

令和 6 年 4 月 8 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04611

研究課題名（和文）外部環境別経年劣化予測および累積的損傷評価に基づく予防保全型耐震性評価手法の構築

研究課題名（英文）Preventive maintenance management based on seismic performance evaluations with deterioration prediction and cumulative damage assessment.

研究代表者

木村 至伸（Kimura, Yukinobu）

鹿児島大学・理工学域工学系・准教授

研究者番号：10363607

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、橋梁の点検結果に基づきマルコフ連鎖を用いた劣化進行モデルの推定、ならびに、劣化進行モデルによって鉄筋腐食による剛性低下を評価し、経年劣化が構造物の耐震性能評価に及ぼす影響について取り組んだ。さらに、不確定性の影響を考慮した剛性低下を用いた構造物の損傷評価を行うことで、耐震性を考慮した予防保全型の維持管理シナリオの提案を行った。加えて、余震活動による累積的な損傷が予防保全型の耐震性能評価に及ぼす影響を明らかにし、一連の地震活動を考慮した予防保全型耐震性評価手法を提案した。これら結果は、対象とする地震動の震動特性に依存することから模擬地震動の作成法についても言及した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高度経済成長期に建設された構造物の多くを長期にわたって安全な状態で供用するためには、定期的な点検や適切な時期に修繕を行うことで長寿命化を促す必要がある。さらに、地震大国であるわが国では、耐震性を考慮した維持管理水準を検討する必要がある。そのため、耐震性に着目した予防保全型維持管理手法を検討する際には、経年に伴う剛性低下による耐震性能評価を明確にしておく必要がある。よって、本研究課題の手法により、構造物の経年に伴う剛性低下の推定と余震も含めた一連の地震活動に対する損傷予測が可能となり、耐震性に着目した予防保全型の維持管理に役立つことができる。

研究成果の概要（英文）：In this research, a deterioration prediction model was estimated by using the Markov chain model based on the results of bridge inspections. In addition, stiffness degradation due to rebar corrosion was evaluated with a deterioration prediction model, and the effect of deterioration on the seismic performance evaluation was discussed. In addition, by assessing the damage to the structure using stiffness degradation considering the effects of uncertainty, a scenario of preventive maintenance management focusing on seismic performance evaluations was proposed. In addition, the effect of cumulative damage caused by aftershocks on the seismic performance evaluation of the preventive maintenance management was clarified. Since these results depend on the seismic characteristics of the ground motion, a method for creating simulated ground motions was also discussed.

研究分野：構造工学

キーワード：鉄筋腐食 劣化進行モデル 剛性低下 維持管理 損傷評価 耐震性能

1. 研究開始当初の背景

近年、我が国の高度経済成長期に集中的に整備された社会基盤の老朽化問題が顕在化している。今後、建設後50年以上供用している社会基盤の割合は急増することが予想されており、損傷リスクが増大する前に予防保全型の戦略的な維持管理手法を検討しておくことが重要となる。予防保全型の維持管理は「点検、健全度評価、劣化予測、補修補強」の4フェーズから構成されており、社会基盤を定期的に点検し損傷リスクが顕在化する前に対策を講じることによって長寿命化を図ることになる。つまり、社会基盤の状態を把握し予防的な対策などを戦略的に推進するため、確度の高い健全度評価や劣化予測が必要となり、これを基に長寿命化修繕計画を策定・見直しを継続することが求められる。この定期点検に基づく評価では部位・部材毎や点検調査単位(例えば橋梁毎)の健全性の診断や耐荷性についての診断が中心であり、これらの診断(損傷評価)結果が構造物の耐震性に及ぼす影響については議論されていない。地震大国である我が国においては、これらの診断(損傷評価)結果に基づいた耐震性能を検討しておくことが予防保全型の維持管理には重要であると考えられる。

一方、我が国の耐震基準は、庫県南部地震の甚大な被災経験から耐震設計法の見直しが行われ、現在では性能照査型の設計体系に基づいた検討が行われている。その一つとして、部材のエネルギー吸収性能を高めることにより構造物全体系の性能を高める損傷制御設計法がある。部材の変形性能や損傷評価に基づいた必要強度スペクトルが提案されているが、本震(設計地震動)のみに着目した検討である。2016年に発生した熊本地震では、波状的に作用する地震動によって土木構造物の損傷が拡大したとの報告事例により、本震のみに着目した検討事例の脆弱性を露呈したと考えられる。このように、これまで検討事例の少ない前・余震が経年劣化した構造物の損傷評価に及ぼす影響を明確にすることで、長寿命化・長期供用を目的とした予防保全型の管理手法に資する耐震性能評価が検討できると考える。

