

地震発生後の車両通行性に着目した既存橋梁システムのフラジリティ解析 Fragility Analysis of Existing Bridge Systems Focusing on Traffic Passability after Earthquake Event

サキヤ 摩耶 (横国大・都市イノベ) 西尾 真由子 (筑波大・シス情)

Maya SHAKYA, Yokohama National University

Mayuko NISHIO, University of Tsukuba

TEL: 029-853-6192, E-mail: nishio@kz.tsukuba.ac.jp

After a major earthquake event, there is a case that the vehicles cannot become passing on the bridge due to the damages in bearings and expansion joints caused by large dynamic displacement. In this study, the fragility analysis was conducted focusing on the vehicle passability after the earthquake event on two bridges with different structural characteristics considering the effects of deterioration damages on the existing bridges. As the results, it was shown that the deterioration damage affected the large vehicles passability after the earthquake, and may decrease the vehicle passability as the bridge structure system.

1. はじめに

道路橋では、大中規模地震時の変位により桁端部の支承や伸縮装置が損傷し、路面に段差が生じて車両の通行が制限される場合がある。例えば 2016 年の熊本地震では山間部に点在する橋梁群が通行不可となり、曲線橋である大切畑大橋でのゴム支承の破断や、俵山大橋での主桁と橋台の衝突などによる損傷事例が見られた。また 2011 年の東北地方太平洋沖地震では、都市部交通網を形成する高架橋において積層ゴム支承の破断が確認され、車両通行不可となった事例がある²⁾。特に重要橋梁では災害発生直後に緊急車両等が通行できなければ、救助や復旧に大きな影響がでてしまう。一方、既存橋梁では劣化損傷の影響で構造特性が変化して設計時の照査性能が得られないリスクもあり、その橋梁毎に劣化の影響を考慮したリスク評価が求められる場合もあると考える。そこで本研究では、地震後の車両通行性に着目した既存橋梁の地震リスク評価を目指し、著者らが橋梁振動モニタリングを実施している 2 つの実橋梁を対象として、車両通行性を限界状態とするフラジリティ解析を行い、構造特性や劣化状態が及ぼす影響を検証した。

2. フラジリティ解析の概要

フラジリティ解析では破壊など限界状態を定義し、その発生確率を求める。その際に地震動の大きさと設定した限界状態を超えたか否かの 2 値情報を用いる。2 値情報に対する最尤法は 2 項尤度モデルと呼ばれ、式(1)に示す尤度関数により表される。

$$L(\alpha_i; c_m, \xi_Z) = \prod_{i=1}^n F_Z(\alpha_i; c_m, \xi_Z)^{q_i} \{1 - F_Z(\alpha_i; c_m, \xi_Z)\}^{1-q_i} \quad (1)$$

ここで q は損傷する場合に 1、しない場合は 0 を与える 2 値関数、 α は作用地震動、 n はサンプル数を示す。未知量は、耐力の中央値 c_m と作用地震動と耐力のばらつきを合わせた複合偏差 ξ_Z である。本研究では、対象橋梁の数値モデルを構築し、非線形時刻歴解析で得る最大応答変位に対する限界状態への 2 値情報からフラジリティ曲線をもとめた。

3. 対象橋梁

本研究では、既存橋梁の地震リスク評価を目指して著者らが地震モニタリングを行っている実橋梁 2 橋を検証対象とした。横浜市北部のⅢ種地盤上にあるパイルベント橋脚を有する鋼床版鋼桁橋(橋梁A)、同市南部のⅡ種地盤上にある高架道路を形成する鋼桁箱免震橋梁(橋梁B)である。

4. 橋梁A: パイルベント橋脚の損傷を考慮した地震後車両通行性へのフラジリティ解析

河川橋梁である橋梁Aは鋼製パイルベント橋脚を有しており、水中部での腐食断面欠損が多数報告されている³⁾。そこで対象橋梁Aに対しては、橋脚腐食の有無が地震後の車両通行性に与える影響をフラジリティ解析で検証した。数値モデルは、耐震補強工事で設計計算に使用されたものを用いた(Fig.1)。上部工を線形梁要素、鋼管杭を非線形梁要素、支承をピン結合で表し、各杭でバイリニア地盤ばねが 1m 毎に配置され骨組みモデルである。橋脚の腐食断面欠損は既往文献⁵⁾を基に、P1, P2 橋脚の上流側に航路側水面位置で 150×300mm の断面欠損を与えた。入力地震動はレベル 2 地震動Ⅱ-Ⅲ-1, Ⅱ-Ⅲ-2, Ⅱ-Ⅲ-3 を 0.2~2 倍に振幅調整した計 60 波として、時刻歴応答解析を行った。

