

首都高速道路における鋼橋疲労対策

COUNTERMEASURES AGAINST FATIGUE CRACKS IN STEEL BRIDGES ON THE METROPOLITAN EXPRESSWAY

佐藤歩\*, 上坂健一郎\*\*, 日名誠太\*\*\*

Ayumu SATO, Kenichiro KOUSSAKA and Seita HINA

**ABSTRACT** Many fatigue cracks have been found on the Metropolitan Expressway. This paper introduces an examples of improving the countermeasures efficiency of countermeasures against fatigue cracks using inspection datas and new technologies.

**KEYWORDS** : 首都高速道路, 鋼橋, 疲労き裂

Metropolitan Expressway , steel structures , fatigue clack

1. はじめに

首都高速道路は、1962年の開通以来、放射路線の整備・都市間高速道路との接続・中央環状線等のネットワーク整備を経て、2023年4月時点で延長約327.2kmが供用している。また、供用延長の7割以上が高架橋であり、そのうち過半数を鋼橋が占めている(図-1)。これまで50年以上に渡り重交通下で供用された結果、鋼桁や鋼床版、鋼製橋脚等の一部に疲労き裂が数多く発見されており、その発生部位や補修方法は多岐にわたる。これらの疲労き裂に対して、限られた予算の中で効率的かつ計画的に、適切な対策を実施していくことが強く求められており、近年では、通常の修繕工事に加え、予防的な補修・補強を橋梁単位で実施することで、新たな損傷の発生・進行を抑制しつつ、長期の耐久性を向上させることを目的に大規模修繕事業も行われている<sup>1)</sup>。

本稿では、疲労き裂対策の効率化を目的として、これまで蓄積された点検・補修に関するデータや新技術等を活用して検討した事例について紹介する。

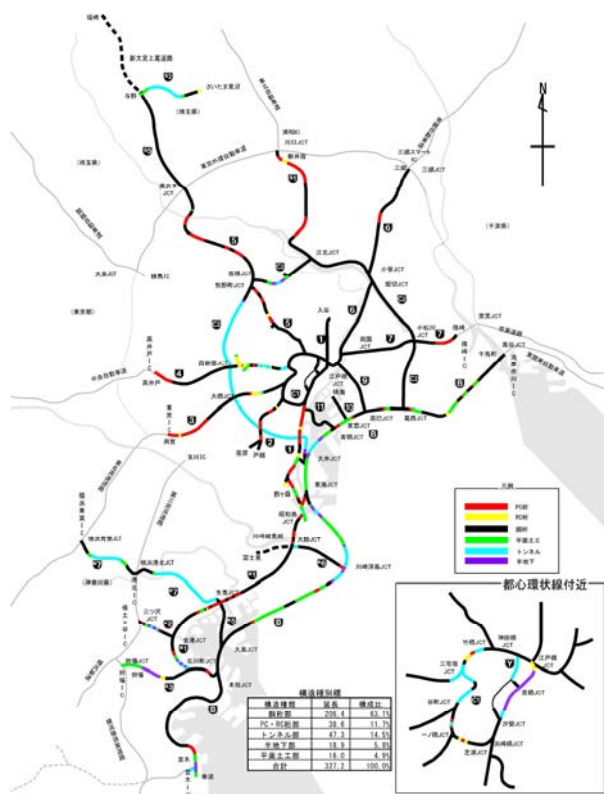


図-1 構造別道路延長

\*首都高速道路(株) 東京東局 土木保全設計課 課長代理(〒103-0015 東京都中央区日本橋箱崎町43-5)

\*\*首都高速道路(株) 神奈川局 土木保全設計課 課長代理(〒220-0012 神奈川県横浜市西区みなとみらい3-2-9)

\*\*\*首都高速道路(株) 神奈川局 保全管理課 主任(〒220-0012 神奈川県横浜市西区みなとみらい3-2-9)

## 2. ウェブギャップ板に発生する疲労き裂の進展速度調査

首都高速道路の鋼 I 桁において特に発生数の多い疲労き裂として、主桁と分配横桁の間に設置されているウェブギャップ板（以下、WGP）のき裂が挙げられる。WGP は 2 次部材であり、き裂の発生がただちに橋梁の安全性を脅かすわけではないが、鋼 I 桁に生じるき裂全体の 3 割以上を占めている。そこで、これまでに蓄積された首都高速の点検データを用いて、WGP き裂の適切な補修時期を検討するために進展速度の分析を行った。なお、過年度も同様の検討を行っており<sup>2)</sup>、本稿では更に最新のデータを追加して整理した結果について報告するものである。

