#含角度研究会~ 鋼橋の疲労亀裂調査の効率化に関する研究 プロジェクトリーダー 坂野 昌弘 関西大学教授

■研究の背景と目的

東労亀教対策は発見された亀製の状況に応じて講じられることから、疲労亀製に対しては全数調査 疲労亀製対策は発見された亀製の状況に応じて講じられることから、疲労亀製に対しては全数調査 が原則である。しかしながら、調査箇所数が膨大な場合には全数調査に時間がかかることから、現 実的には何らかの方法で<mark>電光順位付けを行い、効率化とはかる要ずかる。</mark> 本研究では、荷重条件や各部位の応力の状況、FCM等の部材の種類、構造詳細、材料特性等に

着目して優先順位付けを行い、効率化をはかるとともに、同時に高い信 亀裂調査方法を提案し、さらに予防保全も含めた補修方法も提案する。 信頼性も確保できるような疲労

■研究の内容

- 1. 疲労免契調査手法の現状把握と課題抽出 対象橋梁に対して現地調査を行い、疲労免裂等に関して現状を把握し課題を抽出する。 2. 疲労免契調査のスクリーニング方法の検討 荷重条件や各部位の応力状況、FCM等の耐材の種類や構造詳細、材料特性等に着目し、解析や 実験により、調査個所の優先順位付けを行う。また、提案する優先順位付けの妥当性を実橋での
- 条款により、時直圏川の優元制度的リアで17。また、夜来する慶元制度的日本の大学日本で乗倫での 金製調査やの方計測等によって検証する。 疲労亀製調査後の補修方法の検討 亀製発見後の応急対策と恒久対策、亀製発生が予想される部位に対する予防保全等を含めた補 修方法を解析や実験を行って検討する。また、提案する補修方法の妥当性を実機での応力計測等 により検証する。 効率的な疲労亀契調査方法等の取りまとめ 上記の検討結果を取りまとめ、効率的で信頼性の高い疲労亀契調査方法と補修方法を提案する。

鋼橋の疲労亀裂調査の効率化に関する研究

■研究期間:平成25年度~平成27年度

年 度	研究内容
	〇疲労亀裂調査手法の現状把握と課題抽出:対象橋梁に対して現地調査を行
平成25年度	疲労亀裂等に関して現状を把握し課題を抽出する。
	○疲労亀裂調査のスクリーニング方法の検討:荷重条件や各部位の応力状況
	FCM等の部材の種類や構造詳細、材料特性等に着目し、解析や実験により8
	個所の優先順位付けを行う。
	○疲労亀裂調査のスクリーニング方法の検証:提案する優先順位付けの妥当
平成26年度	を軽析や実験、実橋での角裂調査や広力計測等によって検証する。
1 /4/2 0 /4/2	〇疲労亀裂調査後の補修方法の検討: 亀裂発見後の応急対策と恒久対策、1
	発生が予想される部位に対する予防保全対策等を含めた補係方法を経析や 1
	により検討する。
	〇疲労亀裂調査後の補修方法の検証:提案する補修方法の妥当性を解析やff
平成27年度	実験、実橋での応力計測等によって検証する。
	○効率的な疲労亀裂調査方法等の取りまとめ:上記の検討結果を取りまとめ
	効率的で信頼性の高い疲労亀裂調査方法と予防保全も含めた補修方法を提3
	۵.

■参加予定メンバー(体制)

- 産: 橋梁調査会、日本非破壊検査工業会、建設コンサルタンツ協会、日本橋梁建設協会、 版神高速道路、本州四国連絡高速道路、西日本高速道路 学: 関西大学、京都大学

平成25年度の研究計画

下記の内、③の橋梁を研究対象とした

- ①淀川大橋(単純鋼トラス橋6連、単純鋼非合成鈑桁橋24連、1926 年供用開始、88歳)
 - ・トラス橋横桁端部の予防保全
 - 鋼桁部の調査
- ②木津川大橋(3径間連続鋼合成鈑桁橋3連、1966年供用、48歳)
 - ・塗膜割れ(約1000か所)
- ③姫路大橋(単純鋼合成鈑桁橋6連、1972年竣工、42歳)
 - ・塗膜割れ(約4000か所)

