

令和 3 年 6 月 13 日現在

機関番号：32704

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04332

研究課題名（和文）複数回連続強震作用下の橋台アプローチ進行性破壊による車両通行性リスク経時進展評価

研究課題名（英文）Vehicle passage risk due to progressive destruction of abutment approach under multi consecutive strong motions

研究代表者

北原 武嗣 (Kitahara, Takeshi)

関東学院大学・理工学部・教授

研究者番号：00331992

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：橋台アプローチ部の液状化による沈下の進展や鋼製橋脚の繰り返し耐力低下について検討した。検討の結果、同入力強度の複数回強震により、橋台アプローチ部の沈下量や杭の応答変位が拡大すること、ただし本震に続く入力地震が計測震度3程度であれば、本震後の排水により地盤は締め固められ、橋台背面アプローチ部の沈下量はほとんど変わらないことがわかった。すなわち、本震と同規模の複数回強震により被害が拡大すること、その場合の被害は地震動単独での被害予測の単純和よりは小さく抑えられることを明らかにした。

また鋼製橋脚に関しても、複数回強震により局部座屈が進展することで最大耐力が低下することも確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2016年熊本地震では設計地震動（レベル2）相当と考えられる震度6弱以上がKiK-net益城観測点で約28時間内に5回も観測された。通常の設計では、原則として強震動にさらされるのは1回としている。この事象に対し、設計上どのように考慮すべきかに関して知見を得ることは重要な課題である。この課題に対して、橋台アプローチ部の液状化による沈下量の進展や鋼製橋脚の繰り返しによる最大耐力の低下の影響を把握したことは今後の耐震設計法を整備するうえで学術的にも意義ある成果である。

また、複数回連続強震による橋台アプローチ部の沈下量を適切に評価することは地震後の早期復旧に資すると考えられ社会的意義も大きい。

研究成果の概要（英文）：We investigated the progress of subsidence due to liquefaction of the abutment approach and the repeated decrease in the bearing capacity of steel piers. As a result of the examination, the amount of subsidence of the abutment approach and the response displacement of the pile increase due to multiple strong earthquakes with the same input strength. However, if the input after the mainshock had a measured seismic intensity of about 3, it was found that the drainage compacted the ground after the mainshock, and the amount of subsidence of the abutment rear approach part was almost unchanged. It was also confirmed that the maximum yield strength of steel piers decreases as local buckling progresses due to multiple strong earthquakes.

It was clarified that the damage would be expanded by multiple strong earthquakes of the same scale as the mainshock, and that the damage, in that case, would be smaller than the simple sum of damage prediction by the ground motion alone.

研究分野：地震工学

キーワード：複数回連続強震 载荷パターン 入力強度 入力順序 耐力低下 橋台アプローチ部 液状化 沈下

1. 研究開始当初の背景

(1)2016年熊本地震では、KiK-net 益城観測点において、平成28年4月14日午後9時26分から4月16日午前1時45分の約28時間に、震度6弱以上に相当する計測震度5.5以上を5回観測している。4月15日午前と4月16日の午後との被害を比較すると、橋台背面アプローチ部の段差のさらなる沈下が確認された地点が多く見られた。通常の設計では、原則として強震動にさらされるのは1回としている。これまでも、1995年兵庫県南部地震や2011年東北地方太平洋沖地震でも、いわゆる本震の後に多数の余震が発生しているが、レベル2地震動相当の地震動がこれほど短期間に繰り返し作用した事例はなく、このことに対して、設計上考慮するかどうかは別として、何らかの知見を得ておくことは学術上非常に重要であると考えられる。

(2)また、構造物の設計は性能設計体系に移行しつつある。平成29年7月に国土交通省より発表された「橋、高架の道路等の技術基準」(道路橋示方書)の改定で、「部分係数設計法」及び「限界状態設計法」が導入された。今後、橋梁の設計は、さらに性能設計体系へと移行していく状況において、設計地震動相当の地震動が短期間に複数回発生し、損傷が進行する際に、構造物に求める要求性能(使用性・安全性)をどのように規定しその要求性能に対するリスクをどう評価するかを把握しておくことが大変重要な背景であった。