2. 研究の目的

現行の本震に着目した耐震設計体系では、熊本地震のような波状的に作用する地震動に対しての累積的な損傷を評価することはできない。特に、老朽化した社会基盤を抱える我が国では、経年劣化した社会基盤の戦略的な維持管理および長寿命化を図るためにも、波状的に作用する地震力に対する耐震性能を評価しておくことは重要な課題である。そこで本研究の目的は、経年劣化を考慮した社会基盤を対象に、本震のみならず波状的に作用する地震力に対しての累積的な損傷評価を行い、予防保全型耐震性能評価システムの構築を目指すものである。

3. 研究の方法

本研究課題では、1)外部環境別の剛性低下予測、2)キャパシティデザインに基づく累積的損傷評価、3)予防保全型耐震性能評価システム、の構築に取り組む。実橋梁データは、データ数が少ないため、年代ごとのデータ数に大きな差が生じており、実橋梁数のみでは劣化の推定は困難である。そのため、整理した実橋梁データを基に、マルコフ連鎖を用いて各劣化進行過程の遷移確率を算出し、劣化進行モデルの作成を行った。この劣化進行モデルを基に、各劣化進行過程での滞在年数を算出することで、剛性低下開始時期及び各劣化過程に対する供用年数を決定する。さらに、経年に伴う部材の剛性変化を推定するために、既往の研究¹⁾を参考に鉄筋腐食による剛性低下について検討を行った。この剛性低下を用いて非線形地震応答解析を行い、構造物の損傷を評価することで耐震性に着目した予防保全型耐震性能評価システムについて取り組んだ。

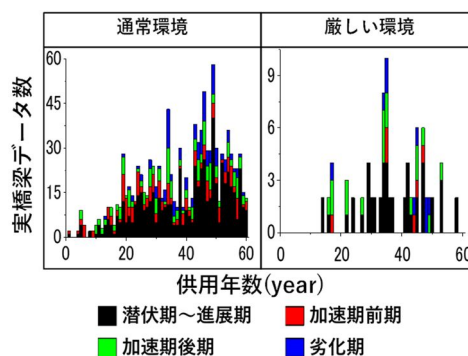


図-1 実橋梁データ

4. 研究成果

(1) 外部環境別の剛性低下予測について

劣化進行モデルの作成

実橋梁データは、データ数が少ないため、年代ごとのデータ数に大きな差が生じており、図-1のみでは劣化の推定は困難である。そのため、整理した実橋梁データを基に、マルコフ連鎖を用いて各劣化進行過程の遷移確率を算出し、劣化進行モデルの作成を行った。マルコフ連鎖とは、ある「状態」からある「遷移確率」で次の状態に遷移していく様子を確率的に捉える手法である。予測の際の初期条件として、すべて健全な

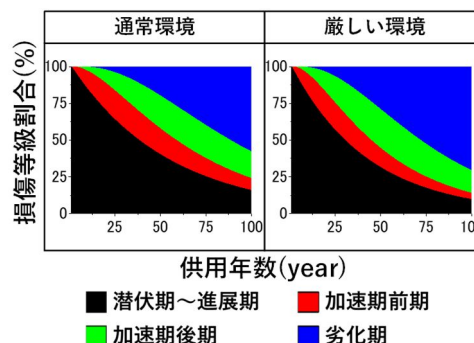


図-2 劣化進行モデル

状態、つまり劣化進行過程における潜伏期から進展期に属しているものとした。図-2 に両環境における劣化進行モデルを示す。この劣化進行モデルを基に、各劣化進行過程での滞在年数を算出することで、剛性低下開始時期及び各劣化過程に対する供用年数を決定する。

経年に伴う剛性低下の推定

既往の研究¹⁾を参考に鉄筋腐食による剛性低下の推定を行った。まず、式(1)より初期の鉄筋と腐食後の鉄筋の面積比を表した断面欠損係数 ξ と経年の関係を導出した。

$$\xi = A_s^* / A_s = ((D_s - 2v(t - T_1))^2 / (D_s)^2) \quad (1)$$

ここで、 D_s ：軸方向鉄筋径(mm)、 t ：経年(year)、 A_s ：鉄筋の断面積(mm²)、 A_s^* ： t 年後の鉄筋の断面積(mm²)、 v ：腐食速度(mm/year)、 T_1 ：剛性低下開始時期(year)である。腐食速度は各劣化過程で異なるため、既往の研究データ²⁾より算出し、加速期前半を 0.00474(mm/year)、加速期後半を 0.00879(mm/year)、劣化期を 0.01966(mm/year)とした。また各劣化過程の変化年数は劣化進行モデルより決定した年数を用いた。

