

ケーブルが腐食した鋼斜張橋の耐震性能に関する解析的研究

石原秋太¹・橋本国太郎²

¹学生会員 神戸大学 大学院 市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

E-mail: 215t104t@stu.kobe-u.ac.jp

²正会員 神戸大学准教授 大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail: hashimoto@person.kobe-u.ac.jp

アメリカの I-35W 橋の落橋事故以降、橋梁に腐食を想定した残存耐荷力やリダンダンシー評価を行うという研究が鋼トラス橋を中心として行われてきたが、斜張橋においては、腐食したケーブルを有する斜張橋の残存耐力を検討した研究も進められている。しかし、腐食したケーブルを有する斜張橋の耐震性能に関する研究はほとんど行われていない。そこで本研究では、斜張橋を FEM モデルで再現し、死荷重・プレストレスを導入し、ケーブル部材に腐食を与え、地震応答解析を行った。この解析においては、健全状態のケーブルの断面を減らすことで腐食を再現し、その際の橋梁の各部材の荷重の分担の変動や、桁やケーブルに発生している応力などを確認することで、腐食により地震時の挙動の変化があるかについて確認した。

Key Words: cable-stayed bridge, corrosion, earthquake-proof, fiber model, Seismic Response Analysis

1. はじめに

我が国では 1960 年に最初の斜張橋が建設され、それ以降多数の斜張橋が建設されてきた。斜張橋は大きく分けると「塔」「桁」「ケーブル」という三つの部材から構成される橋梁で、塔と桁を斜めに張ったケーブルで結び桁を支えるという構造であり、ケーブルが非常に重要な役割を担っている。斜張橋には種々の形式が存在し、ケーブルの張り方や塔と桁を結ぶケーブルの本数の違いなどで細かく分類される。このため斜張橋は非常に設計自由度の高い橋梁形式といえる。また、スパンに目を向けると近年はケーブルの高性能化などに伴い、当初は 100m 程度であったスパン長も現在では 1000m を超える橋梁が製作されるなど長大化が進んでいる¹⁾²⁾。斜張橋は設計自由度の高さから、詳細な設計は橋梁ごとに違い、長大斜張橋においては独自の設計基準を採用していることも多い。このようなことから画一化された維持管理方法は提案されておらず、また健全性の評価方法も確立されてはいない。しかし、斜張橋の損傷事例は国内外問わず発見されており、その原因も雨水のケーブル内への侵入による腐食や、車両・船舶の橋梁への衝突、落雷や火災など多岐にわたっている。詳細な事例を挙げると、国

内においては、図-1 に示すようなケーブルのカバー内に雨水が溜まりケーブルが腐食した事例や³⁾⁴⁾⁵⁾、海外では、韓国の西海大橋のケーブル切断事故やベトナムの Binh 橋の台風時の船の接触によるケーブル・主桁の損傷例などがある。橋梁形式は異なるが、斜張橋と同様にケーブルが非常に重要な役割を担っている吊り橋形式の橋梁であるインドネシアのクタイ・カルタネガラ橋が点検補修中に、何らかの原因でクランプピンがせん断破壊をし、2011 年に落橋した⁶⁾。一方で秋田県の雪沢大橋ではエクストラドーズド橋のケーブルが雨水の侵入が原因で破断しているがこちらは落橋には至らなかった。この雪沢大橋のように破断が発生したとしても、落橋しないこともあるが、クタイ・カルタネガラの例のように現在腐食が