### 2.1 き裂の概要

首都高速道路における WGP の代表的なき裂を図-2 に、また、それらの発生割合を図-3 に示す。WGP のき裂の大半は上側溶接部のき裂（以下、A1）と下側溶接部のき裂（以下、A2）であり、き裂全体の 8 割以上を占めている。A1 と A2 の主たる原因は、主桁のたわみ差によって生じる 2 次応力と、床版のたわみによって生じる 2 次応力である。一方、主部材（主桁ウェブや主桁首溶接部）に生じるき裂（図 2 の C1, C2, D1, D2）は、A1 または A2 が進展し、応力集中箇所が移行することが発生原因であると考えられる。従って、A1 と A2 に対して計画的に対策を実施していれば、WGP 周辺に生じる主部材のき裂の発生を抑制することができると考えられるため、分析対象は A1 と A2 に限定した。

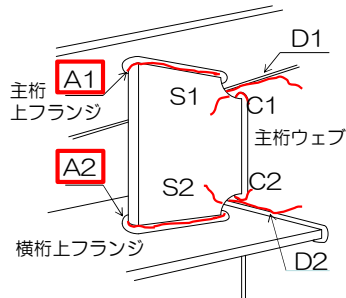


図-2 WGP き裂パターン

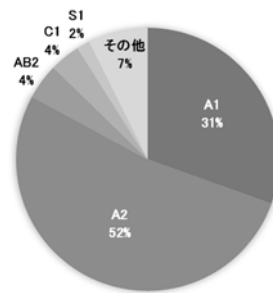


図-3 WGP き裂発生割合

### 2.2 き裂の進展速度分析方法

き裂進展速度について、首都高速道路においてこれまで蓄積された点検データを用いて分析した。使用した点検データの概要を表-1 に示す。

WGP のき裂進展速度を分析に用いるき裂長さは、WGP のコバ面を含むき裂全長の長さを足し合わせた長さを対象とした（図-4）。例えば、板厚 9mm の WGP において、板の表裏 10mm ずつき裂が進展した場合、き裂長さは 29mm である。進展速度については、過去 2 回以上点検されたき裂に対して、1 回目と 2 回目の点検時のき裂長さの差から、き裂の進展長さ（mm）を計算し、これを点検間隔（year）で除することで、年間進展速度（mm/year）を算出した。便宜上、1 回目点検時のき裂長さを、初期き裂長さとして取扱う。WGP の総損傷件数 10,982 件のうち、過去 2 回以上点検された A1 および A2 の件数は 3,355 件で約 30%であった。

表-1 分析に用いた点検データ

点検データ名	点検DB
データ更新年月	2022年11月
点検データ総数	10,982件
点検回数2回以上	3,355件



き裂の全長をき裂長さとして定義

図-4 き裂長さの計算例

### 2.3 き裂進展速度の分析結果

A1 のき裂進展速度の分析結果を図-5に、A2 き裂のき裂進展速度の分析結果を図-6に示す。路線ごとの傾向を把握するため、全路線の平均値とあわせて、データ数が比較的多い路線に絞り、路線ごとのき裂進展速度分析結果についても示している。図においては、縦軸を年間進展速度 (mm/year) とし、横軸を初期き裂長さランクとした。初期き裂長さランクとは、初期き裂長さ (=前回点検とき裂長さ) を 10mm 毎にグループ化したものである。例えば、初期き裂長さランク 0 は初期き裂長さが 0~10mm とする。き裂長さランクごとの発生割合を図-7に示す。

A1, A2 き裂ともに、初期き裂長さランクや路線によってばらつきが大きく明確な傾向は見られないものの、抽出路線のき裂進展速度は、平均すると A1 で 1.0mm/year 程度、A2 で 0.7mm/year 程度であり、過年度に算出したき裂進展速度<sup>2)</sup>と大きく変化は無かった。したがって、A1, A2 のうち比較的軽微なき裂について経過観察とした場合、次回点検までに A1, A2 が発生した溶接線が破断する可能性は低いと考えられる。また、図-7より8割以上がき裂長さ 40mm 以下の比較的短いき裂であるため、発見時に速やかな対応が必要となる A1, A2 き裂の数は限定的と言える。