次に、式(2)及び(3)より断面欠損係数 ξ と剛性比の関係の導出を行った。式(4)のように鉄筋腐食前後で曲げ耐力の比をとり、曲げ耐力比の低下率を剛性低下率とし、断面欠損係数 ξ と剛性比の関係の導出を行った。

$$M_u = bd^2 p f_y (1 - p f_y / 1.7 f_c) \quad (2)$$

$$M_u^* = bd^2 \xi p f_y (1 - \xi p f_y / 1.7 f_c) \quad (3)$$

$$M_u^* / M_u = k^* / k = ((1.7 f_c' - \xi p f_y) / (1.7 f_c' - p f_y)) \xi \quad (4)$$

ここで、 M_u ：RC 部材の曲げ耐力、 M_u^* ：RC 部材の鉄筋腐食後の曲げ耐力、 b 、 d 、 p ：長方形断面を考えた時の幅、有効高さ、鉄筋比($p = A_s / bd$)、 f_y ：鉄筋の引張降伏強度、 f_c' ：コンクリートの圧縮強度である。各値は既往の実験データ³⁾より $p = 0.0127$ 、 $f_y = 542 \text{ MPa}$ 、 $f_c' = 39.5 \text{ MPa}$ とした。図-3 に、断面欠損係数 ξ と経年および断面欠損係数 ξ と剛性比の関係を示す。この図より、経年に伴う剛性低下を推定することが可能となった。さらに、同環境内における剛性低下開始時期には不確実性があると予想される。そこで本研究では、その不確実性が変動係数 10% の正規分布に従うものと仮定し、モンテカルロシミュレーションを用いて評価を行った。ここでの試行回数は 1000 回である。図-4 に、剛性低下開始時期の不確実性を考慮した厳しい環境における経年と剛性比の関係を示す。この関係を用いて、構造物の損傷評価について検討を行う。

(2) 損傷制御設計に基づく累積的損傷評価について

本震のみに着目した検討

損傷評価に関しては、式(5)に示す Park らの損傷指標 D を用いた。

$$D = (x_{max} / x_u) + (\beta / Q_y x_u) \int dE \quad (5)$$

ここで、 x_{max} ：最大変位、 x_u ：終局変位で降伏変位の 7 倍、 Q_y ：降伏耐力、 $\int dE$ ：履歴吸収エネルギー、 β ：部材の断面特性等に依存した正の係数である。表-1 は Park らの損傷指標と損傷程度の関係を示したものである。本研究では、Tri-linear 型の復元力特性を有する 1 自由度振動系を用いて検討を行った。減衰定数は 5%、初期固有周期を 0.5(sec) である。降伏変位は、耐震性能 II に対応する目標塑性率 $\mu = 2.0$ を満足するように設定した。図-5 に、入力地震動としてレベル 2 地震動タイプ II 地震動 (II 種地盤用) を対象に、目標塑性率を 2.0 とした場合の厳しい環境における経年と損傷指標の関係を示す。この図より、目標塑性率を 2.0 とした場合の損傷指標は $D = 0.377$ となり、表-1 より中程度の損傷を許容することになる。また、経年に伴い損傷指標が増大していること、剛性低下開始時期が有する不確実性の影響が増大していることがわかる。

余震の影響を考慮した検討

本研究課題では、本震発生後に同様の震動特性を有する余震が一波発生するものとして模擬地震動を作成した。なお、余震の最大加速度は、福島距離減衰式⁴⁾より、震源距離に応じた値を用いている。図-6 に $M_j = 6.0$ とした場合の震源距離と最大加速度の関係を示す。一例として兵

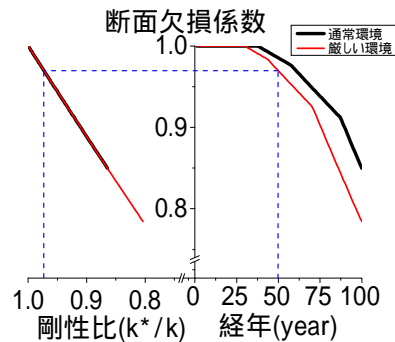


図-3 断面欠損係数と剛性比及び経年の関係

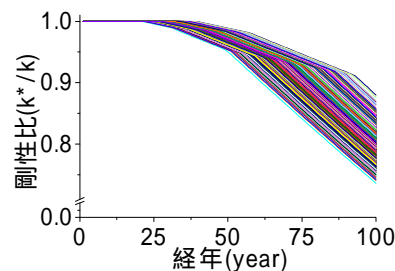


図-4 不確実性を考慮した剛性低下 (厳しい環境)