研究の進捗状況(1)

- ①非破壊検査手法のレビューを行って 今回適用な可能な手法を絞り込み、 現地での疲労亀裂調査方法を決定した。
- ②現地調査を行って、 10パターンの塗膜割れに対して、 優先度の高い2パターンを選定した。

研究の進捗状況(2)

- ③渦流探傷法(ET)で亀裂調査を行い、後に実 施した磁粉探傷法(MT)の結果と比較して 的中率や見逃し率、空振り率について 詳細に検討した。
- ④ETとMTの実際の作業日数から、 ETでスクリーニングを行った場合の作業日数 の短縮化について検討した。

研究の進捗状況(3)

- ⑤疲労実験を行い、横桁貫通構造の疲労挙動 について詳細に検討し、他の亀裂パターンと の違いを明らかにした。
- ⑥拡張有限要素法(XFEM)による亀裂進展シミ ュレーションを行い、疲労亀裂の進展挙動や 進展寿命が予測可能であることを示した。

鋼橋の疲労亀裂調査の効率化に関する研究

日本橋梁建設協会の平成25年度調査結果と26年度の予定

パターン⑩横桁フランジ貫通構造について

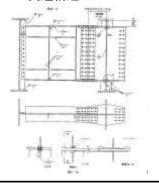
パターン⑩における横桁のフランジが主桁のウェブを 貫通する構造は、疲労損傷が顕著化し始めた1980年 頃以降はだんだん使用されなくなったと考えられるが、 姫路大橋が完成した1972(昭和47)年頃には一般に使 われていたと考えられる。そこで、日本橋梁建設協会 (以下橋建と略す)会員会社にアンケートを実施して、 この構造の実績を調べてみた。



2

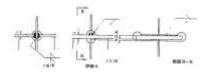
パターン⑩横桁フランジ貫通構造について

橋建が出している「鋼橋の構造詳細の手引(1983年旧版)では、左図の構造を標準としている。この標準は1978年頃から橋建の資料として業界に出回っていたと考えられる。



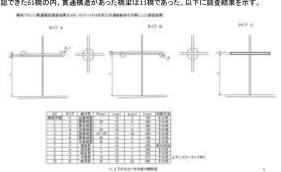
パターン⑩横桁フランジ貫通構造について

橋建の標準では、横桁フランジ厚が16mm以下の場合は主桁ウェブを貫通させず、開先をとって溶込み溶接を行う。フランジが16mmを超える場合は貫通させ、主桁フランジと反対側(内側)をすみ肉溶接し、その裏側は5mm以上のすきまを設けている。また溶接する側のまわし溶接を考慮してスカーラップを設けている。一般には、横桁フランジは16mm以下の場合が多いと考えられるので、貫通させないディテールを基本としているように思われる。



パターン⑩横桁フランジ貫通構造について

橋健では1972年から1974年までさかのぼり、連続飯桁橋81橋を対象に調査、内構造が確認できた61橋の内、貫通構造があった橋梁は11橋であった。以下に調査結果を示す。

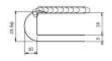


パターン⑪横桁フランジ貫通構造について

調査結果の分析

貫通構造を使用していた11橋の実績を調べてみると、横桁フランジ板厚が16mm以下でもこのディテールを使用していることがわかる。この頃には設計には、まだ橋健の標準が一般化されていなかったようである。溶接する箇所については、タイプが多いがタイプも2例あった。姫路大橋のように、スカーラップがない例は、11橋の例の中にはなかった。姫路大橋のディテールでは回し溶接は可能ではあるが、施工しずらく、回し溶接も明確に図面上で指示していないため。回し溶接が省略される可能性が高いと考えられる。