図-1 ケーブル腐食の様子⁵⁾



図-2 解析モデル全景

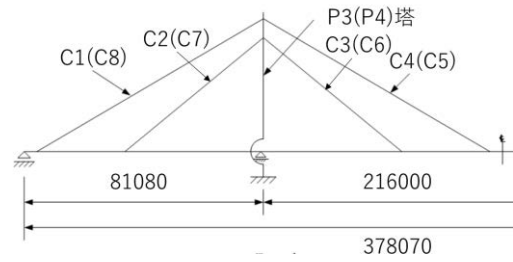


図-3 解析モデル側面図

生じているケーブルが破断することによって落橋などの大事故が起こるとも限らない。このような事例が存在することから橋梁の部材や部材の一部に損傷が生じても橋の機能をある程度維持できる性質、つまりリダンダンシー⁷⁾を評価することが求められはじめた。このリダンダンシーの評価に関しては、2007年にアメリカで発生したI-35W 橋の落橋事故を契機として国内外問わず研究が盛んになり、落橋した橋がトラス橋であったことからトラス橋では多数行われている^{8)・10)}が、斜張橋においては、腐食したケーブルを有する斜張橋の残存耐力を検討した研究も近年進められている^{11)・12)}。しかし、腐食したケーブルを有する斜張橋の耐震性能に着目した研究はほとんど行われていない。ケーブル系橋梁において、ケーブルの損傷・破断は、その橋梁の供用可能性に関わる重要な事態であることから、その残存性能やリダンダンシーに関しての評価は喫緊の課題となっている。

本研究ではケーブル系橋梁の中でも斜張橋に着目する。近年建設された斜張橋においては、設計時にケーブル損傷時の性能について検討が行われている場合があるが、初期に建設された斜張橋においてはその検討が充分でない場合が多い。このことから本研究では、文献 11)でも検討したケーブル本数が比較的少ない斜張橋においてケーブルの腐食損傷した場合の耐震性能を検討する。そこで有限要素法（以下、FEM）によって橋梁の全体系をモデル化し、着目したケーブルに腐食を与え、地震動を与えた際の各部材の応力および変形挙動を追跡することによって、橋梁に残存している耐震性能について評価する。

2. 解析方法

(1) 解析モデル

本研究に用いる解析コードは材料非線形性と幾何学的非線形性を同時に考慮した非線形 FEM 解析が可能な汎用有限要素解析コード Scan FEM¹³⁾である。ただし、本研究の地震応答解析では解析の収束性を考慮して材料非線形性のみを考慮した動的解析を行った。

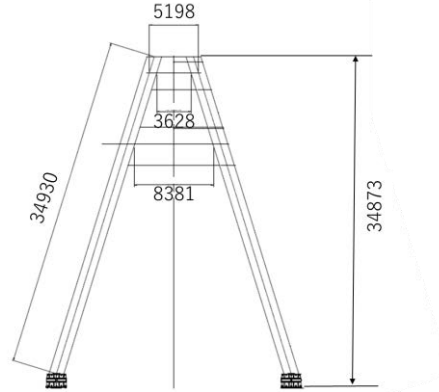


図-4 主塔正面図

a) 支間割と構造形式

本研究における解析モデルの全景を図-2に、支間割及びケーブル番号の振り方について示した側面図を図-3に示す。橋長は378.07m、中央径間長は216mを有する3径間連続鋼斜張橋で、ケーブル形式はケーブル2段を一面吊りした形式である。側径間と中央径間の比は1.51で、一般的な3径間斜張橋の支間割が2.2~2.5であることから、側径間側が一般的な橋梁と比べ長めに設定されている。

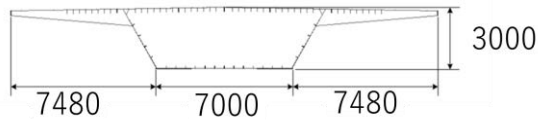
b) ケーブル

本研究で検討を行う斜張橋では図-3に示すように、ファン形式の配置となっている。また、この斜張橋においてケーブルは塔サドルを介して主桁の両アンカー部を結ぶ形式となっている。

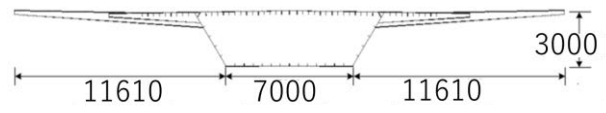
解析モデル内において、ケーブル要素はトラス要素でモデル化し、それぞれ10分割とした。

c) 主塔

主塔の正面図を図-4に示す。塔の高さを主桁位置から上段ケーブルの定着点までとすると約34mであり、一般的な3径間の斜張橋の主塔の高さは中央径間長の1/5~1/6であるので、一般的な斜張橋と同程度の設定である。解析モデル内において、主塔部はファイバー要素でモデル化した。使用鋼材は全断面 SM490 とし、ファイバー要素であるため、縦補剛材や鋼材の厚さなどを考慮し、柱部分と梁部分を合わせて9種類の断面を作成した。



