————————————————————													
	測定	72時間浦結測完							<u>72時</u>	間連續	測定	(2日	- 目)]
411日	測化	/2时间建烷则化												
500	測定	72時間浦結測完							72時	間連続	測定	(3日	目)]
	/则/上													
600	均土	延長ケーブル等撤去												
	加云	測定機器搬出												
7日目	撤去	塗装復旧·足場撤去					-							

拡張有限要素法(X-FEM)による 疲労き裂進展シミュレーション

京都大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻 宇都宮智昭 柴沼 一樹 金久 隆弘

研究背景と目的

- 経年した鋼橋において疲労き裂の発見される事例 が増加
- 原因推定,補修・補強対策を考える上で,破壊力 学に基づく「疲労き裂進展シミュレーション」が有効 である可能性大
- 従来の有限要素法(FEM)では、き裂進展を直接は 扱えない

■ → き裂を要素とは独立に扱える拡張有限要素法 (X-FEM)による疲労き裂進展シミュレーション手法 を開発し、その適用性を実験・現地計測により検証

X-FEMの概念図



要素内の変位 **C属性節点** $\mathbf{u}^{e} = \sum_{i=1}^{m} \phi_{i}(\mathbf{x})\mathbf{u}_{i} + \sum_{i \in C} \phi_{i}(\mathbf{x}) \sum_{k=1}^{4} \gamma_{k}(\mathbf{x}) \mathbf{c}_{i}^{k} + \sum_{i \in J} \phi_{i}(\mathbf{x}) H(\mathbf{x}) \mathbf{b}_{i}$

Crack Function $\gamma_k(\mathbf{x})$ $(k = 1, \dots, 4)$

$$\gamma_1(\mathbf{x}) = \sqrt{r} \cos \frac{\theta}{2} \qquad \qquad \gamma_2(\mathbf{x}) = \sqrt{r} \sin \frac{\theta}{2}$$
$$\gamma_3(\mathbf{x}) = \sqrt{r} \sin \frac{\theta}{2} \sin \theta \qquad \qquad \gamma_4(\mathbf{x}) = \sqrt{r} \cos \frac{\theta}{2} \sin \theta$$

要素内の変位

$$\mathbf{u}^{e} = \sum_{i=1}^{m} \phi_{i}(\mathbf{x}) \mathbf{u}_{i} + \sum_{i \in C} \phi_{i}(\mathbf{x}) \sum_{k=1}^{4} \gamma_{k}(\mathbf{x}) \mathbf{c}_{i}^{k} + \sum_{i \in J} \phi_{i}(\mathbf{x}) H(\mathbf{x}) \mathbf{b}_{i}$$

Jump Function $H(\mathbf{x})$

$$H(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1 & (\mathbf{x} \in \Omega_+) \\ -1 & (\mathbf{x} \in \Omega_-) \end{cases}$$



進展方向 θ_c 伝播速度da/dN da/dN θ_{c}

最大周方向応力説

陽的解法



一致すると仮定









解析結果



R=0.5

R	最大荷重(kN)	最小荷重(kN)
0.05	23	1.15
0.3	31	9.3
0.5	36	18

疲労き裂進展シミュレーション

step880



本解析手法の適用事例

■ B橋の中間横桁端部に生じた疲労き裂



応力集中の解析(従来のFEM)

両端固定にて, 鉛直方向に強制相対変位を 与える



m: Default, A1:Static Subcase, Displacements, Translations

メッシュ分割図

解析結果:変形

応力集中の解析(従来のFEM)

き裂発生位置での応力集中が確認される しかし、き裂進展の詳細は不明



最大主応力分布

最大主応力分布(部分詳細)

X-FEMによる疲労き裂進展解析

■き裂進展と主応力分布の推移





X-FEMによる疲労き裂進展解析

■ 疲労寿命予測



結論と今後の予定

 X-FEMは、実橋梁における疲労き裂進展予 測のツールとして有用である可能性が高い
 今後、本PJで予定されている実験および現 地計測結果と比較・検討することで、本手法 の有効性を検証する

バルブリブ鋼床版の疲労実験 (A橋モデル試験体を用いて)

関西大学 環境都市工学部 都市システム工学科 坂野 昌弘



朝日新聞 朝刊 平成18年8月26日(土)

阪神高速道路における鋼床版ストックと損傷発生状況 (土木学会厚板溶接継手に関する調査研究小委員会報告書2007年10月より引用)

(a) 鋼床版ストックの現状

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

(b) 鋼床版き裂の発生状況

			縦リン	스타				
	損傷タイプ	バル	バルブリブ		バ			
		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)	0	0	1	1	1	1	
1)'	縦リブとデッキプレートの溶接部(デッキ貫通)	0	0	22	119	22	119	
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	111	628	142	1840	

注) 径間数・橋梁数は最も多い損傷タイプに計上

2重計上になる場合は、損傷タイプで番号が小さい方に計上

首都高速道路における鋼床版ストックと損傷発生状況 (土木学会厚板溶接継手に関する調査研究小委員会報告書2007年10月より引用)

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

(a) 鋼床版ストックの現状

(b)鋼床版き裂の発生状況

			縦リフ)形式						
	損傷タイプ	バルブリブ・Iリブ		リブ・Iリブ U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	縦リブ突合せ溶接部	3	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			

注) 径間数・橋梁数は最も多い損傷タイプに計上

2重計上になる場合は、損傷タイプで番号が小さい方に計上



<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>















荷重範囲⊿P=140kN(20~160kN)

リブ1:予防保全(片側アングル補強) リブ2:事後保全(無補強→SH+片側アングル補強)