表-1 損傷指標と損傷程度の関係

損傷指標D	損傷の程度
0 ~ 0.1	わずかな損傷
0.1 ~ 0.2	軽微な損傷
0.2 ~ 0.4	中程度の損傷
0.4 ~ 1.0	大被害
1.0 ~	崩壊

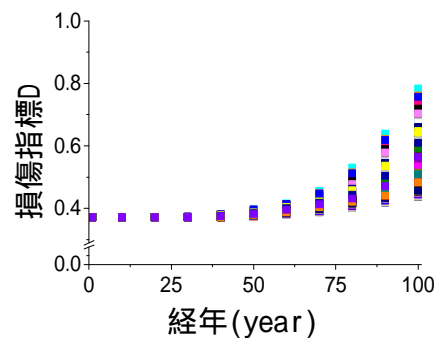


図-5 損傷指標 (厳しい環境)

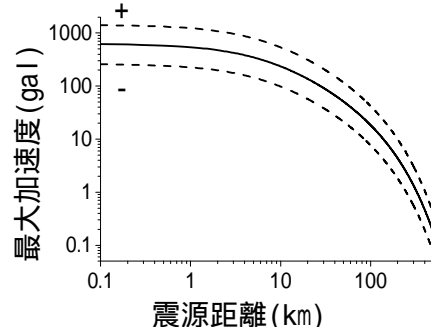


図-6 距離減衰式 ($M_j = 6.0$)

庫県南部地震時にⅡ種地盤で観測された地震動波形を基にしたⅡ-II-1波形を本震とし、震源距離10km地点で余震が発生したと仮定した場合の最大加速度を反映させた模擬地震動を図-7に示す。この模擬地震動を用いて損傷評価を行った。図-8に、経年に伴う剛性低下を考慮した構造物に余震の影響を加味した模擬地震動を作用させた時の損傷評価を経年ごとに示す。図より、経年に伴い損傷指標Dのばらつきが拡大しており、100年経過時の損傷評価は最大でD=0.82であることが分かる。図-5に示した本震のみの評価と比較すると、100年経過してからの本震作用時の橋脚の損傷指標がD=0.44~0.78であるのに対し、余震の影響を考慮するとD=0.45~0.82となり、余震活動が伴うことで損傷が拡大することが示唆された。これらの結果を基に、耐震性を考慮した予防保全型の維持管理シナリオについて検討する。

(3) 予防保全型耐震性能評価について

損傷指標の超過確率

耐震性を考慮した予防保全型の維持管理シナリオにおける橋梁修繕時期についての検討を行うために、剛性低下開始時期の不確定性を考慮した損傷指標の結果を基に超過確率を算出する。ここでは、許容する損傷程度が中程度であるため、表-1に示した損傷の程度が「中程度」から「大被害」に変わる値D=0.4に対する超過確率を算出した。図-9に、D=0.4に対する超過確率を示す。一例として、超過確率25%に着目すると通常環境で58年、厳しい環境で48年という結果を得ることができる。図-10は、余震の震源距離に着目した経年による超過確率を、本震と比較して示している。図より、超過確率50%に達する年数について比較すると、本震のみの場合は65年であるのに対し、震源距離10kmにおいて余震が発生することを考えた場合は60年経過した時点で修繕を検討する必要があると判断できる。このように、任意地点で余震が発生した場合の構造物の損傷拡大を推定し、想定する余震の震源距離に応じた超過確率の推移を確認することで、余震による影響を考慮した予防保全型の維持管理シナリオを計画することが可能であることを示した。

予防保全型の維持管理シナリオ

導出した経年と超過確率の関係から、耐震性を考慮した橋梁修繕時期の推定が可能となった。これを基に、予防保全型の維持管理シナリオの推定を行う。また、余震が維持管理シナリオに及ぼす影響についても検討を加えた。