(a) 一般部



(b) 塔部

図-5 主桁断面

表-1 支承形式

	橋脚-桁	橋脚-塔
P2 橋脚	ペンデル支承	/
	ラテラル支承	
P3 橋脚	ピン支承	ピン支承
P4 橋脚	ピンローラー支承	ピン支承
P5 橋脚	ペンデル支承	/
	ラテラル支承	

表-2 支承拘束条件

名称	変形	回転
P2・P5 ペンデル	橋軸方向フリー	橋軸直角フリー
	他方向固定	他方向固定
P2・P5 ラテラル	橋軸方向フリー	橋軸直角フリー
	他方向固定	他方向固定
P3 桁ピン支承	全方向固定	橋軸直角フリー
		他方向固定
P4 桁ピンローラー支承	橋軸方向フリー	橋軸直角フリー
	他方向固定	他方向固定
P3・P4 塔ピン支承	全方向固定	橋軸直角フリー
		他方向固定

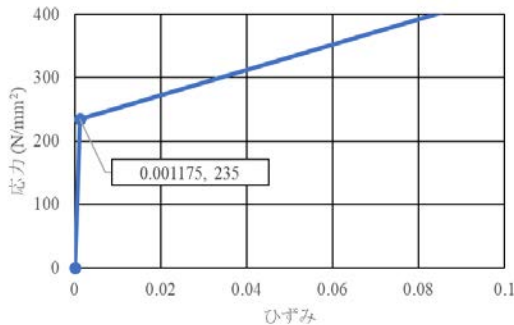


図-6 鋼材の応力-ひずみ関係

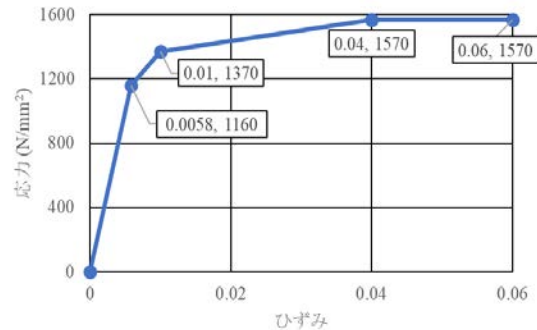


図-7 ケーブルの応力-ひずみ関係

d) 主桁

主桁断面形状については図-5に示すような逆台形箱型の断面形状である。

解析モデル内においては、ファイバー要素でモデル化した。縦補剛材、鋼材の厚さやダイヤフラムの有無などを考慮して12種類の断面を作成した。塔と桁の交差部分に関しては、図-5(b)に示すように他の部分と形状が異なるため、図-5(b)に示すような断面としてモデル化した。

e) 支承部

本研究で検討を行う斜張橋において採用されている支承形式について表-1に示す。

解析モデルにおいては、支承ごとにソリッド要素などによって3D形状を再現し、各性状を定義するという方法を採用せず、すべてばね要素を用いて変形や回転の剛性を定義するという方法で簡易にモデル化を行っている。その拘束条件をまとめたものを表-2に示す。

