

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01415

研究課題名(和文) Load Ratingによる既設橋の維持管理手法の開発

研究課題名(英文) Development of an existing bridge management method based on load rating

研究代表者

奥井 義昭 (Okui, Yoshiaki)

埼玉大学・理工学研究科・教授

研究者番号：40214051

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではLoad rating手法を用いた既設橋の維持管理のための耐荷力評価手法を検討した。主な研究成果は以下の通り。

(1)桁橋とトラス橋のLoad ratingのケース・スタディの作成，(2)トラス橋の部材と格点部の損傷による強度低下を考慮するための状態係数の提案，(3)システムリダンダンシーの評価方法とシステム係数の提案，(4)桁橋，トラス橋を対象としたシステムリダンダンシー評価のケース・スタディ，(5)実態交通荷重に基づく活荷重係数の検討，(6)定期点検を前提とした既設橋のLoad rating用の活荷重係数の検討，(7)既設橋の安全性レベルの評価と最低限必要な安全余裕度の検討

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究成果の学術的意義として，(1)システム係数の提案，(2)既設橋のLoad rating用の活荷重係数提案の2点が優れている。(1)ではリダンダンシーのメカニズムを解析結果を用いて示し，リダンダンシーを定量化するためにシステム係数を提案している。(2)はETCの車種データ+荷重計データなどから得られた実態交通荷重の情報を用いて，活荷重係数を極値統計学の手法を用いて推定している。そのため再現期間に応じた荷重レベル，標準偏差などの算定が可能で，安全余裕度の解析など今後の研究波及効果が大きい。社会的意義としては国内の約70万の既設橋梁の安全性をコストを抑えつつ担保することは重要である。

研究成果の概要(英文)：This study investigated a load rating method for existing bridges and aimed to establish a framework of the load rating method. To achieve this goal, the followings were implemented:

(1) Case studies on the load rating of girder and truss bridges, (2) Proposal of condition factors to consider strength reduction due to damage to the members in truss bridges, (3) Proposal of evaluation methods for system redundancy and system factors, (4) Case studies on system redundancy evaluation for girder and truss bridges, (5) Examination of live load factors based on actual traffic conditions, (6) Examination of live load factors for load rating of existing bridges assuming regular inspections, (7) Evaluation of safety indices of existing bridges and examination of minimum necessary safety margins.

研究分野：構造工学，橋梁工学，耐震工学

キーワード：橋梁維持管理 耐荷力評価 実態交通荷重 振動モニタリング リダンダンシー 活荷重係数 ロード・レイティング 信頼性指標

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

H26年の道路橋定期点検要領により5年に1回の近接目視点検と健全度評価が義務づけられた。しかし、主に近接目視によって判定された健全度で橋梁を判定して、耐荷性能と点検結果を関連づける手法・マニュアル・枠組みなどが、日本では確立されていない。外見上は健全に見える橋梁でも旧設計交通荷重で設計されている場合や、建設後に防音壁や床版、床組の補強によって自重が増加した場合など、現在の設計基準を満足していない、いわゆる既存不適格の状態になっている橋梁も多数存在する。図1は我国の橋梁の年間の建設数と設計交通荷重の推移を表したものであるが、旧設計交通荷重 T-20 で設計されている多数の橋梁が存在することがわかる。

一方、米国、カナダ、オーストラリア等の国々においては、橋梁の定期点検とそれに基づいて定期点検時に耐荷性能を評価することが義務付けられている。これらの耐荷性能の評価手法は Load rating と呼ばれ、新設橋梁の設計基準、既設橋の評価基準、橋梁点検のマニュアルが一体として運用されて橋梁の維持管理が行われている。