姫路大橋の貫通ディテール



6

パターン⑩横桁フランジ貫通構造について 回し溶接の施工

姫路大橋では溶接されていない箇所が多いと推測される





パターン⑩横桁フランジ貫通構造について 回し溶接の施工

試験体施工では溶接可能





上側溶接試験体

下側溶接試験体

今年度の調査研究

- ・ パターン⑩構造の実績の追加調査 (何年頃まで採用されているかなど)
- ・ 補強方法の検討と試験体による疲労試験 ・ 疲労亀裂補修補強事例の調査

渦流探傷試験を用いた鋼橋の疲労き裂調査の効率化に関する検討

日本非破壊検査工業会 正会員 ○ Luiza H. Ichinose 近畿地方整備局 非会員 水江 正弘 関西大学 正会員 坂野 昌弘

1. 概要

近年,鋼橋の疲労損傷が多数報告されており、その数は年々増加傾向にある¹⁾. 発見された疲労き裂の状況 に応じて適切な対策を実施するためには、き裂の疑いがある全個所でのき裂調査が必要となる. 調査個所数 が膨大な場合には全数調査に時間がかかるため、き裂調査に対して効率化が求められている.

本稿では、国土交通省近畿地方整備局に設置された「新都市社会技術融合創造研究会」の新規プロジェクトとして立ち上げられた「鋼橋の疲労亀裂調査の効率化 PJ」の一環として、渦流探傷試験と磁粉探傷試験を実施し、それらの結果を比較して、効率化に関する検討を行った。

2. 対象橋梁

フィールドワークの対象橋梁として,1972年に竣工された単純鋼合成鈑桁橋(支間:6@41.2m,幅員:18.8m)の第6径間を選定した。平成22年度のセンサスで,1日の交通量が約12万台(大型車両混入率=21.2%)であった。対象橋梁では,目視点検の結果,約4000個所の塗膜割れが検出された。本調査では,検出された損傷パターンの内,最も緊急性が高いと思われる損傷パターン①および⑩(図1)に着目し,渦流探傷試験を実施した。

3. 調査の流れ

調査は、図2の流れに従い、実施した. 渦流探傷試験は、定期点検で塗膜割れが検出された個所の内で磁粉探傷試験未実施の個所(211個所)、および塗膜割れが検出されなかった個所(18個所)の合計229個所に対して実施した. 渦流探傷試験は、検査個所の塗膜を除去せず、携帯式渦流探傷装置を用いて実施した. 渦流探傷試験結果の検証にはその後実施された磁粉探傷試験の結果を用い、両者の比較を行った.

4. 渦流探傷試験および磁粉探傷試験結果

4. 1 渦流探傷試験結果

渦流探傷試験は,前述のように磁粉探傷試験未実施の個所(合計 229 個所)に対して実施した. 渦流探傷試験結果の総括を表 1 に示す.



図1-調査対象の損傷パターン

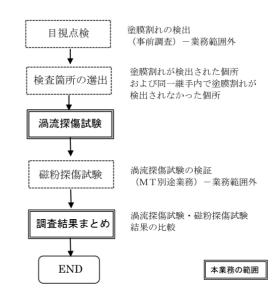


図2ー調査の流れ

表 1-渦流探傷試験結果

損傷パターン き裂の疑いの き裂の疑いの 反応有り 反応無し 合 計			渦流探傷試験(ET) (個所数)						
反心有り 反心無し ここ	損傷パ	き裂の疑いの		き裂の疑いの		_	計		
11 (14W) CO (OCW) OO (10		反応有り		反応無し		П			
上下線合計 パターグ() 11 (14%) 69 (86%) 80 (10	L下組入社	パターン①	11	(14%)	69	(86%)	80	(100%)	
エド禄日前 パターン⑪ 30 (20%) 119 (80%) 149 (10	工厂旅口司	パターン⑪	30	(20%)	119	(80%)	149	(100%)	
合計 41 (18%) 188 (82%) 229 (10	合	41	(18%)	188	(82%)	229	(100%)		

キーワード 鋼橋,非破壊検査,渦流探傷試験,磁粉探傷試験,疲労き裂,維持管理 連絡先 〒101-0047 東京都千代田区内神田 2-8-1 冨髙ビル 3F (社)日本非破壊検査工業会 TEL. 03-5207-5961

4. 2 磁粉探傷試験結果

渦流探傷試験の検証には、別途調査で実施された磁 粉探傷試験の結果を用いた.磁粉探傷試験は渦流探傷 試験を実施した全個所に対して実施された.その結果 を表2に示す.