f) 橋脚部

本研究においては、ケーブル腐食損傷時の上部構造の地震時応答挙動に着目しているため、橋脚部の詳細な再現は行わなかった。

解析モデルにおいては、弾性はり要素によりモデル化した。各橋脚において断面積・断面二次モーメント・ね

じりモーメントの3種類の数値を定義することでモデル化を行った。また、各橋脚の基部は全方向固定とした。

g) 基礎部

橋脚部と同様に上部構造に対する地震時応答挙動に着目しているため、本研究においては基礎部の再現は行っていない。

(2) 材料モデル

解析で用いた主塔や主桁の鋼材の応力-ひずみ関係はバイリニアモデルとし、図-6にSS400材で使用した応力-ひずみ関係を示す。応力が降伏点に達した後は、E/100の二次勾配で応力-ひずみ関係が増加していくように設定した。また、ケーブル材料に関しては、明確な降伏点が存在しないことから、応力-ひずみ関係をトリリニア型とし、文献¹⁾と同様に、図-7のように二次勾配へ移行する応力を1160N/mm²、三次勾配へ移行する応力を1370N/mm²、最大応力を1570N/mm²とし、最大応力後は応力は最大応力のままで、ひずみのみが大きくなるように設定した。

(3) 解析方法

本節では、本研究において、斜張橋のケーブル腐食時

の耐震性能評価を行うために用いる解析方法について示し、解析パターンや各解析に用いる地震荷重について述べる。

a) 自重荷重解析

本斜張橋モデルに対して、ケーブル腐食を考慮した地震応答解析を実施する前に、自重を載荷するための静的解析を実施した。この静的解析は、以下のように3STEPに分けて行う。

STEP1 ケーブル腐食モデルの作成

STEP2 死荷重の載荷

STEP3 ケーブルにケーブルプレストレスを導入

死荷重は主桁自重、主塔自重、ケーブル自重、主桁部ケーブル定着点にケーブル定着構造分の自重とし、さらに、主塔と橋脚の節点部にカウンターウェイトもモデル化した。

b) 動的解析

本斜張橋モデルにおける地震応答解析では、以下の4STEPに分けて行う。

STEP1 質量の入力

STEP2 固有値解析

STEP3 レーリー減衰の入力

STEP4 地震動の入力

質量については、主塔、主桁、ケーブルについて入力した。

材料の減衰比については、静的解析の際は鋼材である塔、桁、ケーブルについては0.1を、コンクリートである橋脚には0.2を等価減衰で入力し、動的解析の際はレーリー減衰を考慮しているためすべての材料について0とした。

c) 解析パターン

本斜張橋モデルのケーブルのうち1本から4本のケーブルが腐食したモデルを作成し、耐震性能を評価する。ただし、P3塔、P4塔で対称となるケーブル（例えば、C1ケーブルとC8ケーブル）についてはP4塔側のケーブルのみを腐食させ、P3塔側ケーブルのケーブル腐食は省略した。

また、ケーブルの腐食については断面積の減少で再現し、50%腐食、75%腐食、100%腐食（破断時）の3パターンを用いた。なお、腐食の位置はすべてケーブルの主

塔側の一要素に対して行った。

地震応答解析で用いる地震動の種類については、「道路橋の耐震設計における動的解析に用いる加速度波形(H24年版対応)」(日本道路協会)¹⁴⁾のレベル2地震動のうち、タイプI地震動を想定してI-I-1の波形、タイプII地震動を想定してII-I-1の波形の2パターンを使用した。

地震動の方向については、橋軸方向(x方向)と橋軸直角方向(y方向)の2パターンを用いた。

以上のパターンの組み合わせで様々な解析パターンを作成することで、耐震性能について、腐食ケーブルによる比較、腐食量による比較、地震動の種類、方向による比較の3種類の比較を行った。

ここで、本研究における耐震性能を保有する状態とは、地震動を与えた際に、橋梁の部材の応力、ひずみ、変位などの各パラメータが設計基準において許容される範囲であることをいう。

3 地震応答解析結果

(1) 腐食量による比較

ケーブルの腐食量の大小により、健全時と比較し耐震性能にどのような違いが発生するかを検討した。想定した腐食量のケースは以下の3ケースである。

- ・50%腐食
- ・75%腐食
- ・100%腐食

なお、腐食ケーブルはC5ケーブル、地震動については橋軸方向にタイプI地震動を入力した。

死荷重、プレストレスを載荷した状態のケーブル応力を図-8に示す。50%腐食のモデルのC5ケーブルは降伏しておらず、75%腐食したモデルのC5ケーブルは第二降伏点を迎えていることがわかる。100%腐食しているケースではP3塔の上段ケーブルおよびC4塔の下段ケーブルの応力が上昇していることがわかる。