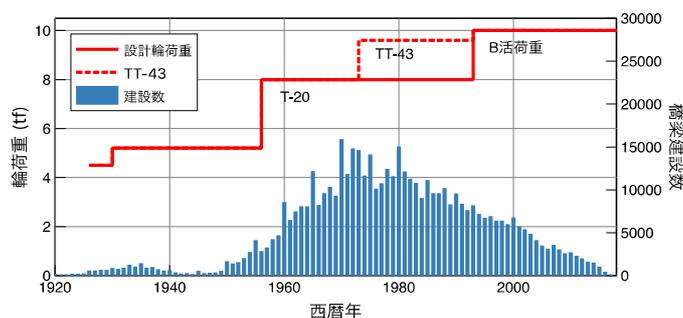


図1：橋梁の建設数と設計軸荷重の推移

2. 研究の目的

本研究では Load rating 手法を用いた既設橋の維持管理のための耐荷力評価手法を検討し、維持管理の枠組みの構築とマニュアル化を最終的な目的とした。ここで、Load rating とは既設橋の耐荷力を点検結果に基づき算定することを意味する。具体的には橋梁の耐荷性能を活荷重係数に対する倍率 (RF 値) で数値化して表す。RF 値の算定においては、点検結果に応じて損傷がある場合に耐荷力を減ずるための係数 (状態係数) や橋梁システムとしての耐荷性能と部材単体の耐荷性能の差を考慮するための係数 (システム係数)、定期点検を前提とし実体交通荷重を考慮した維持管理用の活荷重係数を定める必要がある。本研究ではこれらの検討を行い、最終的には橋梁評価マニュアル (仮題) をまとめることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では以下の項目の検討を行った。

- (1) 既設橋梁の Load rating のケーススタディ
- (2) システム・リダンダンシーの検討とシステム係数の提案
- (3) 実態交通荷重を考慮した既設橋の維持管理用活荷重係数の検討
- (4) 鋼トラス橋の部材腐食に対する損傷係数の検討

以下では上記の項目について研究方法を説明する。なお、研究の基本となる RF 値の算定式を式 (1) に示す。

$$RF = \frac{\phi_c \phi_s C - \gamma_d D}{\gamma_L (L + I)} \quad (1)$$

ここで、 C は部材耐力、 D と L は各々、死荷重効果と活荷重効果、 I は衝撃、 γ_d と γ_L は各々、死荷重係数と活荷重係数を表す。 ϕ_c と ϕ_s は各々状態係数とシステム係数を表す。

- (1) 既設橋梁の Load rating のケーススタディ

図2に示す8橋に対して Load rating を実施した。使用した部材耐力の評価式や荷重係数、設計活荷重は現行の道路橋示方書 (以下、「道示」という) を用いた。これらの橋梁は全て実在する橋梁で旧道路橋示方書 (許容応力度設計法) に基づき設計されたものである。また、対象橋梁は全て健全な状態であるので、状態係数は 1.0 とした。さらに、システム・リダンダンシーは考慮せずシステム係数も 1.0 と設定した。

- (2) システム・リダンダンシーの検討とシステム係数の提案

既設橋梁がどの程度のシステム・リダンダンシーを有しているのかを明らかにすることを目的

として、非線形 FEM 解析を実施した。さらに、システム・リダンダンシーの効果を数値化した指標として式(2)に示すシステム係数を提案した。

$$\phi_s = 1.0 + \frac{L + I}{C} (\lambda - \lambda^*) \quad (2)$$

ここで、 λ と λ^* は各々、非線形解析と線形解析結果より求めた終局時の活荷重係数を表す。

式(2)のシステム係数を計算するために 3 次元 FEM モデルを図 2 の A, B, N 橋について構築し、線形弾性と材料非線形解析を実施し、終局時の活荷重係数を求めた。

