

断層の出現位置と変位が橋梁の地震時安全性に与える影響

及川 慎¹・松崎 裕²・運上 茂樹³

¹学生会員 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻（〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06）
²正会員 博(工) 東北大学助教 大学院工学研究科土木工学専攻（同上）
³正会員 博(工) 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻（同上）

1. はじめに

地震発生時、地表地震断層が橋梁直下に出現することにより、橋台や橋脚間に相対変位が生じ、地震慣性力のみが作用した場合とは異なる被害が生じることがある。1999年の台湾・集集地震では地表に最大で10m程度の断層変位が生じ、落橋などの被害が生じた。それ以降、断層変位が橋梁に与える影響に関して様々な研究が行われてきた。矢葦ら¹⁾はPCラーメン橋に対して静的な強制変位を入力した解析を行い、損傷が生じる箇所や損傷に至る入力変位量について示した。その後、大塚ら²⁾が鋼斜張橋に対して、松永・大塚³⁾がRCアーチ橋に対して動的に生じる断層変位の影響を考慮した動的解析を行い、静的解析や一様加速度入力による動的解析よりも大きな応答値を示す傾向があることなどを示した。また、Saiediら⁴⁾は2径間連続RC橋梁模型に対して断層変位を考慮した振動台実験及び動的解析を行い、一様加速度入力による実験と比較して、橋脚の損傷度合いが異なることや解析により実験結果を再現できることなどを示した。一方で動的解析に基づく既往の研究は、入力加速度や断層の出現位置、変位量について限られたケースで検討したものが多く、本研究では地震動加速度と断層変位の同時作用が橋梁の地震時安全性に与える影響を明らかにすることを目的として、短周期成分を代表する加速度を極力変えずに永久変位を変化させた変位波形を断層の両側に入力した動的解析を行う。

活断層の位置は国土地理院等の活断層図に記載されているものの、地表地震断層の出現位置の正確な予測は難しい。また、地震時には、副断層やそれまで未確認だった断層が出現することもある。例えば2016年熊本地震でも益城町木山や阿蘇山の周縁部な

ど、事前に確認されていた布田川断層帯の延長線上やそこから分岐した位置に断層が出現した⁵⁾。本研究ではこのように断層の出現位置が不明であることから、橋梁に断層変位対策が施されていない場合を考え、複数の断層出現位置を想定した変位漸増解析及び動的解析を行い、断層の出現位置が橋梁の地震時安全性に及ぼす影響を検討する。

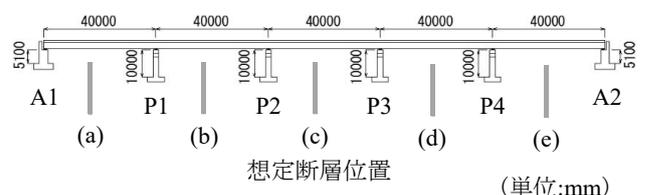
2. 対象橋梁とモデル化

本研究では、平成24年道路橋示方書⁶⁾に従って設計された図-1に示す積層ゴム支承を有する5径間連続鋼桁橋を解析対象とした。支間長は40m、橋台高さは5.1m、橋脚高さは10m、地盤条件はI種地盤である。対象橋梁は骨組構造でモデル化し、橋台・橋脚の基部は固定、橋脚の塑性ヒンジ領域における履歴特性はトリリニア型(降伏後の剛性は降伏時割線剛性の1/1000)のTakeda型モデルとした。橋台は線形梁要素で、支承は線形ばね要素でモデル化した。桁は線形梁要素とし、RC床版と鋼桁を鋼と等価な断面に換算し、モデル化した。

3. 解析手法

(1) 変位漸増解析

径間が橋軸方向に水平に広がるような横ずれ断層が出現したことを想定し、断層よりA1側の下部構造



の基部にのみ、図-1の左方向へ静的に漸増する強制変位を与える解析を行った。断層の出現位置としては、図-1のように(a)A1-P1間、(b)P1-P2間、(c)P2-P3間、(d)P3-P4間、(e)P4-A2間の5通りを想定した。