続いて地震応答解析を行った際の最大ケーブル応力を図-9に示す。地震動により最大応力は増加しているが、

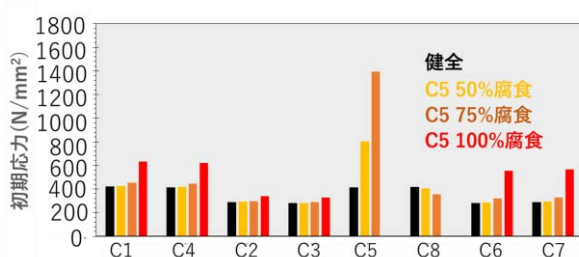


図-8 自重解析後ケーブル応力(腐食量比較)

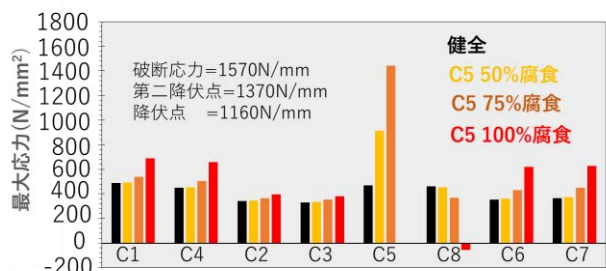


図-9 動的解析時ケーブル応力(腐食量比較)

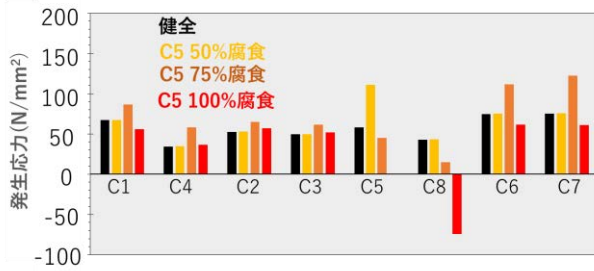


図-10 ケーブル発生応力(腐食量比較)

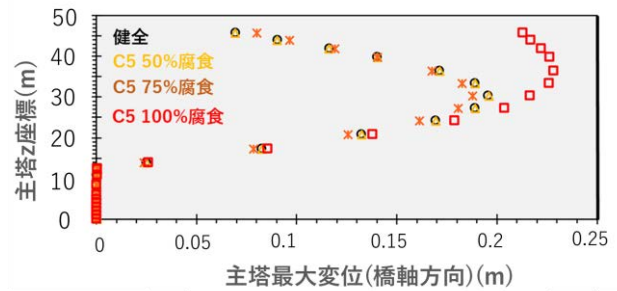


図-11 主塔最大変位(腐食量比較)

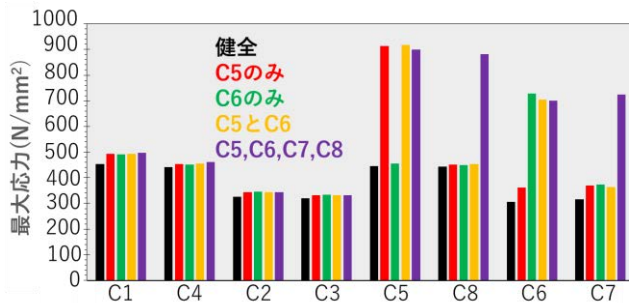


図-12 ケーブル最大応力(ケーブル比較)

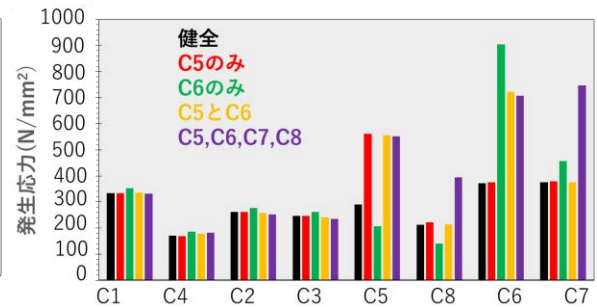


図-13 ケーブル発生応力(ケーブル比較)