得られた応答変位から P2 橋脚上の 2 つの単純桁端の水平・鉛直方向相対変位最大値をもとめ、Fig.2 に示す車両通行性に対する限界状態に対して 2 値情報を得た。ここでは

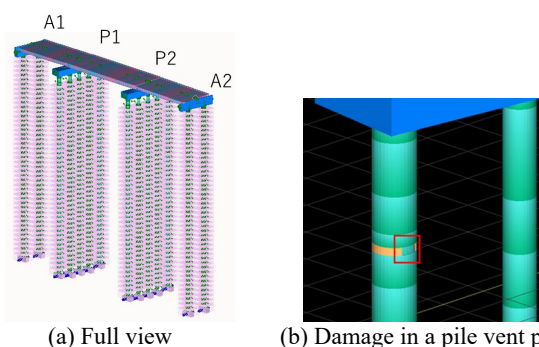


Fig. 1 Numerical model of the target bridge with pile bent piers

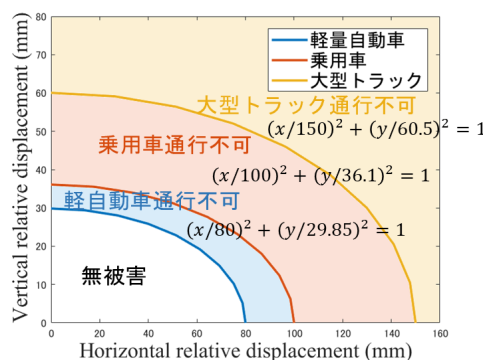


Fig. 2 Limit state of vehicle passability

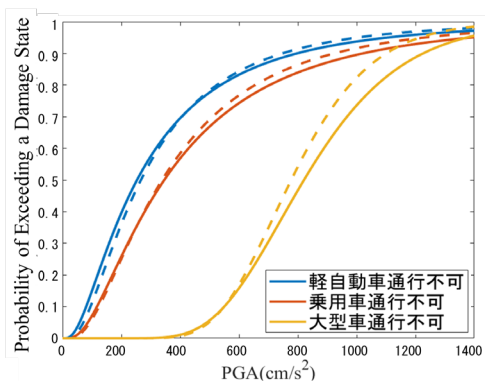


Fig. 3 Fragility curve with limit state of vehicle passability

既往研究⁴⁾を基に、桁間の遊間(x 軸)と段差(y 軸)に関する許容値から、各破壊基準の限界状態となる楕円関数を作成し、60km/h 走行時における軽自動車、乗用車、大型車についての通行規定範囲を設定した。Fig.4 に健全時と腐食損傷時の fragility 曲線を示す。横軸は地表最大加速度(PGA)であり、縦軸は累積発生確率を示している。実線は健全時、破線は損傷時を示す。いずれの車両タイプでも、損傷時のほうが低い PGA で通行不可となる確率が高くなり、特に大型車両で腐食断面欠損の影響が大きかった。

4. 橋梁 B : 支承部劣化を考慮した免震高架橋梁システムの fragility 解析

免震高架橋梁である橋梁 B の数値モデルは、本橋で実施された動的耐震設計の計算書を基に Fig.5 に示すように構築した。主桁、橋台を線形梁要素、鋼製橋脚をファイバー要素、RC 橋脚は塑性ヒンジを Takeda モデル、地盤ばねは等価線形化ばねで表した。鉛プラグ入り積層ゴム支承は、1 基につき 15° 間隔で 12 本のばねを配置したマルチスプリング要素を用いた。入力地震動はレベル 2 地震動 II-II-1, II-II-2, II-II-3 の 3 波を 0.2~2 倍に振幅調整した計 60 波を用いた。また、入力方向は、橋梁中心である P9 橋脚を $\theta=90$ として $\theta=0 \sim 150$ で 30° 毎に 6 ケース設定した。限界状態は、橋梁端部の P6 橋脚上のゴム支承のせん断ひずみについて 250%を用いた。劣化状態は既往研究⁵⁾に基づき、全支承の剛性 1.2 倍、降伏荷重 0.5 倍とした。