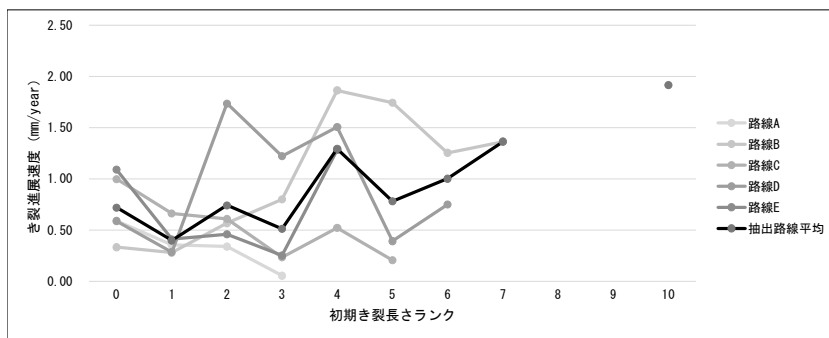


図-5 A1 き裂の進展速度

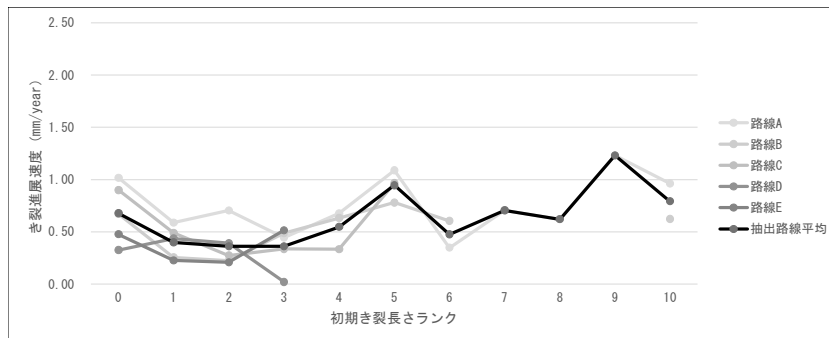


図-6 A2 き裂の進展速度

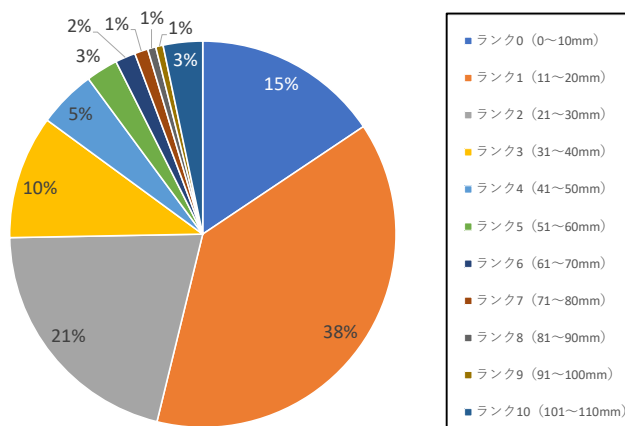


図-7 WGP き裂長さランクごとの発生割合

### 3. UITによる面外ガセット溶接継手の疲労強度向上対策

首都高速道路の鋼I桁橋における下横構ガセットプレート（以下、ガセット）端部のまわし溶接部には、多数のき裂が発生している（写真-1）。従来、ガセットから発生した疲労き裂が主桁ウェブ母材まで進展した場合は、ストップホールおよび当て板により補修・補強している。一方で、発見されたき裂のうち大部分は溶接止端内に留まっている短いき裂（以下、止端き裂）であり、グラインダーで切削してき裂を除去している。ただし、止端き裂であっても、板厚方向2mm程度の切削で除去出来なかった場合には、当て板で補強する場合があります、多大な労力とコストがかかっている。

UIT(Ultrasonic Impact Treatment)は、止端部を直径3~5mmのピンで打撃することにより鋼材表面に圧縮残留応力を導入し、疲労き裂の発生を防止するために用いられており、主に工場製作時に行われている（写真-2）。UITは作業時において、装置の反動・振動が比較的小さく、処理速度も速い<sup>3)</sup>。実橋で発生している止端き裂に対しても、き裂深さが小さければ、き裂を閉口することにより疲労き裂の進展を防止でき、従来工法に比べて大幅なコスト縮減が期待される。

本稿では、UITの現場適用に先立ち、き裂深さとUITの効果の関係について検討した結果について報告する<sup>4)</sup>。

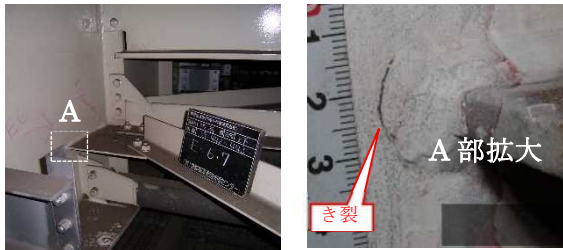


写真-1 ガセットの止端部のき裂



(a)UIT機材 (b)ハンドツール先端  
写真-2 UIT機材とピンの形状

#### 3.1 き裂深さと表面き裂長の関係

UITは深さの小さいき裂には効果があると考えられるが、UITの現場施工の際にき裂深さを都度確認することは現実的ではない。そのため、き裂深さと表面き裂長の関係を疲労試験で確認し、表面き裂長からき裂深さを推定する手法について検討を行った。