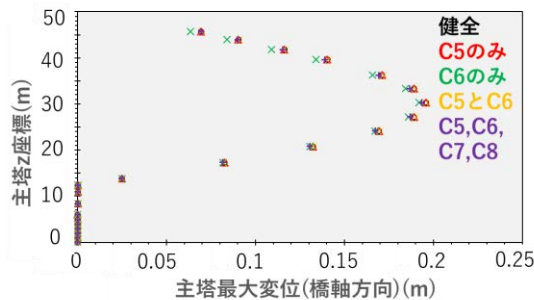


図-14 主塔最大変位 (ケーブル比較)

50%腐食時は降伏しておらず、75%腐食時は第二降伏点を迎えているという結果となった。

地震動による発生応力について図-10 に示す。50%腐食の時は健全時と比較して応力増加量に変化はなかったが、75%腐食時は、C5ケーブルの応力が減少している一方でその他のケーブルに発生する応力が増大していることがわかる。

主塔の最大変位を見たものが図-11 である。主塔の変位については、50%では健全時と大きい変化がなく、75%では変位が減少していることがわかる。100%腐食時は変位が増大していることがわかる。

(2) 腐食ケーブルによる比較

腐食したケーブルの本数や位置により、健全時と比較し耐震性能にどのような違いが発生するかを検討した。想定したケースは、以下の4ケースである。

- ・C5ケーブル腐食
- ・C6ケーブル腐食
- ・C5およびC6ケーブル腐食

・C5、C6、C7およびC8ケーブル腐食

なお、腐食量は50%であり、地震動についてはすべて橋軸方向にタイプI地震動を入力した。

動的解析によるケーブル最大応力を図-12に示す。4ケーブルが50%腐食している状態においても降伏しているケーブルはなかった。

地震動により発生するケーブル応力を図-13 に示す。C6ケーブルのみ腐食時に着目すると、上段ケーブルの応力が減少し、対応するC7ケーブルにおいては増加していることがわかる。

主塔の最大変位においては、1つのケーブル腐食時から4つのケーブル腐食時まで健全状態と特に大きな違いはなかった。

(3) 地震動の方向、種類による比較

地震動の種類によって健全時と比較し耐震性能にどのような違いが発生するかを検討した。想定したケースは、以下の4ケースである。

- ・橋軸方向… I - I - 1

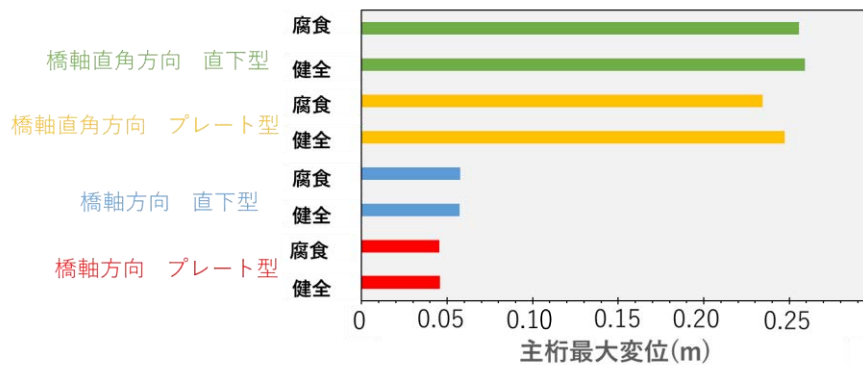


図-15 主桁最大変位 (地震動比較)

- ・ 橋軸方向…Ⅱ-I-1
- ・ 橋軸直角方向…Ⅰ-I-1
- ・ 橋軸直角方向…Ⅱ-I-1

なお、腐食ケーブルは C5 ケーブル、腐食量は 50% で入力した。

各地震動における腐食前後での主桁中央部の変位を図-15 に示す。腐食前後で大きな差は見られなかったが、地震動の方向による違いに着目すると、橋軸直角方向の地震動による変位が橋軸方向の地震動による変位と比べて大きいことがわかった。

