

鋼橋の疲労き裂に関する 近接目視点検教育システムの開発

効率的に点検技術の向上を図る点検訓練シミュレータ

日 名 誠 太

道路法施行規則改正により、道路橋の定期点検は、必要な知識及び技能を有する者が5年に1回の頻度で近接目視点検を行うことが義務化された。そのため、インフラの老朽化や生産人口の減少が進む中、点検技術者の効率的な養成が喫緊の社会的要求事項とされている。一方で、鋼橋で発生する損傷の内、疲労き裂は初期段階では非常に微細であることから、点検時に見落とされることも少なくない。本稿ではこれらを補完するため、仮想空間上で効率的に疲労き裂の発生部位と発生要因を学習可能とする点検訓練シミュレータの開発・改良を行ったので、その内容について報告する。

キーワード：鋼橋，点検，疲労き裂，教育，シミュレータ

1. はじめに

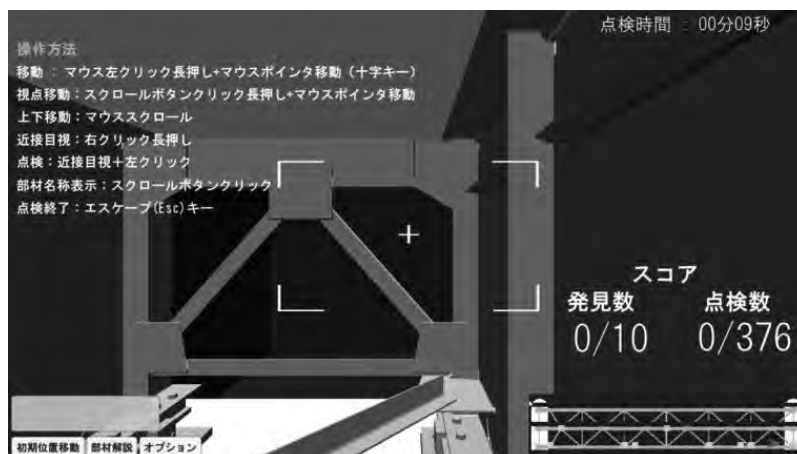
道路法施行規則の一部を改正する省令（平成26年3月31日公布，7月1日施行）により，道路における橋長2.0 m以上の橋，高架の点検は近接目視による5年に1度の定期点検が義務づけられた。また定期点検を行う技術者には，道路橋の定期点検を適正に行うために必要な知識及び技能を有することが明記された¹⁾。そのため，点検技術者の効率的な養成が喫緊の社会的要請事項とされている。

鋼橋における主な劣化損傷は腐食と疲労である。特に疲労き裂は過度に進展すると部材を破断し，最悪の場合，落橋・倒壊に繋がる可能性のある非常に危険な損傷であることから，初期の段階で発見し，適切な措置を行うことが橋梁の安全性を確保する上で重要であ

る。しかし，初期の疲労き裂は非常に微細であり，点検時に見落とされることも少なくない。一方で，疲労き裂が発生しやすい部位や発生要因については，既往の研究等で大部分が明らかにされており，それらを理解していれば重大損傷に繋がるような損傷の見落としを削減することが可能であると言える。

現状の点検技術者の教育は，テキストによる座学と現場実習に大別される。テキストによる座学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できるものの，現場の準備や安全性の確保に労力を要することや実習できる人数に制限がある。

これらテキストによる座学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



図一 近接目視点検教育システム（点検訓練シミュレータ）

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教育システムの開発を行っている²⁾。開発当初のシステムには、①シミュレータの操作が難しい、②対象の構造や点検箇所が少ない、③利用者のレベルに合わせた学習ができない、④疲労き裂についての学習機能が少ないといった課題がある。本稿では、既存のシステムを基に、構造物の点検を行うための知識、技術を仮想空間上でより効率よく習得できることを目的に開発・改良を行った近接目視点検教育システム(図一1)について報告する。