##### a) 試験内容

疲労試験は、図-8に示すように主板の両面にガセットを取り付けた試験体を用い、下限応力8.9N/mm<sup>2</sup>の片振り引張荷重で、表-2(B)に示す応力範囲で疲労試験を行った。UITを施工していない溶接のままの試験体11体に対してビーチマーク試験を実施し、き裂深さとき裂長の関係および疲労寿命を求めた。ビーチマーク試験は、一定回数毎に応力範囲を1/2にして（表-1(D)）、試験体が破断するまで行うことにより、破面にビーチマークと呼ばれる年輪のような痕跡が残る。ビーチマークの形状を計測することにより、き裂深さ、表面き裂長と繰返し回数の関係を求めることができる。例えば、No.03では、応力範囲65N/mm<sup>2</sup>を30万回作用させた後、32.5N/mm<sup>2</sup>を30万回作用させており、写真-3に示すビーチマークが得られる。

表-2 ビーチマーク試験の内容と結果

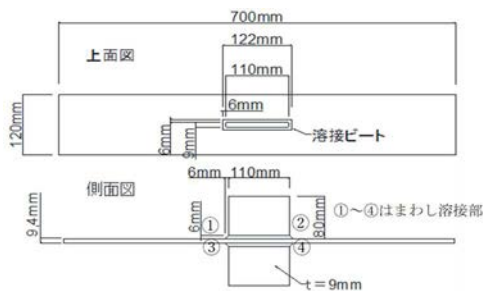
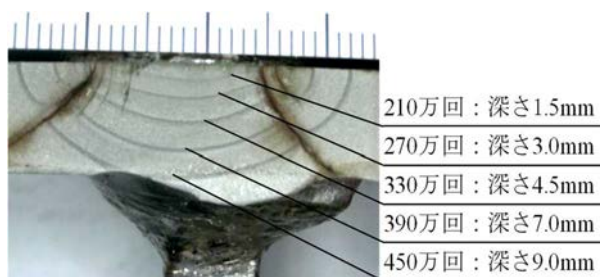


図-8 試験体の形状

(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
No.	応力範囲 (N/mm <sup>2</sup> )	1/2応力範囲 (N/mm <sup>2</sup> )	応力範囲変化回数	疲労寿命
01	65	32.5	30万回毎	367万回
02	65	32.5	30万回毎	428万回
03	65	32.5	30万回毎	387万回
04	65	32.5	30万回毎	336万回
05	65	32.5	50万回毎	514万回
06	80	40	30万回毎	202万回
07	80	40	30万回毎	203万回
08	80	40	30万回毎	215万回
09	80	40	30万回毎	202万回
10	100	50	20万回毎	152万回
11	120	60	10万回毎	70万回



写真－3 No.03 のビーチマーク

b) 試験結果

図－9のように表面き裂長と深さを定義し、ビーチマーク試験体（BM試験体）及び後述するUIT効果確認に用いた試験体（PC試験体）の疲労試験から得られた両者の関係を図－10に示す。止端き裂で表面き裂長が16mm以上になると母材進展する場合があります。止端き裂は深さが3.5mm未満であることがわかった。図－10には、止端き裂と母材進展き裂の線形近似式を示している。き裂が発生し止端内を進展している場合の平均アスペクト比は0.123であるが、母材進展した場合には0.298となっている。止端き裂に比べ、母材進展き裂はアスペクト比が大きくなると推測される。つまり、母材進展すると深さ方向の進展速度が速くなると考えられる。

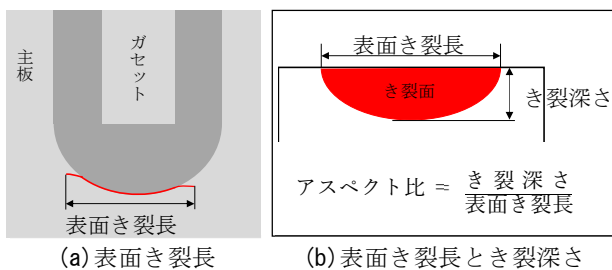
表－3(G)に疲労寿命を示す。ビーチマーク試験体では1/2応力範囲の繰返し回数を表－3(B)に示す応力範囲と同等となる繰返し回数に換算している。すなわち、1/2応力範囲の等価繰返し回数は表－1(B)に示す応力範囲に換算すると1/8の繰返し回数となる。図－11にビーチマーク試験での繰返し回数とビーチマークの対応が明確に確認できた5体（No.1～4, No.6）の寿命比と表面き裂長の関係を示す。寿命比は、下記の式で求められる。