表 2一磁粉探傷試験結果

	磁粉探傷試験(MT)(個所数)							
損傷パ	き裂有り		き裂無し		合 計			
上下線合計	パターン①	8	(10%)	72	(90%)	80	(100%)	
工厂旅口司	パターン①	15	(10%)	132	(90%)	147	(100%)	
合	23	(10%)	204	(90%)	227	(100%)		

4. 3 渦流探傷試験および磁粉探傷試験結果の比較

渦流探傷試験と磁粉探傷試験結果の比較を表3に表す.

まず,調査個所全数の 189 個所で見てみると, MT と ET の評価結果が一致した個所は, 有有 7 個所と無 無 143 個所の合計 150 個所で的中率は 79.4%, MT で 有なのに ET で無とした (見逃し) 個所は 5 個所なので見逃し率は 2.6%, 逆に MT で無なのに ET で有とした (空振り) 箇所は 34 個所で空振り率は 18.0% となる.

次に, MT で亀裂有と判定された 12 個 所で見ると, ET でも有りと判定された個 所は 7 個所なので的中率は 58%, ET で無 と判定された箇所は 5 個所なので見逃し 率は 42% となる.

また, ET で亀裂有と判定された 41 個所について見ると, MT でも有は 7 個所だから的中率は 17%で, MT で無は 34 個所なので空振り率は 83%となる. 一方, ET で 亀裂無と判定された 148 個所で見ると, MT でも無は 143 個所だから的中率は 96.6%で, MT で有は 5 個所だから見逃し率は 3.4%となる.

表 3-渦流探傷試験×磁粉探傷試験の比較

	ET調査結果								
有		(%)		無	(%)		合計	(%)	
			ET有りの	17%		ET無しの	3%		
	有	7ヵ所	MT有りの	58%	5ヵ所	MT有りの	42%	12ヵ所	100%
M T 調 査 無		「一致」	全ヵ所の	4%	「見逃し」	全ヵ所の	3%		
	48	34ヵ所	ET有りの	83%	140+75	ET無しの	97%	177ヵ所	
	***	「空振り」	全ヵ所の	18%	143ヵ所 「一致」	全ヵ所の	76%	1772071	
果	合計	41ヵ所	100%		148ヵ所	100%		189ヵ所	100%

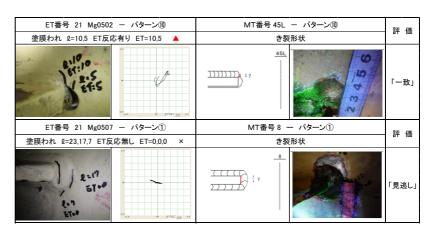


図 3-渦流探傷試験 x 磁粉探傷試験「一致」・「見逃し」の一例

図 3 に的中したき裂と見逃したき裂の例を示す。き裂の大半は回し溶接部に位置し、そのき裂長は「的中」の場合、 $L=3mm\sim10mm$ 、「見逃し」の場合が $L=5mm\sim10mm$ であった。

5. まとめ

ここで、MTの前にETでスクリーニングを行う場合を想定すると、189個所の内148個所(78%)は亀裂無なので、亀裂有と判定した残りの41個所(22%)についてMTを行えば良いことになり、MTの実施箇所数を1/5に減らすこともできそうであるが、その場合、148個所のうちの5個所(3.4%)の亀裂は見逃してしまうことになる。3%という数字は小さいように思えるが、亀裂の数12個所で見ると4割(半分近く)を見逃してしまうことになるので、この数字が大きいか小さいかは、亀裂の危険度(発生位置や進展性)を考慮して判断すべきと考える。

作業日数を比較する(ET=延べ6日;MT=延べ11日)と,作業効率の観点からは,塗膜を除去せず,塗膜上から実施可能な渦流探傷試験の方が,塗膜の除去・復旧が必要となる磁粉探傷試験に比べて作業工程の短縮化が期待できる.