2. 研究の目的

(1)本研究の目的は、河川を跨ぐ橋梁に着目し、複数回の地震動作用により、橋台背面アプローチ部の沈下、橋台下の地盤の動き、橋台付近の地盤の移動に伴う橋梁本体への影響などを数値解析により明らかにし、特に背面アプローチ部の段差による緊急車両の通行可能性に対するリスク評価を行い、複数回の地震動作用により、リスクがどの程度変わるのか、設計の時に使用性を規定するにはどうしたらよいかを明らかにすることである。

(2)また、2011年東北地方太平洋沖地震では、断層のずれが広範囲であったため、K-net 仙台をはじめ複数の観測地点で、地表面加速度のピーク値が2回見られる現象が確認された。また地震動継続時間が2分から3分程度続き、強震動が2回作用したときや比較的長い時間作用した場合の研究が始まっている。ここでは、鋼製橋脚を対象として繰り返しの強震動で損傷が進展していく現象やそのメカニズムを定量的にまずは把握すること、加えて、性能設計を行う上で最重要項目の一つである橋に求める要求性能を、地震時のどの段階において求めるのかも検討対象と考えられる。

(3)最終的には、複数回の地震動による背面アプローチ部の沈下の進行や橋台基礎下の地盤の流動化などの損傷が進展していく現象におけるリスクの評価や橋の要求性能(使用性)の決め方について新たな知見を得ることを目的とする。

3. 研究の方法

(1)橋台アプローチ部沈下進展の検討

複数回地震動への対応として、単純に、2016年熊本地震においてKiK-net 益城で観測された前震(4月14日)の地震動と本震(4月16日)の地震動を準備し、前震の地震動を入力

後、液状化層で発生した過剰間隙水圧が排水により定常状態になったのを確認した後に、本震の地震動を入力する有効応力解析に加え、発生順序を逆にした解析を実施し、地震動の順番にも着目した解析を実施した。

さらに、レベル1地震動程度(最大加速度200ガル程度)の地震動とレベル2地震動(最大加速度800ガル程度)の地震動の2波を用いて、小さい波から大きい波が来た場合と、大きい波が来た後に小さい波が来たときについて検討を行った。

最後に、2016年熊本地震において観測最大震度が6弱以上の7回の地震に対し、Kik-net益城観測点において計測された東西方向の地震動7波を入力波として、強震動複数回作用時における橋梁の使用性に関する検討を実施した。

(2)鋼製橋脚の繰り返し耐力劣化に関する検討

複数回連続強震による鋼製橋脚の耐力劣化に関する検討を行った。鋼製橋脚としては都市高速によく用いられているT型単柱式の箱型および円筒型薄肉断面橋脚を対象とし、シェル要素を用いた材料および幾何学的複合非線形FEM解析によって検討した。

まずは2パラメータモデルによる地震応答解析を実施した応答変位履歴から、簡易的に複数回連続強震の載荷パターンを決定した。決定した載荷パターンでは、強震の繰り返し数、強震の入力強度の大小、および強震の継続時間をパラメータとした。

また、構造側の特性としては、鋼製橋脚の局部座屈性状に大きく寄与する座屈パラメータとして、幅厚比パラメータや径厚比パラメータの影響を考慮した。これら地震入力力の載荷パターンと構造物の座屈パラメータが、鋼製橋脚の繰り返し耐力低下に与える影響を評価するものとした。