(1)~(3)までの解析で腐食前後で耐震性能が大きく変化しないことがわかった。この理由の一つとして、この橋梁の場合、主塔と橋脚がピン支持で固定されており、主塔に応力が発生しにくかったことがあげられる。

4. 結論および今後の課題

本研究では、ケーブルが腐食した斜張橋の耐震性能を FEM 解析によって検討した。以下に本研究で得られた知見を示す。

- 1) 地震時にケーブルが降伏しない程度の腐食 (本研究においては、50%腐食) を有するケーブルが1本から4本ある状態での耐震性能は健全時の耐震性能から大きく変化しない。
- 2) 通常時および地震時にケーブルが降伏する程度の腐食 (本研究においては、75%以上の腐食) を有するケーブルがある状態では、地震時の他のケーブルが受け持つ応力の上昇や、主塔の変位の減少などの違いがみられる。

今後の課題として以下のようなことがあげられる。

- 1) 漸増動的解析 (IDA) をし、各部材の破損順序を明確にする。
- 2) ピン支持の回転を固定し、支承が腐食により動きにくくなった状況を再現し解析を行う。

REFERENCES

- 1) 藪野真史, 山本裕一, 川端諭, 得地智信, 井谷達哉: 「Binh 橋」 (ベトナムの合成桁斜張橋) の補修工事報告, IHI 技報, Vol.53 No.1, 2013. [Yabuno, S., Yamamoto, Y., Kawabata, S., Tokachi, T. and Iya, T.: Report on rehabilitation project of the "binh bridge" in vietnam, *IHI Technical Journal*, Vol.53 No.1, 2013.]
- 2) 西海大橋ケーブル切断事故 天板の支持力弱体で交通規制長期化, <http://japan.hani.co.kr/arti/politics/22699.html>. [Saikai Bridge cable cutting accident: Traffic restrictions prolonged due to weak support of the top plate, <http://japan.hani.co.kr/arti/politics/22699.html>.]
- 3) 南方澳大橋の崩落、腐食が原因か, <https://www.ys-consulting.com.tw/news/86098.html>. [Collapse of Nanfangao Bridge, possibly due to corrosion, <https://www.ys-consulting.com.tw/news/86098.html>]
- 4) 吊橋の主ケーブル一部破断時の対応事例, 土木技術資料 56-3, 2014. [example of response to partial rupture of main cable of a suspension bridge, *Civil Engineering Technical Information*, 56-3, 2014.]
- 5) 関西道路研究会・道路橋調査研究委員会: 斜張橋ケーブルの耐久性評価と今後の維持管理に関する研究小委員会報告書, 2018. [Kansai Road Research Association, Road Bridge Research Committee: report of the research subcommittee on durability evaluation and future maintenance of cable-stayed bridge cables, 2018.]
- 6) 神田隆仁, 船木孝仁, 高橋昌平, 高野優, 越前谷宏昭: 雪沢大橋ケーブル破断への対応と今後の維持管理について, <http://www.thr.mlit.go.jp/Bumon/B00097/K00360/hap-pyoukai/H26/5-8.pdf>. [Kanda, T., Funaki, T., Takahashi, S., Takano, Y. and Echizenya, H.: response to the yukisawa bridge cable break and future maintenance management, <http://www.thr.mlit.go.jp/Bumon/B00097/K00360/hap-pyoukai/H26/5-8.pdf>]
- 7) 野中哲也, 宇佐美勉, 岩村真樹, 廣住敦士, 吉野廣一: 連鎖的な部材破壊を考慮した鋼橋のリダンダンシー解析法の提案, 構造工学論文集, Vol.56A, 2010. [Nonaka, T., Usami, T., Iwamura, M., Hirozumi, A. and Yoshino, H.: A proposal for a redundancy analysis of steel bridges including progressive member failures, *Journal of Structural Engineering*, Vol.56A, 2010.]
- 8) 馬越一也, 小室雅人, 山沢哲也, 由井幸司, 見原理