2. 点検教育システムの開発

(1) 開発システム

本システムの開発には、3Dゲーム開発ソフトのUnityを使用している。Unityはゲーム開発ソフトであるが、近年では医療分野における人体解剖アプリ、防災分野における津波体験アプリなど様々な分野で活用されている。

また、Unityは外部ツールとの連携に優れており、3Dモデリングソフトで作成した3DモデルをUnityにインポートすることが可能である。本システムでは、近接目視点検の対象となる橋梁の3Dモデルを3DモデリングソフトのsketchUpで作成し、Unityにインポートした。

更に、UnityにはAssetと呼ばれるゲーム開発を行

うためのリソースがUnity Technology社が公式に運営している専用のWebストア上で公開されており、Assetを活用することにより開発の労力を大幅に削減している。本システムでは、利用者が操作する点検技術者の基本コンポーネントにAssetを活用し、全体の制御はC#プログラムで行った。

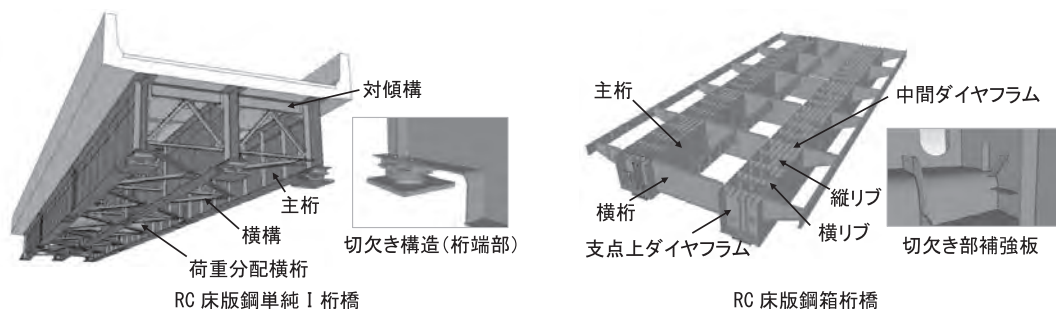
(2) モデル化した橋梁と疲労損傷

点検対象の橋梁は、鋼橋の一般的な形式の一つであるRC床版鋼単純I桁橋(以下、鋼I桁という)とRC床版鋼箱桁橋(以下、鋼箱桁という)の2構造である。作成した橋梁モデルを図一2に示す。

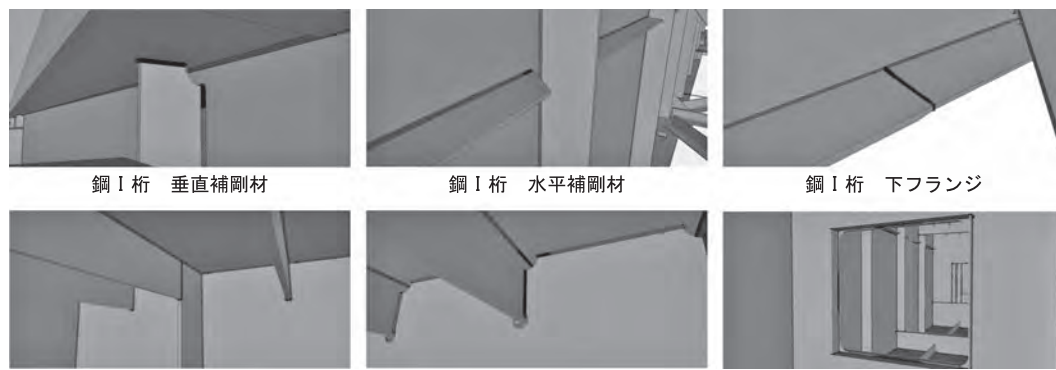
鋼I桁は、対傾構、横構があり、支間中央には荷重分配横桁を配置している。また、片方の主桁には主桁端部を切欠いた構造を設けている。

鋼箱桁は、ダイヤフラム、横リブがあり、縦リブには板継ぎ溶接部を設けている。また、鋼I桁と同様に、片方の主桁端部を切欠いた構造を設けており、切欠き部には補強板を配置している。