参考文献

1)国土交通省道路局国道・防災課監修,鋼橋疲労対策技術検討会編:実務者のための鋼橋疲労対策資料,2012.3

スリット付き横桁下フランジ貫通構造の疲労挙動

関西大学 学生会員 〇吉田 直人, 正会員 坂野 昌弘 日本橋梁建設協会 正会員 小西 日出幸, 姫路河川国道事務所 非会員 藤井 隆

1. はじめに

名阪国道山添橋では主桁ウェブの横桁下フランジ貫通部から長さ 1m のき裂が発生した 1). このき裂は主桁を破断させる恐れのある極めて危険なき裂である. このタイプの貫通構造を有する道路橋は国内に相当数存在すると考えられることから、これらの疲労強度特性を把握することは火急の課題である.

しかしながら、横桁下フランジ貫通構造の疲労 実験例は非常に少ない^{2),3)}. そこで、本研究では主 桁ウェブのスリット付き横桁下フランジ貫通構造 を有する桁試験体の疲労実験を行い、それらの疲 労挙動を明らかにすることを目的とする.

2. 実験方法

(1)試験体の設計・製作

図1に試験体の形状・寸法とひずみゲージ貼付位置を示す。主桁ウェブ中央下フランジ側にスリットを有し、スリットの上部に横桁下フランジがすみ肉溶接で取り付けられている。鋼材は全てSM490YAを用いた。溶接方法はウェブとフランジ間はサブマージアーク溶接、それ以外は CO₂溶接である。

(2) 静的載荷試験

貫通部周辺の応力性状を把握することを目的として,両端支持の中央1点載荷で静的載荷試験を行った. 横桁下フランジ貫通部の応力集中の影響

を避けるため、横桁下フランジ縁端から水平方向に 100mm 離れたウェブの表裏両面に 3 軸ひずみゲージを貼付した. また、上フランジ上面と下フランジ下面にも、ウェブの 3 軸ゲージ貼付位置と同じ断面に 1 軸ひずみゲージを 3 枚ずつ(フランジ幅方向の中央と両縁端から 10mm の位置に)それぞれ貼付した. 下フランジの最大引張応力が50MPa 程度となるように、載荷荷重は 100kN に設定した.

(3)疲労実験

疲労実験は静的載荷試験と同様に両端支持の中央1点載荷で行った. 荷重繰返し速度は 6Hz とした. 荷重の大きさは Pmax=300kN, Pmin=200kN とし、 △P=100kN とした. 2 箇所の試験部の一方のき裂が進展した場合, ストップホールと HTB 締付によるき裂進展防止対策を行い, 疲労試験を続行した. き裂の検出は渦流探傷法と磁粉探傷法を用い, 横桁下フランジ両縁の回し溶接部 4 箇所に対して行った.

3. 実験結果

(1) 静的載荷試験結果

図 2 に静的載荷試験の結果を示す. 計算値については横桁下フランジや補剛材を無視し, 一様断面の I 型ばりと仮定して曲げモーメントとせん断力から求めた. 疲労き裂の発生進展に対して影響の大きい最大主応力範囲 $\Delta \sigma_1$ を比較すると,

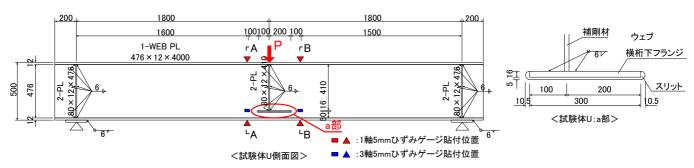


図-1 試験体の形状・寸法とひずみゲージ貼付位置

キーワード:スリット付き横桁下フランジ貫通構造,疲労実験,疲労き裂発生進展挙動,疲労寿命 連絡先:〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35 鋼構造デザイン研究室 Tel:06-6368-1111 (内線 6506) 最大で 6%程度の差はあるもののゲージ位置では ほとんど梁理論通りの主応力が生じていることが 確認できた.