4. 研究成果

(1)橋台アプローチ部沈下進展の検討

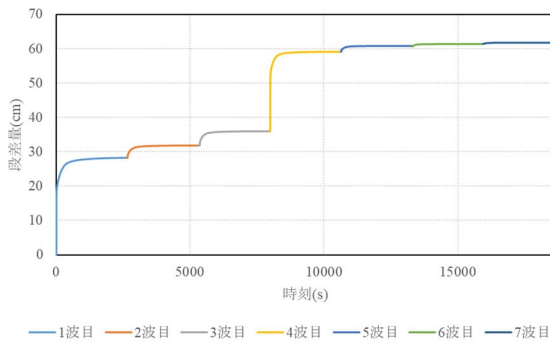
前震と本震を入力した解析では、2回の地震動を入力することにより橋台背面アプローチ部の段差量は明らかに大きくなることはわかった。しかし、それぞれの地震動単体による橋台背面アプローチ部の段差量の単純和よりも、2回の地震動を連続して入力した方が発生する段差量は小さくなることを明らかにした。これは1回目の地震動終了後、排水を行い、過剰間隙水圧の消散を確認してから2回目の地震動を入力したため、2回目の地震動を入力する際には液状化層が締め固まった状態になっていたことを確認している。また、今回の2つの地震動では、地震動の発生順序を変えたとしても、橋台背面アプローチ部の沈下量や杭の最大水平変位については、ほとんど差はなく、地震動の順番の影響は見られないことがわかった。

続いて、地震動の大きさに差を設けた場合は、地震動の入力の順番は少し影響し、大きい波により過剰間隙水圧が一度上昇し、排水により締め固められた方が、小さい地震が来たときの被害はほとんどないという結果を得た。最後に7つの波を連続入力した場合については、順番の入れ替えなどは行っていないため、詳細な検討はまだ行っていないが、今回の場合、4波目が本震の波であり、本震の地震動入力後、残り3波の波の振幅が大きくないのもあるが、ほとんど被害は発生せず、本震の影響がかなり大きいことがわかった。

以上まとめると、強震動複数回作用により、明らかに地震動1回の作用よりも被害が拡大することが確認できた。これは、単独で被害を与えるような入力強度の地震動が複数回作用した場合である。一方、例えば本震が発生し、その後、計測震度が3程度の中小規模の地震動を複数回入力しても、本震による強震による応答の後、排水による過剰間隙水圧の消散で地盤は締め固められ、橋台背面アプローチ部の段差量はほとんど変わらないことがわかった。

2016年熊本地震のように、断層帯が複数、近傍に存在する場合は、強震動複数回作用に

より被害が拡大することは明らかになり、また、その場合の被害は、地震動単独での被害予測の単純和よりは被害が抑えられると考えられる。



段差量（沈下量）の推移

	地震動単体での段差量	複数回地震動での段差量	段差量の増分	減少率
1波目（前震）	28.20cm	28.20cm	0cm	0%
2波目	4.46cm	31.90cm	3.70cm	17.04%
3波目	5.73cm	36.04cm	4.14cm	27.75%
4波目（本震）	40.58cm	59.07cm	23.03cm	43.25%
5波目	4.82cm	60.83cm	1.76cm	63.49%
6波目	1.73cm	61.44cm	0.61cm	64.74%
7波目	2.91cm	61.80cm	0.36cm	87.63%

段差量（沈下量）の比較

(2)鋼製橋脚の繰り返し耐力劣化に関する検討

・座屈パラメータの影響

構造特性として座屈パラメータによる繰り返し耐力低下について検討した結果、全体座屈に影響する細長比パラメータよりも局部座屈に影響する幅厚比パラメータや径厚比パラメータの影響が強いことがわかった。これは繰り返しによる耐力低下は局部座屈の進展によるものであると考えられるからである。すなわち、幅厚比パラメータや径厚比パラメータの値が大きいほど薄肉な断面となり、局部座屈の進展が顕著に表れることにより耐力低下率が大きくなるといえる。