$$\text{寿命比} = N_t / N_f$$

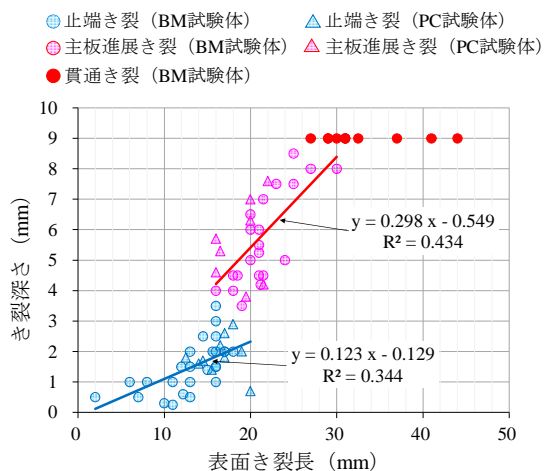
ここに、 $N_t$ ：表面き裂長さ  $t$  mm時の繰返し回数

$N_f$ ：疲労寿命

表面き裂長が16mmを超えるとき裂は母材に進展し、母材進展時の寿命比は0.6以上である。また、表面き裂長が26mmを超えるとき裂が貫通し、貫通時の寿命比は0.8以上である。



図－9 表面き裂長とき裂深さの定義



図－10 表面き裂長とき裂深さの関係

表-3 UIT 効果確認の内容と結果

試験体 No.	(A)	(B)	(C)	(D)		(E)	(F)	(G)	(H)	(I)
	応力範囲 (N/mm <sup>2</sup> )	繰返し回数 (万回)	発生位置	予き裂 <sup>※</sup>		UIT 深さ (mm)	溶接のままの試験体の疲労寿命 (万回)	UIT 後の疲労寿命 (万回)	寿命比率 (H)/(G)	
				長さ (mm)	表面き裂長 (I) 内: うち母材進展長 (mm)					
PC-01	50	400	②	2.6	17	0.34	約850	2400以上	2.8以上	
PC-02	65	160	②	1.4	15.5	0.25	約400	2000以上	5.0以上	
PC-03	65	240	④	1.6	14	0.56	約400	1300以上	3.3以上	
PC-04	65	150	②	1.7	14.5	0.38	約400	1200以上	3.0以上	
PC-05	65	310	②	1.8	12.5	0.35	約400	1300以上	3.3以上	
PC-06	65	210	①	1.8	17	0.54	約400	1300以上	3.3以上	
PC-07	65	150	①	3.8	19.5(1)	0.28	約400	876 (破断)	2.2	
PC-08	65	415	①	4.6	16(3)	0.62	約400	184 (破断)	0.5	
PC-09	65	242	②	5.3	16.5(1)	0.23	約400	1251 (破断)	3.1	
PC-10	65	230	②	5.7	16(1)	0.67	約400	848 (破断)	2.1	
PC-11	65	230	①	6.3	20(3)	0.56	約400	119 (破断)	0.3	
PC-12	65	300	②	7.0	20(2)	0.44	約400	162 (破断)	0.4	
PC-13	65	360	②	7.6	22(2)	0.56	約400	120 (破断)	0.3	
PC-14	80	70	②	0.7	20	0.13	約210	700以上	3.3以上	
PC-15	80	80	④	2.2	16.5	0.25	約210	700以上	3.3以上	
PC-16	80	85	②	4.2	21.5(1)	0.11	約210	130 (破断)	0.6	
PC-17	80	80	-	ルート破断	-	0.31	約210	700以上	3.3以上	
PC-18	100	50	①	2.9	18	0.18	約140	139 (破断)	1.0	
PC-19	120	30	①	2.0	19	0.22	約70	220以上	3.1以上	

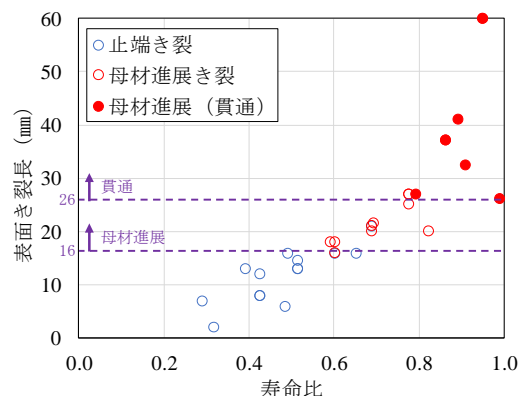


図-1 1 寿命比と表面き裂長の関

### 3.2 UIT の効果確認

き裂深さと UIT の効果の関係を求めるため、19 体で疲労試験を実施した。本試験は、疲労試験でき裂を発生（以下、予き裂導入試験）させた後にUITを行い疲労寿命を求めた（以下、UIT後試験）。試験体は図-8と同様である。

#### (1) 予き裂導入試験

表-3 (A) に示す応力範囲で計 19 体の疲労試験を行い、止端き裂及び母材進展き裂を導入した。予き裂は疲労試験を一時中断し、磁粉探傷試験でき裂の長さを確認することで導入した。また、一部の試験体に対しては、母材進展長 1~3 mm のき裂を導入した。結果として表-3 (E) に示すとおり、11 体で止端き裂、8 体で母材進展き裂を導入した。母材進展しているき裂長は 1 mm が 4 体、2 mm が 2 体、3 mm が 2 体であった。図-1 2 に PC-08 の予き裂導入後の状況を示す。