一般に、鋼橋の点検では疲労き裂の発生位置となる溶接ビード上に発生した塗膜割れを近接目視で確認するため、橋梁内のすべての溶接ビードをモデル化しており、鋼I桁で376箇所、鋼箱桁で1,603箇所をモデル化した。モデル化した溶接ビードの一例を図一3に示す。また、点検対象となる疲労き裂は鋼I桁で47種類、鋼箱桁で53種類を対象とした(表一)。



図一2 橋梁モデル



図一3 溶接ビードのモデル化

表一 対象とした疲労き裂の発生部位

(a) 鋼I桁			(b) 鋼箱桁		
部位1	部位2	疲労き裂種別数	部位1	部位2	疲労き裂種別数
主桁	垂直補剛材	6	主桁	垂直補剛材	3
	水平補剛材	1		水平補剛材	1
	下フランジ	1		縦リブ	2
	切欠き部	1		横リブ	6
横桁	垂直補剛材横桁取合部 (外桁半せん断継手)	6		中間ダイヤフラム	6
	上フランジ	1		支点上ダイヤフラム	6
	下フランジ	1	切欠き部	1	
	上ウェブギャップ板	6	ダイヤフラム	支点上垂直補剛材	3
	下ウェブギャップ板	6		水平補剛材	3
対傾構	上支材・下支材・ガセットプレート	6		縦リブ	6
横構	垂直補剛材 (内桁側対傾構取合部)	6	マンホール	1	
	横構	下横構ガセットプレート	3	横リブ	垂直補剛材
支承	下横構ガセットプレート	2	フランジ		6
			ベースプレート	1	縦リブ
合計		47	縦リブ	板継ぎ部	1
				切欠き部	1
			合計		53

3. 点検教育システムの機能

Unity で開発した本システムは、Windows や Mac, Linux など複数の OS 上でスタンドアロンとして実行することが可能であり (図-4), ①バーチャルリアリティ (VR) を活用した橋梁内のウォークスルーによる疑似体験, ②橋梁内の近接目視点検, ③疲労き裂のランク判定入力と正答確認, ④疲労き裂の発生部位や発生原因の学習, ⑤点検箇所数と損傷発見数のスコア評価を基本機能としている。以下に, 図-5 に示す本システムを用いた近接目視点検体験の流れについて概説する。