- 一, 野中哲也, 吉岡勉, 奥井義昭: トラス橋のケーススタディ (非線形解析) —鋼トラス橋を対象とした連鎖崩壊型動的リダンダンシー解析—, 鋼構造物と橋に関するシンポジウム論文報告集, pp.39-49, 2014. [Magoshi,K., Komuro,M., Yamasawa,T., Yui,K., Mihara,R., Nonaka,T., Yoshioka,T., and Okui,Y.: Dynamic redundancy analysis for a steel truss bridge, *Proceedings of the Symposium on Steel Structures and Bridges*, pp.39-49, 2014.]
- 9) 永谷秀樹, 明石直光, 松田岳憲, 安田昌宏, 石井博典, 宮森雅之, 小幡泰弘, 平山博, 奥井義昭: 我国の鋼トラス橋を対象としたリダンダンシー解析の検討, 土木学会論文集, Vol65, No.2, pp.410-425, 2009. [Nagaya,H., Akashi,N., Matsuda,T., Yasuda,M., Ishii, H., Miyamori, M., Kohata,Y., Hirayama,H.and Ooi,Y.: Redundancy analysis of steel truss bridges in japan analysis for steel truss bridges in japan, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol65, No.2, pp.410-425, 2009.]
- 10) 岩崎英治: 線形解析によるトラス橋のリダンダンシー評価に関するケーススタディ, 鋼構造物と橋に関するシンポジウム論文報告集, pp.21-32, 2014 [Iwasaki,E.: Case Study of structural redundancy evaluation using method of linear analysis for steel truss bridges, *Proceedings of the Symposium on Steel Structures and Bridges* pp.21-32, 2014.]
- 11) 橋本国太郎, 林 宏行, 川辺 直人, 渡邊 裕規, 清水 晋作: ケーブルが腐食損傷した少数ケーブル鋼斜張橋の残存性能に関する解析的研究, 鋼構造論文集, Vol. 28, No. 109, pp. 103-115, 2021. [Hashimoto,K., Hayashi,H., Kawabe,N., Watanabe,H. and Shimizu,S.: Analytical study on remaining performance of corrosion damaged cable-stayed steel bridge with a few cables, *Journal of Steel Construction*, Vol. 28, No. 109, pp. 103-115, 2021.]
- 12) 中村俊一, 青木由香利: ケーブル腐食を考慮した斜張橋の終局強度および疲労寿命, 構造工学論文集, Vol. 67A, p. 1-13, 2021. [Nakamura,S.and Aoki,Y.: Ultimate strength and fatigue life of cable-stayed bridges considering cable corrosion, *Journal of Steel Construction*, Vol. 67A, p. 1-13, 2021.]
- 13) 野中哲也, 吉野廣一: パソコンで解く ファイバーモデルによる弾塑性有限変位解析, 丸善, 2010. [Honma, S. and Aki, K.: *Elastic-plastic finite displacement analysis using fiber models solved on a PC*, Maruzen, 2010.]
- 14) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, 2017. [Japan Road Association, Download Technical Documents : Road Bridge Specifications and Commentary, V Seismic Design Edition, 2017.]

ANALYTICAL STUDY ON SEISMIC PERFORMANCE OF CABLE-STAYED BRIDGES WITH CORRODED CABLES

Shuta ISHIHARA, Kunitaro HASHIMOTO

Since the I-35W bridge collapse in the U.S., research has been conducted on steel truss bridges to evaluate the residual load carrying capacity and redundancy of bridges under the assumption of corrosion, and research has also been conducted on cable-stayed bridges with corroded cables to examine the residual load carrying capacity of such bridges. However, few studies have been conducted on the seismic performance of cable-stayed bridges with corroded cables. In this study, a cable-stayed bridge was reproduced using a FEM model, dead loads and prestresses were introduced, corroded cable members were subjected to corrosion, and seismic response analysis was conducted. In this analysis, corrosion was reproduced by reducing the cross section of cables in a sound state, and the changes in the load sharing of each member of the bridge and the stresses generated in the girders and cables were checked to see if there were any changes in seismic behavior due to corrosion.