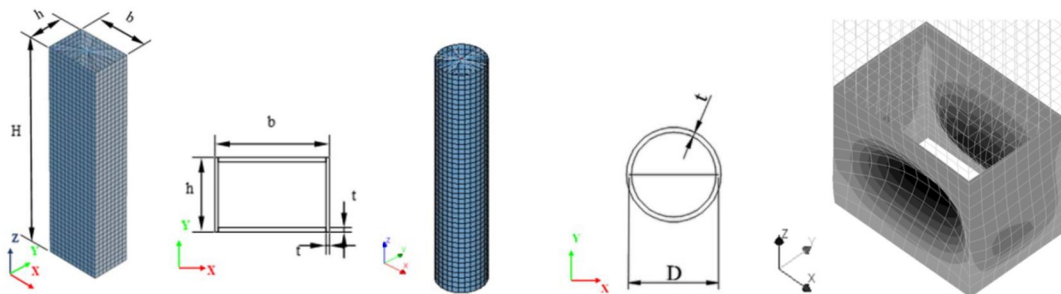
・地震動の影響

地震動の影響としては、強震の繰返し数が増えるに従い耐力低下が大きくなること、例えば3回の強震が短期間に生じたとすると、1回だけの耐力低下に対して2回目、3回目の強震によって1.5~3倍強の耐力低下率が生じることもありうる。

つぎに、入力強度の低減がなく繰り返される場合、すなわち余震も本震と同レベル強度（例えば震度7が連続して生じる）の強震が続く場合に耐力低下が顕著なことで、さらに継続時間の長短は耐力低下に大きな影響を与えないことなどが確認できた。

・耐震設計への反映

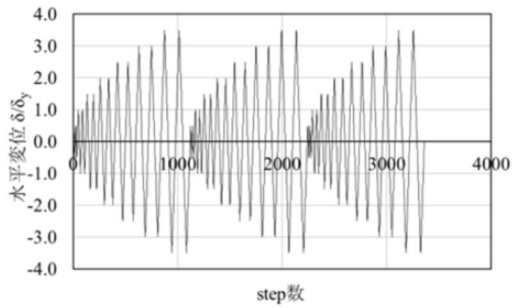
今回検討した構造特性や連続強震のレベルでは、繰り返し振幅により最大荷重から15~20%程度の耐力低下が生じることもあり得ることがわかった。現状の耐震設計ではレベル2相当の強震が連続して生じる際の検討手法が明確ではないため、今回把握した耐力低下も考慮した設計手法に反映させることが重要であるといえる。