図-4 パソコン版動作イメージ

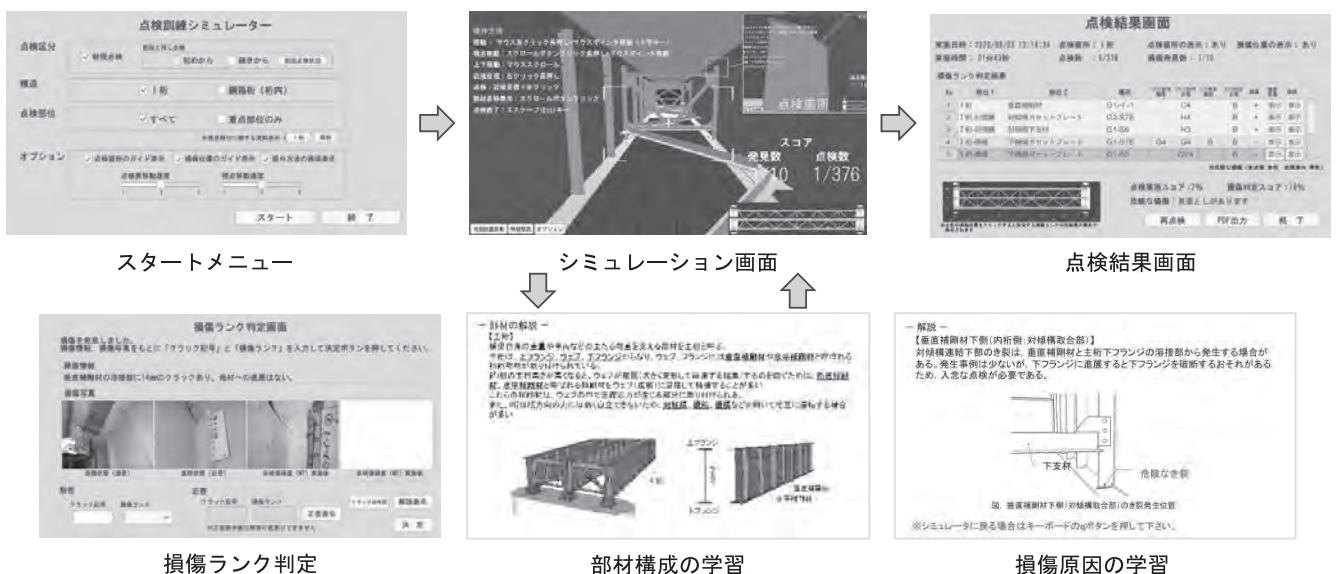


図-5 近接目視点検教育システムの主な機能

(1) スタートメニュー

利用者は点検を実施する構造物の選択、点検部位の選択、損傷発生箇所の着色有無等の設定を行う。本システムでは、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ことを目的に、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³⁾（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。

(2) 点検シミュレーション

開発当初のシステムでは、橋梁モデル内の点検箇所の内、疲労き裂の位置を10箇所に固定して設定したため、継続的な学習を行うことが困難であった。本改良においては、点検システム起動時に疲労き裂の発生位置を毎回ランダムで設定するよう改良し、継続的な学習を可能とした。なお、重点部位の学習機能（危険なき裂の見落とし判定）として、疲労き裂10箇所のうち、危険なき裂を1箇所以上出現させるよう改良を行った。

また、本システムは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目的に、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し、基礎知識の習得をサポートする機能を持たせた。

(3) 損傷ランク判定

近接目視点検で疲労き裂を発見すると、損傷ランク判定画面が表示される。損傷ランク判定画面では、当該箇所の損傷情報や損傷写真を数種類の中からランダムに表示する。損傷情報と損傷写真は都市内高速道路の点検で実際に報告されているものを使用している。利用者は、損傷情報（部位、き裂長、母材進展有無等）や損傷写真（塗膜状況、き裂状態）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い、正答と比較することによって学習効果を上げるものである。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できる。

(4) 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、損傷発見の有無にかかわらず全ての損傷箇所が一覧表示され、ランク判定画面で利用者が入力したクラック記号、損傷ランク、および正答や損傷写真が確認でき、点検結果をPDFに出力することも可能である。

4. ヘッドマウントディスプレイを用いた点検訓練システムの開発

本システムは利用者のパソコン等で簡単に体験することが可能であることから、今後の発展性として、全国的高速道路管理者や地方公共団体等の橋梁点検技術者を対象とした点検講習会や勉強会等での活用が見込まれる。そのため、本システムをより多くの利用者に興味を持ってもらい、体験してもらうための工夫として、ヘッドマウントディスプレイ（以下、HMDという）を用いた点検訓練システムを開発した。

HMD版のシステム開発で使用したHMDを図一6に、その仕様を表一2に示す。HMD版のシステム開発は、従来のパソコン版システムのUnityプログラム、およびsketchUpで作成した橋梁モデル（鋼I桁）をベースとして、HMD固有機能である入力操作と画面インターフェースを修正した。入力操作は、HMDに付属しているモーションコントローラ（左手用、右手用）を使用する。パソコン版のキーボードとマウスの操作方法を踏襲し、モーションコントローラの操作方法を実装した。また、利用者が操作するモーションコントローラをHMD内の3D空間に投影し、モーションコントローラから伸びるレーザーポインタを点検箇



図一6 使用したヘッドマウントディスプレイ

表一2 ヘッドマウントディスプレイの仕様

プラットフォーム	Windows Mixed Reality
解像度	2880 × 1440
リフレッシュノート	60 Hz/90 Hz
視野 (FOV)	100°
IPD (瞳孔間距離)	54 mm ~ 69 mm
トラッキングセンサ	ジャイロスコープ, 磁力計, 加速度計, 近接センサ
質量	840 g
付属品	モーションコントローラ×2, ヘッドフォン