A bridge	B bridge	C bridge	D bridge	E bridge
鋼単純合成桁橋 L=34.4m 1等橋 (TL-20)	鋼単純合成桁橋 L=39.250m 1等橋 (TL-20)	PC単純合成桁橋 L=29.1m 1等橋 (TL-20)	鋼3径間連続非合成箱桁橋 L=46.65+65.05+49.71m 1等橋 (TL-20)	鋼3径間連続鋼床版箱桁橋 L=54.00+65.00+49.50m 1等橋 (TL-20)
N bridge	K bridge	O bridge	鋼橋 : コンクリート橋 斜角、曲線の影響が小さい(極力直線橋に近い) 橋梁をピックアップしている 斜角、平面線形、縦横断勾配はモデル化しない	
鋼3径間連続非合成桁橋 L=28.0+28.0+28.0m 1等橋 (TL-20)	鋼3径間連続非合成桁橋 L=60.0+60.0+60.0m 1等橋 (TL-20)	鋼単純合成桁橋 L=36.0m 1等橋 (TL-20)		

図 2 : ケーススタディの対象橋梁

(3) 実態交通荷重に基づく活荷重係数の検討

Load rating に用いる活荷重係数の検討を行った。道示では設計照査に用いる活荷重係数は 1.25 と定められている。したがって、道示を遵守するのであれば、既設橋に対しても、この活荷重係数に対して安全性を照査しなければならない。しかし、多くの場合、実態の交通荷重は(活荷重係数) × (設計活荷重) より小さいことが知られている。そこで、いずれも高速道路上の T 地点 (ETC と輪荷重計が連続して設置) と M 地点 (Weigh in Motion が設置) 2 地点のシステムより得られた交通荷重データを用いて、交通荷重シミュレーションを実施した。得られた車両種別毎の車両質量の確率密度関数からモンテカルロシミュレーションを行い図 2 の A, B, N 橋に関して年最大活荷重曲げモーメントを算定した。それから一般極値分布もしくは一般パレート分布への最尤推定を行い、活荷重係数の極値分布の同定を行った。

(4) 鋼トラス橋の部材腐食に対する損傷係数の検討

鋼トラス橋を対象に Load rating のケーススタディと状態係数の検討を行った。対象の橋梁は 3 径間連続上路鋼トラス橋で竣工年は 1985 年であるが 2016 年に耐震補強と塗装の塗替えなどを実施している。腐食等による耐力低下はない健全な状態であるため状態係数は 1.0 として RF 値を算定した。また、当初の設計荷重は TL-20 と TT-43 荷重である。

Load rating のケーススタディに加えて 3 次元の FEM のモデルを作成し、システム・リダンダンシーの評価を行った。システム係数の定義は桁橋の場合と同じで式(2)を用いた。弦材以外に床組と床版を考慮してモデル化し、非線形解析では鋼材およびコンクリートの材料非線形性を考慮した。

さらに、弦材などの無補剛箱形断面の腐食による状態係数の検討と格点部の Load rating と状態係数の検討を行った。

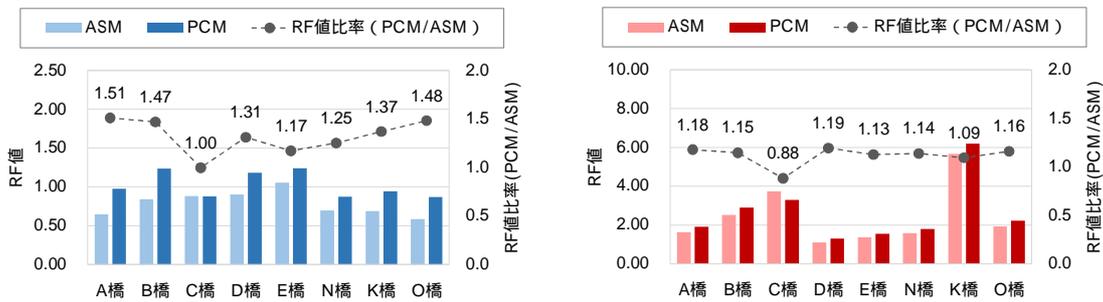
4. 研究成果

(1) 既設橋梁の Load rating のケーススタディ

Load rating を実施し、RF 値を求めた結果を図 3 に示す。(a)図が支間中央の下フランジの曲げに関する照査、(b)が端支点ウェブのせん断に関する照査結果を示す。同図において凡例 ASM は建設時の設計基準である許容応力度設計法による RF 値で PCM は H29 道路橋示方書の部分係数設計法で RF 値を算出した結果を示す。また、どちらも活荷重としては B 活荷重を用いた。