(2)疲労実験結果

図3に載荷回数とき裂長さの関係を示す. 載荷回数 20 万回の時点で、横桁下フランジ縁のすみ肉回し溶接止端部に沿って長さ 8mm 程度のき裂が検出された. その後、しばらくき裂長さに変化が無かったが、載荷回数 80 万回時点で A 断面表と裏、120 万回時点で B 断面表、230 万回時点で B 断面裏においてき裂がウェブへ進展しているのが確認できた. その後き裂は最大主応力方向とほぼ垂直にウェブを斜め上に進展した. また、載荷回数 250 万回時点で A 断面のき裂の進展を止める為(写真・1)、ストップホールと HTB による締付けを行った. なお、 A 断面のき裂が進展するにつれて荷重伝達が途切れるため、 B 断面のき裂の進展が遅くなっている.

図4に最大主応力範囲で整理したS-N関係と設計曲線 4^0 を示す。試験体の疲労寿命は,疲労き裂発見寿命 Nd で評価するとH'等級の $1/4\sim1/6$,ウェブへのき裂進展寿命 Nw で評価するとH'等級以下,き裂長さ 30mm の時の繰返し回数で定義した破断寿命 N_{30} で評価するとH'等級となる.

4. おわりに

(1)疲労き裂は横桁下フランジ縁端部のウェブ側 溶接止端に沿って発生し、最大主応力方向とほぼ 垂直にウェブを斜め上に進展した.

(2)試験体の疲労寿命は、疲労き裂発見寿命 Nd で評価すると H'等級をはるかに満たさず、ウェブへのき裂進展寿命 Nw で評価すると H'等級以下、破断寿命 N_{30} で評価すると H'等級となる.

参考文献

1)奈良国道ホームページ

http://www.kkr.mlit.go.jp/nara/

2) 坂野,三上,村山,森脇:フランジ貫通型鉄道 橋床組連結部の疲労強度,構造工学論文集, Vol.41A,pp.965-973,1995.3.

3) 坂野,宝角,下良,三上:主桁-横桁接合部ウェブガセット溶接継手の長期疲労強度,鋼構造論文

集, 第5巻第18号, pp.31-40, 1998.6.

4) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説(I共通編・Ⅱ鋼橋編),2012.3.

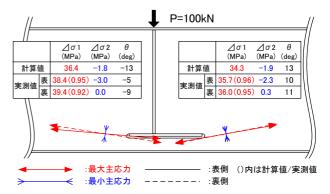


図-2 横桁貫通部付近の主応力図

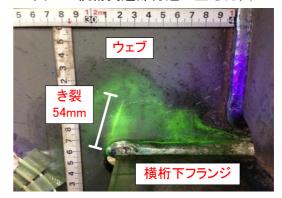


写真-1 A 断面表側き裂進展状況(250 万回)

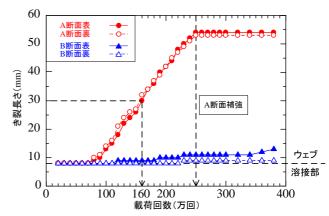


図-3 載荷回数とき裂長さの関係

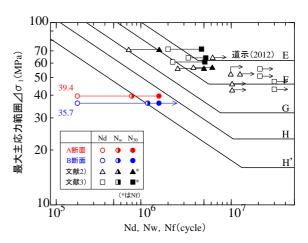
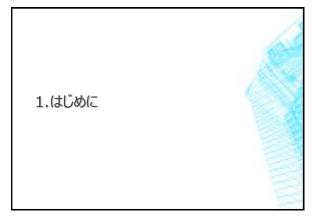