表-2に震源距離10km以上離れた位置で余震が加わった場合の各超過確率を満足する年数についてまとめたものを示す。なお、表に示す0%の項目は超過確率が增大し始めた年数を示す。表より、超過確率50%に着目して本震のみの場合と震源距離10km地点で余震が発生した場合を比較すると、Ⅰ種地盤は5年、Ⅱ種地盤は10年、Ⅲ種地盤は16年修繕時期を早める必要があることが示唆されている。この結果より、Ⅲ種地盤が最も余震の影響で超過確率が早期の段階で増大しやすい傾向にあることが分かる。また、超過確率が増大し始めてから100%に達するまでの年数について比較していくと、本震のみを想定した場合は、Ⅰ種地盤およびⅡ種地盤は30年、Ⅲ種地盤は35年間のうちに超過確率が100%まで増大していくのに対し、震源距離10km地点で余震が加わることを想定すると、Ⅰ種地盤およびⅢ種地盤は30年、Ⅱ種地盤は25年間のうちに100%まで上昇することから、超過確率が増大し始めてから耐震性能2の限界状態に至るまでの期間はⅡ種地盤が最も短いことが示唆された。このように、対象とする超過確率に対する期間を評価しておくことで、耐震性に着目した維持管理のシナリオを策定することが可能となる。

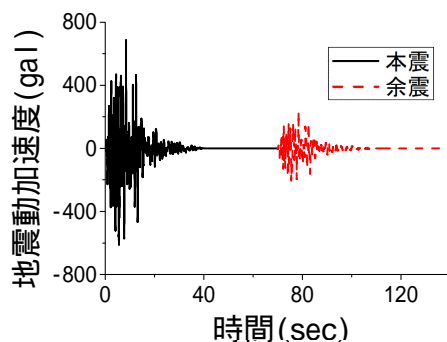


図-7 余震を考慮した
模擬地震動
(震源距離 10km)

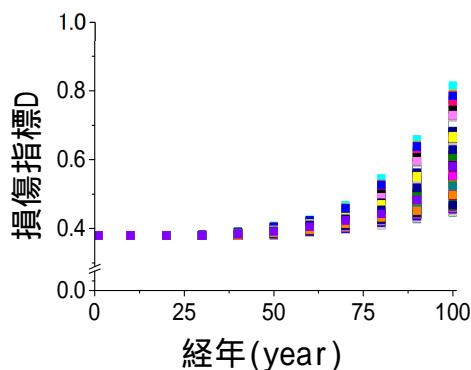


図-8 経年に伴う損傷拡大
(余震の震源距離 10km)

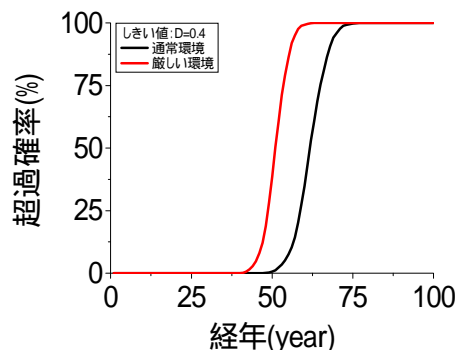


図-9 超過確率

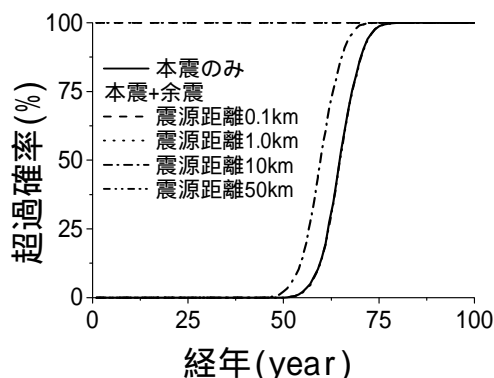


図-10 余震を考慮した際の
超過確率

表-2 超過確率を満足する年数

震源距離 超過確率	種地盤			種地盤			種地盤		
	10km	50km	本震のみ	10km	50km	本震のみ	10km	50km	本震のみ
0%	46	51	51	40	47	47	53	64	64
25%	58	62	63	50	59	59	65	80	81
50%	61	66	66	52	62	62	68	83	84
75%	64	69	69	55	65	65	71	87	87
100%	76	81	81	65	77	77	83	98	99

図-11 に、維持管理シナリオのイメージ図を示す。破線は、健全度のみを管理水準として、修繕等の対策を行う従来型の維持管理シナリオを表しており、実線は、耐震性も考慮した維持管理シナリオを表している。供用年数約 50 年までは、経年劣化による損傷指標への影響は小さいため、従来と同様の維持管理手法を用いても良い。ただし、供用年数 50 年付近では経年劣化が耐震性能に与える影響が大きくなることが確認されたため、耐震性能を満足させるためには、この時期に修繕を行うことが必要不可欠であり、これらの修繕時期は、表-2 に示されている。