#### (2) UIT の施工

図-1 3 に示すように、UIT 範囲はまわし溶接部とガセット端から 30 mm とし、UIT 深さが 0.2 mm 以上となることを目標に行った。UIT の施工後の形状を写真-4 に示す。UIT 深さは型取り用ゴムを用いて計測した。表-3 (F) のとおり、PC-14, 16, 18 を除いて 0.2 mm 以上であった。

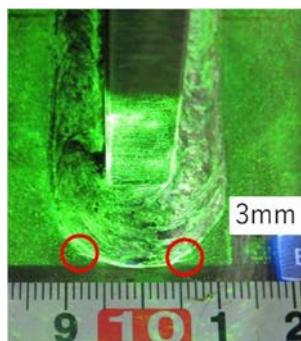


図-1 2 予き裂導入後の状況 (PC-08)

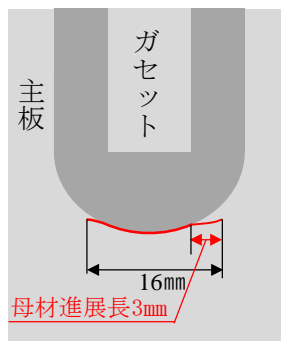


図-1 3 UIT 施工範囲



写真-4 施工後の形状

### (3) UIT 後試験

UIT 後試験の応力範囲は予き裂導入試験と同様とし、繰返し回数は溶接のままの試験体の疲労寿命の3倍程度を最大として、破断するまで行った。

表-3 (H)にUIT後の疲労寿命、表-3 (I)に溶接のままの試験体の疲労寿命に対するUIT後疲労寿命の比率（以下、寿命比率）を示す。19体中9体が破断しており、うち8体は予き裂が母材進展した試験体であり、その他1体（PC-18）はUIT深さが0.2mm以下であった。また、母材進展していた予き裂の深さは3.8mm以上、表面き裂長は16mm以上であった。図-14に予き裂深さと寿命比率の関係を示す。き裂深さが3.8mm未満の場合、すなわち止端き裂であれば、寿命比率が概ね3以上であり、効果が大きい。しかし、き裂深さが3.8mm以上の場合、すなわち母材進展き裂に対しては、UITの効果小さい。ただし、UIT深さが0.2mm未満の場合は、き裂深さが3.8mm未満であってもUITの効果小さい場合がある。図-15にUIT深さと寿命比率の関係を示す。UIT深さが0.44~0.67mmと比較的大きい試験体であっても、母材進展き裂に対しては、UITの効果小さかった。したがって、UITによる補修効果は、応力範囲、き裂深さ、UIT深さ、主板進展き裂長に影響を受けると考えられるが、応力範囲が65N/mm<sup>2</sup>以下であれば、止端に留まるき裂に対してUITによる打撃痕の深さを0.23mm以上とすることで、疲労寿命は溶接ままの継手の2倍以上となる。

以上の結果より、対象とするき裂深さ等の制約はあるものの、き裂補修としてUITを適用できる可能性が示唆された。従来、グラインダーによる切削や当て板により対策していたガセットのき裂に対しUITを適用することで、大幅なコスト削減が期待できる。