図-4 最大主応力範囲で整理した S-N 線図



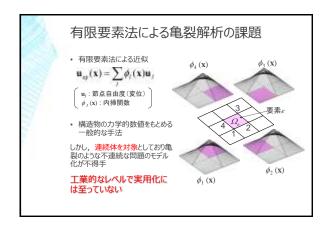
目次

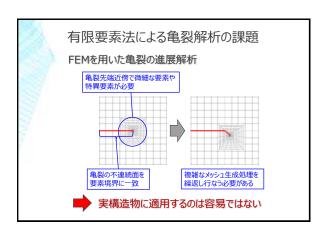
- 1. はじめに
 - 鋼橋における疲労損傷
 - 有限要素法による亀裂解析の課題
- 2. PU-XFEMに基づく疲労亀裂進展解析
 - PU-XFEM
 - ・ 疲労亀裂進展解析コードの開発
- 3. 疲労実験の再現解析
 - ・ 応力場の比較と有限要素モデルの検証
 - 疲労亀裂進展シミュレーション
- 4. 今後の課題



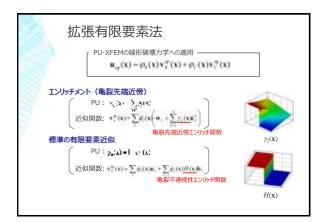


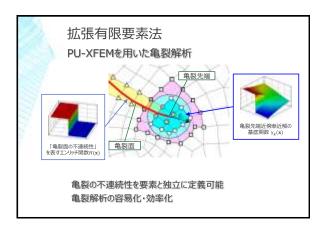
鋼橋における疲労損傷 適切なモデル化に基づく 「疲労亀裂進展シミュレーション」 が可能となれば ・多大な労力を要する疲労実験を補足・代替することが可能 ・様々な場合に対し破壊に至るまでの余寿命評価が可能 → 点検問隔の判断 ・進展性の「低い」亀裂と「高い」亀裂の切り分け → 補修・補強の優先度判定 ・疲労亀裂に対する補修・補強方法の効果的な検討

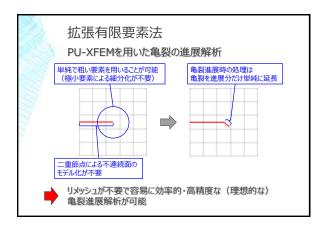












合理的な亀裂進展解析コードの開発

■汎用FEM解析ソフトウェア

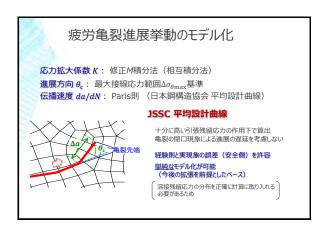
プリ・ポストプロセッサの機能の充実により、
有限要素モデルの作成や計算結果の処理を容易かつ
効率的に実施可能

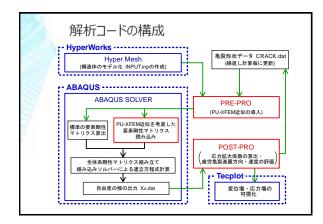
■ PU-XFEM

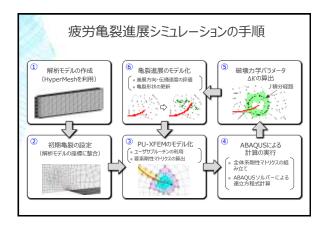
FEMの枠組みにおいて効果的に亀裂解析を実施可能

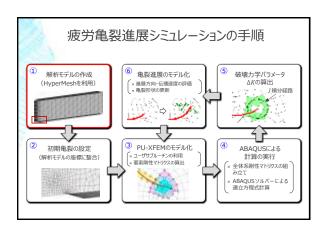
実構造における疲労亀裂進展シミュレーションが効率的に実行可能な解析コードの開発(ABAQUS・HyperWorksをベース)

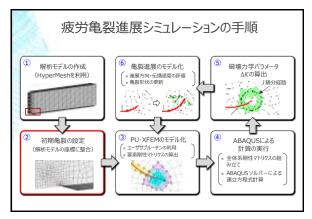
合理的な亀裂進展解析コードの開発 解析コードの構成 汎用ソフトウェアABAQUSに以下のプログラムを追加 PU-XFEM近似を実装するプログラム 応力拡大係数の評価、疲労亀裂の進展方向・伝播速度の算出を行うプログラム 解析コード全体のフローを制御するプログラム