はじめに、P6 橋脚上の単一支承に対して限界状態を設定し、fragility 解析を実施した。Fig.6 に $\theta=0$ と $\theta=90$ の結果を示す。健全時と比べ劣化時に低い PGA での破壊確率が上がることがわかった。また、地震動の作用方向によって fragility に差が生じることが示された。

その上で高架橋での車両通行性という観点では、高架橋全体を直列システムと捉え、全支承 22 基のうち少なくとも 1 基が限界状態を超えた場合に通行不可と考えるほうが妥当である。Fig.7 に、P6 橋脚上の単一支承を考える場合と高架橋全体で橋梁システムと考える場合での、fragility 曲線の比較を示す。すると、橋梁システムとして捉える場合のほうが損傷発生確率は高く評価された。このように既存橋梁では、橋梁全体をシステムとしてリスクを考えていくことが重要と考える。

5. おわりに

本研究では、地震後車両通行性を限界状態とした fragility 解析を行い、構造特性や劣化状態の及ぼす影響を検証した。特に大型車においては、劣化状態の影響が大きく表れることを明らかにした。また、高架橋を対象に、単一

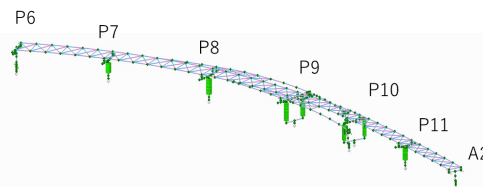


Fig. 4 Numerical model of the seismic isolation bridge

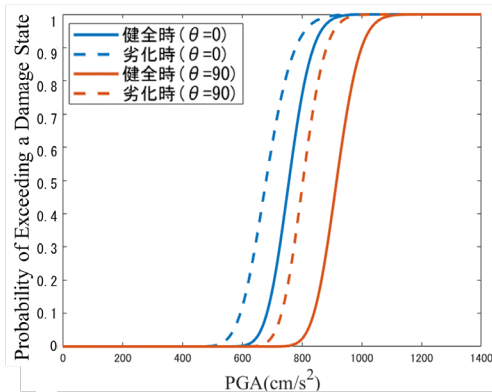


Fig. 5 Fragility curve of healthy and damaged conditions focusing on limit state of a single seismic bearing

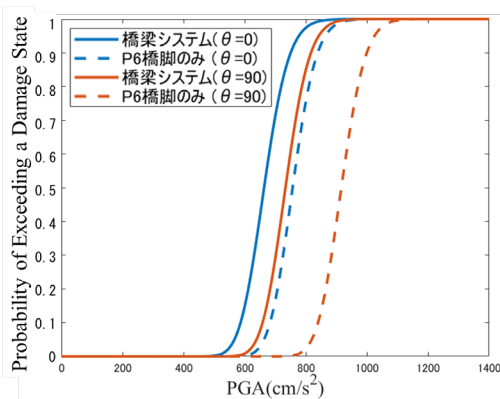


Fig. 6 Fragility curves for viaduct systems

支承、橋梁全体に着目した fragility 解析の比較を行い、構造システムとしてのリスク評価の必要性を示した。

参考文献

- 1) 渡邊学歩, 葛西昭, 松永昭吾, 益田諒大: 2016 年熊本地震による大切畑大橋の被害分析, 第 19 回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, pp.177-184, 2016.
- 2) 曾田信雄, 山田金喜, 木水隆夫, 広瀬剛, 鈴木基行: 東北地方太平洋沖地震により破断した積層ゴム支承の性能試験, 構造工学論文集 Vol.59A, pp.516-526, 2013.
- 3) 落合潔, 石井清万, 三浦聡, 永尾豊明: 横浜市が管理する道路橋の鋼製パイルベント橋脚の損傷事例, 橋梁と基礎, Vol.44, No.11, pp.21-26, 2010.
- 4) 阿部雅人, 藤野陽三, 吉田純司, 朱平: 高架橋の 3 次元動的解析モデルを用いた桁間連結装置および車両通行性能の評価, 土木学会論文集, 773/I-69, 2004.
- 5) 松崎裕, 小野寺周, 津村拓都, 鈴木基行: 免震支承—RC 橋脚間の耐力比および免震支承の経年劣化と免震橋における地震時損傷部材の関係に関する基礎的研究, 第 19 回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, pp.265-268, 2016.