図(a)と(b)の比較から、桁橋においてはせん断より曲げの方が耐荷性能として厳しい状況にあることがわかる。さらに、旧道示と現行の H29 道示では、H29 道示の RF 値の方が大きい。これは H29 道示では旧道示に比べて全体としての安全率が低減されたことによる。N, K, O 橋は曲げ耐力の RF 値が 1.0 を下回り、H29 道示を満足しない。この原因は、この時代の橋梁では多々あることであるが、コンピュータを用いた格子解析が用いられておらず、この 3 橋の断面力の算定

は近似解法の Guyon-Massonet の方法を用いて断面力を算出していることに起因するものと思われる。



(a) 下フランジの曲げ応力照査 (b) 端支点ウェブのせん断応力照査
 図3: RF値の計算結果 (B活荷重, ASM:旧道示, PCM:H29道示)

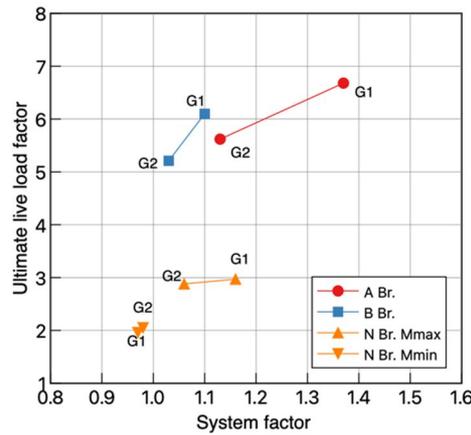


図3: システム係数と終局時の活荷重係数

(2) システム・リダンダンシーの検討とシステム係数の提案

図3にA, B, N橋のシステム係数と非線形解析より求めた終局時の活荷重係数を示す。図中のG1は外桁, G2は中桁の結果を示す。5本主桁A橋G1桁ではシステム係数1.3以上, 最も主桁本数の少ない3本主桁のB橋で1.1程度になり, 主桁係数が多いほどシステム係数を大きくなり, システム・リダンダンシーの効果が大きい。連続桁のN橋では正曲げ部(凡例 Mmax)よりも低い活荷重係数で負曲げ部(凡例 Mmin)で終局状態に達し, システム係数を1.0程度で, システム・リダンダンシーの効果は期待できないことが分かった。

(3) 実態交通荷重に基づく活荷重係数の検討

シミュレーション結果を用いて一般極値分布の最尤推定を行った結果を図4に示す。同図において赤がシミュレーション結果, 黒線が一般極値分布の平均値, 青線が95%信頼区間を示す。新設設計時においては供用期間100年に対して非超過確率5%相当の活荷重係数1.25で設計が行われている。一方, 既設橋に関しては次回の定期点検の2倍(10年)の期間に対し非超過確率5%の安全性を担保する活荷重係数として200年再現レベルの95%信頼区間の上限値を既設橋の維持管理用の活荷重係数として提案した。その結果, M地点(大型車混入率33%)で単純桁のB橋で活荷重係数1.06, 連続桁のN橋で1.01が得られた。橋梁建設地点の実態交通と定期点検を前提とした維持管理用の安全性保証期間を設定することにより, 維持管理用の活荷重係数を低減できる可能性を示した。