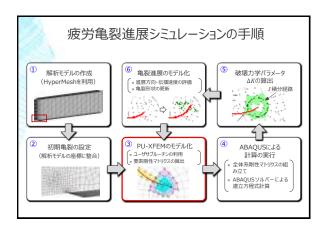


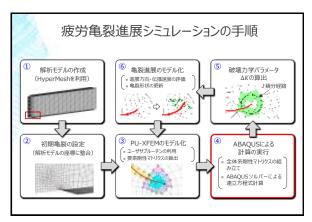


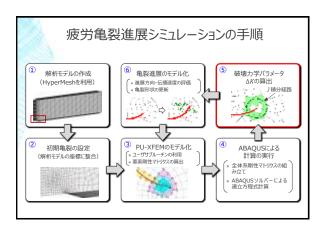


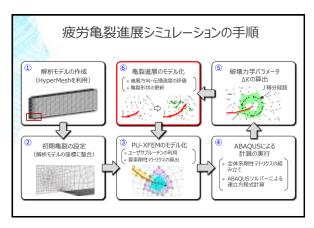


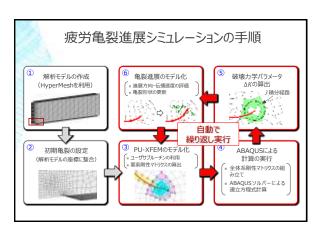




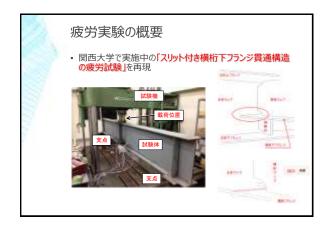


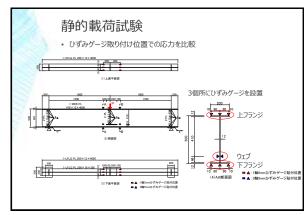


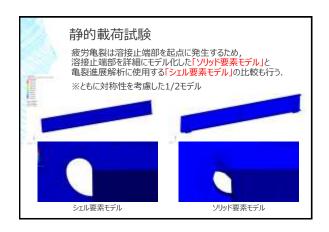


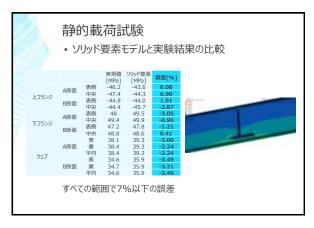


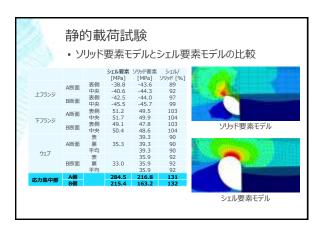


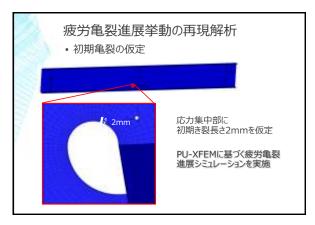


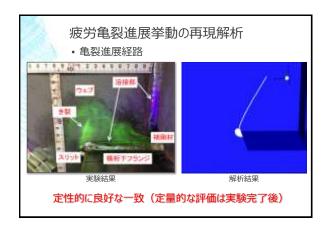


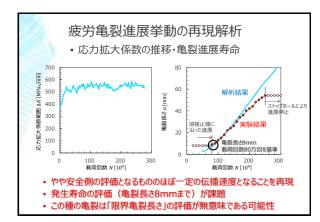












4. 今後の課題

今後の課題

- 解析コードの改良 (精度改善・応力場の可視化など)
- 実験的な検証が困難な構造形式の網羅的解析
- 補強・補修方法の有効性検討
- 亀裂発生寿命の評価方法確立 (Effective Notchに代わる数値解析法)
- 溶接部近傍のモデル化(解析コードのソリッド要素への拡張)
- 橋梁全体モデルを用いた各種補強・補修方法が及ぼす疲労損傷リスク評価