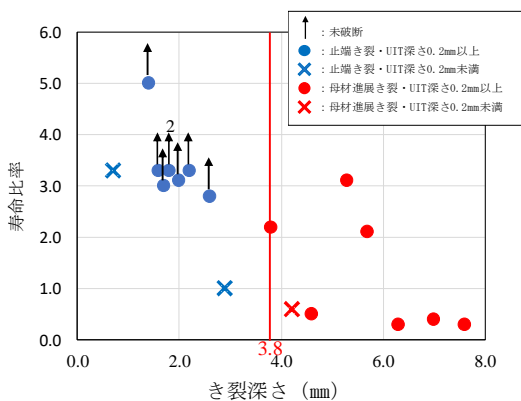


図-14 UIT後試験のき裂深さと寿命比

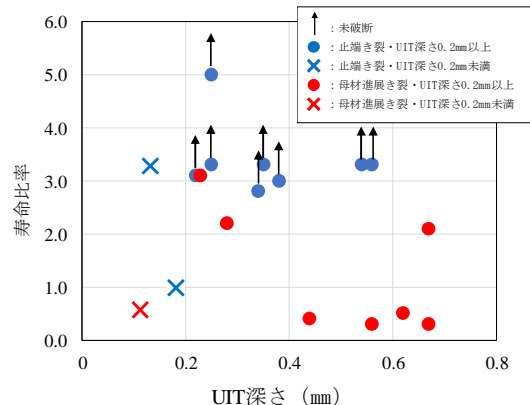


図-15 UIT後試験のUIT深さと寿命比

## 4. 近接目視点検システムの開発

平成26年3月道路法施行規則が一部改正され、道路における橋長2.0m以上の橋、高架橋の点検は近接目視による5年に1度の定期点検が義務づけられた。また定期点検を行う技術者には、道路橋の点検を適正に行うために必要な知識及び技能を有することが明記された。そのため、点検技術者の効率的な養成が喫緊の社会的要請事項とされている。現状の点検技術者の教育は、テキストによる講義と現場実習に大別される。講義は比較的容易に実施できるが、板組みや溶接方法といった構造詳細や点検の対象となる構造物の構造特性等を十分に理解することは難しい。一方で現場実習は実構造物を見ることが出来るものの、現場の準備や安全性の確保が必要であることや実習できる人数に制限がある。これら講義と現場実習のメリット・デメリットを補完し、疲労き裂の発生部位と発生要因を机上で効率的に学習可能とすることを目的として、鋼橋の疲労き裂に関する近接目視点検訓練シミュレータの開発を行った<sup>5)</sup>。

#### 4.1 鋼橋の疲労き裂に関する点検訓練シミュレータの開発

本システムは、3D ゲーム開発ソフトの Unity を開発プラットフォームとしており、近接目視点検の対象となる橋梁の 3D モデルを作成し、バーチャル・リアリティ (VR) 環境を再現することにより、時間や場所の制約を受けることなくパソコンおよびヘッドマウントディスプレイ環境において実橋梁の点検を体験可能としている (図-16)。点検対象の橋梁は、鋼橋の一般的な形式の一つである RC 床版単純 I 桁橋と RC 床版鋼箱桁橋の 2 構造 (図-17) で、橋梁内の溶接部は全てモデル化した (I 桁橋 : 376 箇所, 箱桁橋 : 1,603 箇所)。



図-16 点検訓練シミュレータ動作環境

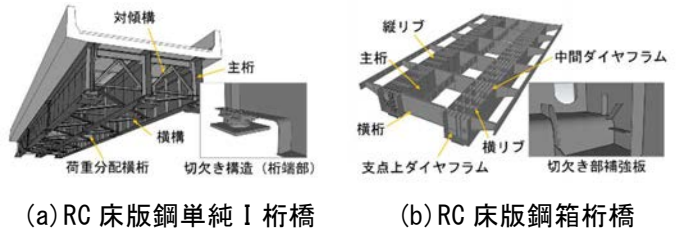


図-17 点検対象とした橋梁

#### 4.2 点検訓練シミュレータの機能

本システムの主な機能として、i) VR を活用した橋梁内のウォークスルーによる疑似体験, ii) 橋梁内の近接目視点検, iii) 疲労き裂のランク判定入力と正答確認, iv) 疲労き裂の発生部位や発生原因の学習, v) 点検箇所数と損傷発見数のスコア評価機能等を有している。本システムを用いた近接目視点検体験の流れを以下に概説する (図-18)。

##### a) スタートメニュー

利用者は、i) 点検対象構造 (I 桁橋, 箱桁橋), ii) 点検部位, iii) オプションの順に設定を行う。点検初心者・点検実務者など、利用者のレベルに合わせた点検体験を可能とするため、点検対象箇所のガイド表示 (溶接線の着色有無) の選択や部材の破断に及ぶような点検時に見落とすことの許されない危険なき裂の発生部位 (以下、重点部位という) のみに絞り込んだ点検, 学習も可能とした。