(4) 鋼トラス橋の部材腐食に対する損傷係数の検討

弦材と斜材のRF値は最低でも3.5が確保されていて十分安全であるが鉛直材のRF値が1.0を下回っている。これはTT-43の総重量の断面力に対する効果は, B活荷重とほぼ同程度であるが, 軸重の集中荷重はB活荷重に比べて小さいためと考えられる。

格点部のLoad ratingは図5に示す(1)から(7)の項目に関して照査を行った。この中でRF値の最小値1.19は照査項目(5)についての結果で, その時のRF値の分布を図6に示す。さらに, 各照査項目において最小のRF値をもつ格点に関して, 減肉によってRF値がどのように変化するかを検討した。減肉によって最初にRF値が1.0を下回るのは照査項目(5)の斜材の降伏または引

張破断であり，次に照査項目 のガセットプレートのせん断である．照査項目(5)(7)共に約 12%の板厚減少で RF 値 1.0 を下回ることが分かった．このような情報を補修の要否の判断において利用できる可能性を示した．

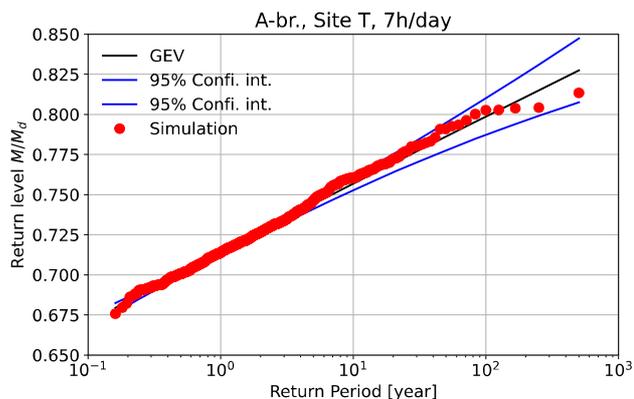


図 4：活荷重係数のリターンレベルと再現期間の関係（A 橋，T 地点）

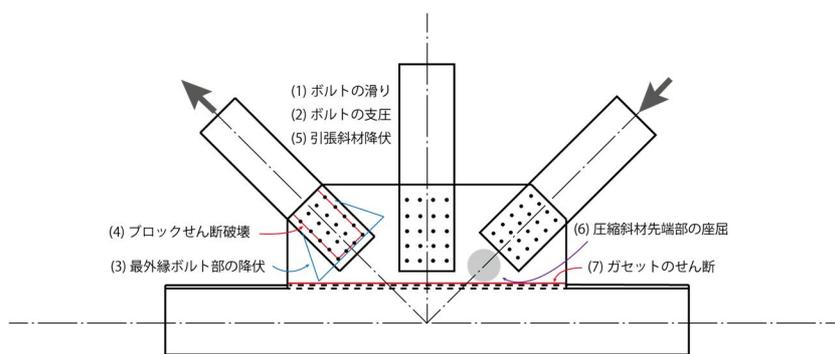


図 5：格点部の Load rating の照査項目

⑤斜材等の降伏または破断

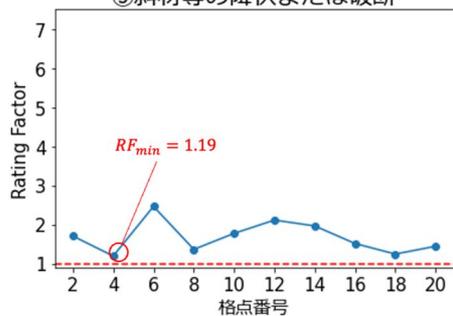


図 6：引張斜材の降伏もしくは破断に関する RF 値

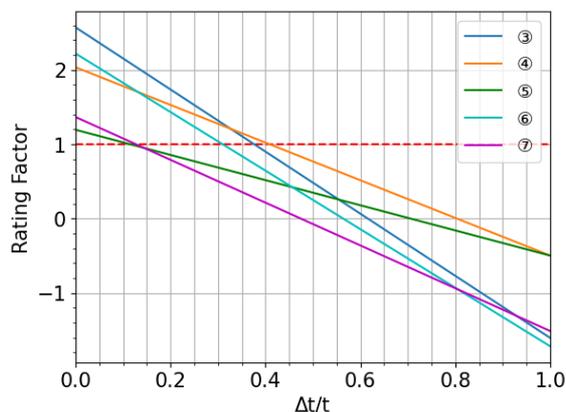


図 7：損傷による減肉量と RF 値の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Okui Yoshiaki, Denda Makoto, Kumaki Kazuki, Sakuma Satoshi	4. 巻 6
2. 論文標題 System redundancy of steel I girder bridges and proposal of a system factor for load rating	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ce/papers	6. 最初と最後の頁 964 ~ 969
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cepa.2276	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Lin Siyu, Tang Fujian, Dang Ji, Li Xingrun	4. 巻 79
2. 論文標題 Automatic detection of steel rebar corrosion based on machine learning and light spectrum of fiber optic corrosion sensors	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Optical Fiber Technology	6. 最初と最後の頁 103379 ~ 103379
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.yofte.2023.103379	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yamane Tatsuro, Chun Pang jo, Dang Ji, Honda Riki	4. 巻 38
2. 論文標題 Recording of bridge damage areas by 3D integration of multiple images and reduction of the variability in detected results	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering	6. 最初と最後の頁 2391 ~ 2407
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/mice.12971	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Dat Tran Tien, Matsumoto Yasunao, Dang Ji	4. 巻 2
2. 論文標題 A Preliminary Study on Physics-Informed Machine Learning-Based Structure Health Monitoring for Beam Structures	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures	6. 最初と最後の頁 490 ~ 499