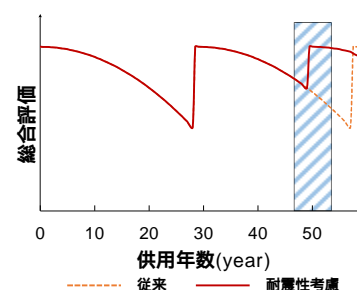


図-11 維持管理シナリオ

(4) まとめ

実橋梁データを基に解析を行い、不確定性を考慮した鉄筋腐食による経年劣化が損傷評価に及ぼす影響を外部環境別に推定した。これらの結果より得られたことを以下にまとめる。

1. 劣化進行モデルの作成により、外部環境別に部材の剛性低下開始時期及び各劣化過程に対する供用年数を決定することが可能となった。しかし、実橋梁データの数が増加するほど実際の橋梁に近い経年劣化を示す劣化進行モデルを作成することができるため、さらにデータ数を増やす必要がある。
2. 断面欠損係数と経年ならびに断面欠損係数と剛性比の関係より、経年劣化による剛性低下を外部環境別に求めることが可能となった。また、各劣化過程の腐食速度の違いを剛性低下に反映させ、実環境に近い剛性低下を推定することが可能となった。より実環境に近い剛性低下を推定するためには、環境別の腐食速度を考慮することが重要である。
3. 不確定性を考慮した経年と剛性低下の関係に基づいた損傷評価を行うことで各地盤種における各環境の剛性低下による損傷拡大を評価することが可能となった。構造物の損傷評価は、入力地震動の地震特性に密接に関連するため、これらの関係性を明確にしておくことが重要である。
4. 剛性低下開始時期の不確定性を考慮した損傷指標の結果を基に超過確率を算出した結果、耐震性を考慮した修繕を行う時期の推定が可能となった。しかし、目標塑性率や構造物の固有周期などさまざまな条件によって適切なしきい値の設定が必要であることが確認できた。
5. 余震を考慮した模擬地震動を作用させた場合においても、本震のみに着目した場合と同様に、経年ごとの損傷評価を基に超過確率を算出することによって想定する余震の震源距離に応じて地盤種別の維持管理シナリオを算出することが可能となった。

今後の課題

剛性低下の推定では、鉄筋径を 1 種類のみとして解析を行ったが、実際の橋梁では様々な鉄筋径が用いられている。これは、ばらつきを生じさせる要因の 1 つであるため、鉄筋径の違いによる腐食状況を考慮した解析を行う必要がある。また、より実環境に近い剛性低下を推定するために、環境別の腐食速度を算出し、それらを適応させた解析を行う必要がある。

<参考文献>

- 1) 吉川弘道ら、「腐食環境下にある鉄筋コンクリート橋脚の地震リスクと損傷期待値」,土木学会, 応用力学論文集, Vol.7, pp.863-873, 2004.
- 2) 加藤ら、「建設後 30 年以上経過した栈橋上部工から切り出した RC 部材の劣化性状と構造性能」, 港湾空港技術研究所資料, No.1140.2006.
- 3) 西田ら、「各基準による曲げ破壊型 RC 橋脚の終局耐力・変形性能の推定精度の比較」, 土木学会第 61 回年次学術講演会, 2006.
- 4) 福島美光, 「断層近傍まで適用可能な最大加速度の距離減衰式の導出」, 清水建設研究報告, 第 63 号, pp.75-88, 1996.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 山田響己, 木村至伸	4. 巻 38
2. 論文標題 常時微動観測波形と相関性のある地震動の特徴について	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木構造・材料論文集	6. 最初と最後の頁 34-41
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 中島祥太, 木村至伸	4. 巻 38
2. 論文標題 劣化速度を考慮した耐震性能評価に基づく維持管理手法についての一考察	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木構造・材料論文集	6. 最初と最後の頁 42-49
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大森広哉, 木村至伸
2. 発表標題 耐震性に着目した予防保全型の維持管理手法に及ぼす余震活動の影響
3. 学会等名 令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山田響己, 木村至伸
2. 発表標題 位相差分の高次モーメントを含めた位相モデルによる模擬地震動の作成について
3. 学会等名 令和5年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2024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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------