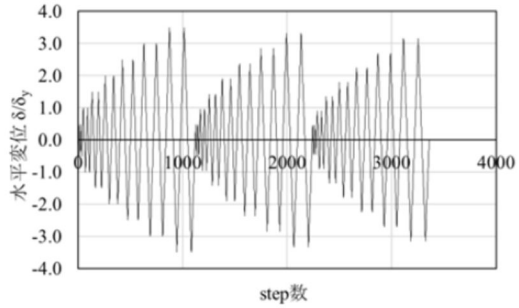
解析モデル（箱型断面）

解析モデル（パイプ断面）

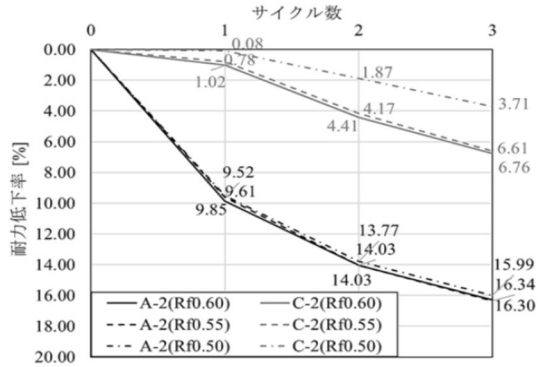
局部座屈形状の例



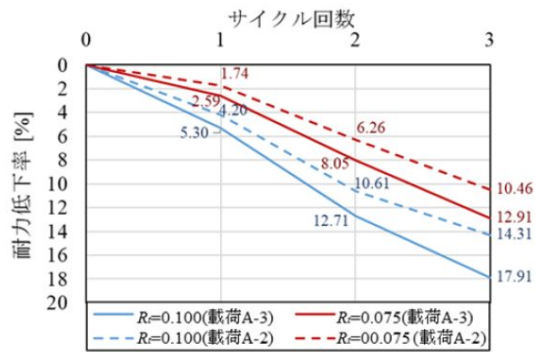
荷重パターン（入力レベル一定）



荷重パターン（入力レベル低減）



耐力低下率（箱型断面）



耐力低下率（パイプ断面）

(3) 橋梁システムとしての通行性リスク評価に関する検討

複数回連続強震を受ける橋梁システムの破壊進展による通行性リスクの定量的評価を最終目的に、橋台アプローチ部の液状化による沈下の進展や鋼製橋脚の繰り返し耐力低下について有用な知見を得た。一方、通行性リスクの評価に関しては、橋台アプローチ部の地下量と通行速度の関係からフラジリティ評価を行う手順までは検討できたが、実際にリスク進展評価を行うまでには至らなかった。今後の検討課題としたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 4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 Takeshi Kitahara, Ryo Sudo, and Yuka Ohtani	4. 巻 17
2. 論文標題 Load-bearing properties of steel bridge piers subjected to multiple consecutive strong motions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of 17th World Conference on Earthquake Engineering	6. 最初と最後の頁 -
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 Yukihide Kajita, Seiji Fukui, Takeshi Kitahara, Kunihiko Uno and Taiji Mazda	4. 巻 17
2. 論文標題 Investigation for subsidence at the approaching areas of abutments induced by sequenced ground motions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of 17th World Conference on Earthquake Engineering	6. 最初と最後の頁 -
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 Yukihide Kajita, Kazuki Onoda, Taiji Mazda, Kunihiko Uno, Takeshi Kitahara	4. 巻 6
2. 論文標題 Investigation on the effect of countermeasures for subsidence at the approaching areas of abutments	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Interdependence between Structural Engineering and Construction Management	6. 最初と最後の頁 -
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 北原武嗣, 須藤遼, 大谷友香	4. 巻 9
2. 論文標題 複数回連続強震を受ける箱形およびパイプ断面鋼製橋脚の繰り返し耐荷性状	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 構造物の安全性および信頼性（JCOSAR2019）論文集	6. 最初と最後の頁 156-161
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 須藤遼, 反田敦也, 北原武嗣, 大谷友香	4. 巻 第21回
2. 論文標題 複数回連続強震を受ける鋼製橋脚の耐荷性状に関する一検討	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 117, 120
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 無
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 須藤遼, 北原武嗣, 大谷友香, 反田敦也	4. 巻 第38回
2. 論文標題 複数回連続強震を受ける鋼製無補剛箱形断面橋脚の耐荷性状に関する解析的検討	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 地震工学研究発表会講演論文集	6. 最初と最後の頁 -
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 無
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 梶田幸秀, 斧田和樹, 宇野州彦, 北原武嗣, 松田泰治	4. 巻 第9回
2. 論文標題 複数回地震動作用時における橋台背面アプローチ部の沈下に対する検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム講演集	6. 最初と最後の頁 87, 92
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 無
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 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 梶田幸秀, 福井誠司, 松田泰治
2. 発表標題 複数回地震動作用時における橋台背面アプローチ部の段差量に関する考察
3. 学会等名 土木構造物の復旧性評価に関するシンポジウム論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石丸輝, 梶田幸秀, 福井誠司, 松田泰治
2. 発表標題 複数回地震動による橋台背面部の沈下に対する種々の検討
3. 学会等名 令和2年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 須藤遼, 北原武嗣, 大谷友香
2. 発表標題 複数回連続強震を受ける円形パイプ断面鋼製橋脚の耐力低下に関する検討
3. 学会等名 第46回土木学会関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2019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	梶田 幸秀 (Kajita Yukihide) (10403940)	九州大学・工学研究院・准教授 (17102)	

	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 協力者	宇野 州彦 (Uno Kunihiko) (10600372)	五洋建設株式会社(技術研究所)・耐震構造チーム・係長 (92201)	

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