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-031-39117-0_50	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Gohar, S., Matsumoto, Y., Maki, T., Sakuma, S.	4. 巻 13
2. 論文標題 Investigation into vibration-based structural damage identification and amplitude-dependent damping ratio of reinforced concrete bridge deck slab under different loading states	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Civil Structural Health Monitoring	6. 最初と最後の頁 133-148
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s13349-022-00625-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 笠松 徹、奥井 義昭、木村 正志、狩野 亮太、佐久間 智、時田 英夫	4. 巻 69A
2. 論文標題 既設橋評価のための実態交通荷重を考慮した活荷重係数に関する研究	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 構造工学論文集 A	6. 最初と最後の頁 58 ~ 68
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/structcivil.69A.58	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 奥井 義昭、傳田 諒、熊木 和輝、佐久間 智	4. 巻 68A
2. 論文標題 鋼橋のシステムリダンダンシーの評価方法とLoad ratingにおけるシステム係数の提案	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/structcivil.68A.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 笠松 徹、奥井 義昭、石橋 正博、山川 創	4. 巻 77
2. 論文標題 Load Ratingを用いた既設橋梁の耐荷性能評価に関する一検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集A1 (構造・地震工学)	6. 最初と最後の頁 418-426
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejsee.77.3_418	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 奥井 義昭, 熊木 和輝, 佐久間 智
2. 発表標題 非合成連続鈹桁橋のシステムリダンダンシーと既設橋の耐荷力評価のためのシステム係数の検討
3. 学会等名 土木学会全国大会年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Gohar, S., Matsumoto, Y., Sakuma, S.
2. 発表標題 Damage investigation through dynamic characteristics of existing bridge deck panels
3. 学会等名 IABSE (International Association of Bridge and Structural Engineering) Symposium Prague 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 奥井義昭
2. 発表標題 合理化研究部会報告－設計合理化と維持管理に向けたLoad Ratingの試み－
3. 学会等名 第25回土木鋼構造研究シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	党 紀 (Dang Ji) (60623535)	埼玉大学・理工学研究科・准教授 (12401)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	松本 泰尚 (Matsumoto Yasunao) (90322023)	埼玉大学・理工学研究科・教授 (12401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関