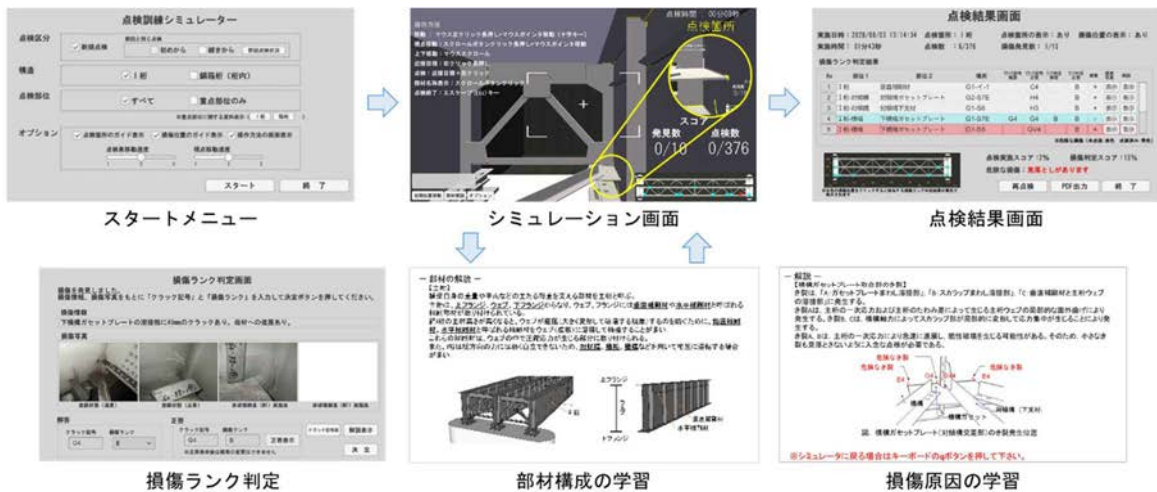


図-18 点検訓練シミュレータを用いた点検体験の流れ

##### b) 点検シミュレーション

シミュレーション画面では、画面上に映し出された橋梁内を移動しながら点検を行う。継続的な学習を可能とするため、シミュレータ起動時に疲労き裂の発生位置を毎回ランダムで 10 箇所出現するよう設定した。また、近接目視点検体験に加えて、鋼橋で発生する疲労き裂の発生位置や発生要因など、鋼橋の点検を行う上で必要不可欠な基礎知識の習得をサポートする機能として、橋梁内の部材をクリックすることで部材名称や部材構成の解説スライドを表示する機能を持たせた。



### c) 損傷ランク判定

近接目視点検で疲労き裂を発見すると、実際に首都高速道路の定期点検で報告された当該箇所の損傷事例の中から抽出された損傷情報や損傷写真が表示される。利用者は、損傷写真（塗膜状況、磁粉探傷試験結果）や損傷情報（部位、き裂長、母材進展有無等）から判断して疲労き裂のクラック記号と損傷ランクの入力を行う。その後、正答と比較することで点検に必要なランク判定等の知識を学習する。また、クラック記号図や損傷の解説を表示して、クラック記号や損傷の発生部位詳細、発生要因を学習することも可能である。なお、クラック記号とは首都高速道路における点検結果の記録において、便宜的に定めているものであり、クラック記号、損傷ランクは管理者の基準にあわせて変更することが可能である。

### d) 点検結果の確認

点検結果画面では、点検時間、点検箇所数、損傷発見数のほか、すべての損傷について、部位や場所、クラック記号とランク判定結果と正答が一覧表示される。点検の見落としが1件以上あった場合は、赤色の注意メッセージが表示されるように設定しており、同画面から再点検を行うことができる。点検結果はPDFに出力することも可能である。

## 4.3 導入効果の検証

首都高速道路の点検業務に従事するための点検技術者資格認定のための点検技術研修会において、本システムを現場点検実習の代替手法として活用したことにより、現場への移動時間の削減や実習作業時間の短縮等の効率化（従来の1/4の時間）を図ることができた（表-4）。また、部材名称や疲労き裂の発生要因、クラック記号、ランク判定事例等の表示機能等により、学習効果を向上させることが可能となった。

表-4 導入効果検証

項目	従来手法	本システム利用	効率化
移動（会議室⇒現場）	45分	0分	45分
現場点検実習	180分	60分	120分
移動（現場⇒会議室）	45分	0分	45分
合計	270分	60分	210分

点検技術者教育の効率化を実現

## 5. おわりに

本稿で紹介したとおり、首都高速道路では、点検から補修・補強に至るまで、蓄積されたデータや新技術を活用し、鋼橋疲労き裂対策の効率化を進めている。今後も引き続き効率化に資する検討を進めることで、構造物の維持管理にかかる負担軽減に努めていきたい。

## 参考文献

- 1) 鈴木誠，平野秀一：第25回橋に関するシンポジウム論文集，pp. 63-71，2022. 8.
- 2) 牧山大祐，中村充：鋼I桁のウェブギャップ板に発生する疲労き裂の進展速度分析，土木学会第71回年次学術講演会，pp. 797-798，2016. 9.
- 3) 富永知徳，松岡和巳，佐藤嘉昭：補修溶接を施した既設クレーンランウェイガーダーの超音波衝撃処理による疲労寿命向上，鋼構造論文集，Vol. 14，No. 55，pp. 47-58，2007.
- 4) 上坂健一郎，時田英夫，森猛，内田大介，島貫広志，富永知徳，増井隆：溶接止端に留まる疲労き裂が生じた面外ガセット溶接継手に対するUITの補修効果，土木学会論文集A1，Vol. 77，No. 1，pp. 121-131，2021. 6.
- 5) 日名誠太：鋼橋の疲労き裂に関する近接目視点検訓練シミュレータの開発，第34回日本道路会議論文集，2021. 11.