所に合わせて点検操作が行えるように実装した。

利用者に表示する点検箇所数，損傷発見数，点検時間等の基本情報，および損傷ランク判定画面，点検結果画面等の2Dで表現する情報は，3D空間上に表示している。

5. 導入効果の検証

改良した本システムの有用性を把握するため，本システムを用いた説明会および各種イベント等において，アンケート調査を行った。アンケートの調査対象は高速道路の建設・管理等に従事する技術者，計87名である。アンケート調査項目は表-3に示す9項目とし，全ての調査項目について5件法で実施した。アンケート結果を図-7に示す。

全体を通して「そう思う」，「ややそう思う」が約70%で肯定的な回答であった。特に，「Q2：構造物（鋼製部材や部材名称）の学習」，「Q5：点検初心者向け

表-3 アンケート調査項目

Q1 操作は使いやすい。
Q2 構造物(構成部材や部材名称等)の学習として効果がある。
Q3 疲労損傷の発生部位や発生原因の学習として効果がある。
Q4 クラック記号やランク判定の学習として効果がある。
Q5 点検初心者向けに効果がある。
Q6 点検実務者向けに効果がある。
Q7 繰り返しの継続学習に効果がある。
Q8 自己のスキルアップとして効果がある。
Q9 点検訓練シミュレータを今後も使用していきたい。

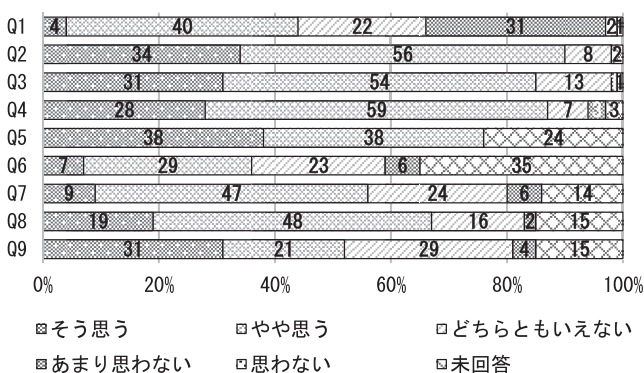


図-7 アンケート結果

の学習」については，非常に効果的であるとの回答が大多数であった。一方で，「Q1：操作の使いやすさ」については，「あまりそう思わない」，「思わない」が約30%と否定的な回答であり，「慣れるまでが難しい」，「操作性がよければまた使いたい」との意見が多く，更なる改善の余地があることがうかがえた。

6. おわりに

本稿では，鋼橋の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に開発・改良した近接目視点検教育システムについて報告した。また，本システムを用いた講習会等を行い，アンケート調査結果により，本システムの有用性を示した。今後は，操作性の改善を行うとともに，鋼床版，鋼橋脚，PC・RC橋などを対象に機能を拡張し，より多くの点検技術者が活用可能となり，点検技術の向上，効率化に寄与していきたい。

謝辞

最後になりますが本システムの開発は，首都高速道路(株)と東京都市大学，首都高技術(株)，(一財)首都高速道路技術センターとの共同研究「都市基盤施設の再生工学 首都高における点検・診断技術の開発・高度化」の一環として行われたものである。東京都市大学，首都高技術(株)，(一財)首都高速道路技術センターの関係各位に誌面を借りて謝意を表します。

JCMA

《参考文献》

- 1) 国土交通省：道路の維持修繕に関する省令・告示の制定について（道路法施行規則の一部改訂等），2014。
- 2) 横山薫，田井政行，小西拓洋，三木千壽：鋼橋の疲労損傷に関する近接目視点検教育ソフトの開発，土木学会論文集H（教育），Vol.73，No.1，67-75，2017。
- 3) 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。

【筆者紹介】

日名 誠太（ひな せいた）
 首都高速道路(株)
 保全・交通部 点検・補修推進室 保全技術課
 係員