(2) 動的解析

動的に生じる断層変位の影響について検討するため、断層の両側で異なる変位波形を橋軸方向に入力して各波形の永久変位の差を断層変位とし、それを変化させた解析を行った。

変位波形は2016年熊本地震本震のK-NET熊本EW成分、K-NET大津EW成分の2つの加速度波形を積分することで算定した。積分の際にIwanら⁷⁾やBoore⁸⁾が提案した基線補正を行って積分する方法(以降、基線補正法と呼ぶ)と、ハイパスフィルタをかけた後に積分する方法の2つの方法を用い、異なる変位波形を算定した。算定した2つの変位波形には図-2の例のように永久変位に違いが生じる。このことを利用し、2つの方法で得た変位波形を異なる割合で足し合わせることで、加速度を極力変えずに任意の永久変位を有する変位波形を作成した。なお、干渉SARによって計測された実際の地震の前後の永久変位量⁹⁾は基線補正法によって算定した変位波形の永久変位とほぼ等しいことを確認している。ここでは、熊本の加速度波形から作成された永久変位0.3mの変位波形を熊本0.3のように呼んでいる。基線補正法で算定した変位波形の加速度応答スペクトルを図-3に示す。その他の変位波形の加速度応答スペクトルは基線補正法で算定したものと固有周期10s以下の領域ではほぼ同一となった。

解析の際には、表-1に示すように、例えば熊本の場合では、1つの想定断層位置ごとに、断層を挟みA1側に熊本0.1を、A2側に熊本0.1~1.0までの計10波形を永久変位0.1m刻みで変化させて入力し、計10ケースの解析を行った。断層の位置は、3.(1)と同様に図-1に示す5通りを想定した。

4. 解析結果

(1) 変位漸増解析

変位漸増解析の結果を図-4に示す。解析モデルは橋軸方向に対称であるため、静的な変位漸増解析では、断層位置(a)と(e)、(b)と(d)の応答はそれぞれ対称となった。そのため図-4には断層位置(a)、(b)、(c)の結果のみを示している。ここでは各部材の終局値を、橋脚は耐震性能2の限界曲率、支承はせん断ひずみ250%とし、それらを基準に正規化しており、縦軸

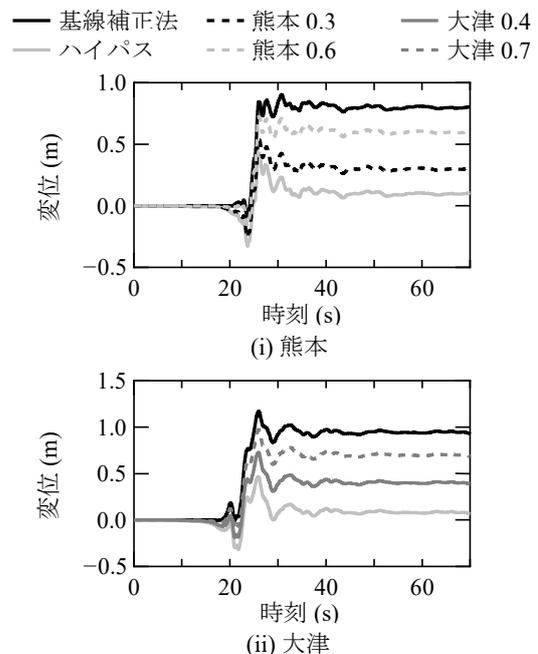


図-2 観測波形から算定した変位波形の例

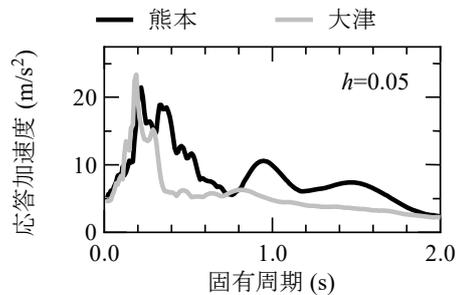


図-3 基線補正法により算定した変位波形の加速度応答スペクトル

表-1 入力変位波形の組み合わせ

入力場所		相対永久変位 (m)
A1 側	A2 側	
熊本 0.1	熊本 0.1~1.0	0.0~0.9
大津 0.1	大津 0.1~1.0	0.0~0.9

が1.0に達した時の地盤変位で設計上の終局に至ることを表している。

(a)と(c)では、P1、P2橋脚、P1、P2支承の応答がそれぞれほぼ等しくなった。(b)、(c)を見ると、橋脚が降伏する以前ではA1、P1、P2支承のひずみが終局に向かって増大していくが、橋脚が降伏するとそれ以降の橋脚の曲率の増加率が大きくなる一方、橋脚上の支承のせん断ひずみの増加率は小さくなることを確認できる。その結果、最終的には(b)ではP1橋脚が、(c)ではP1、P2橋脚が先行して終局に至った。このときの地盤変位は、(b)では0.49m、(c)では0.70mと(b)の方が小さい値であった。(c)では断層の両側の下部構造3基同士の抵抗力が釣り合うために両者に同等の荷重が作用する。一方、(b)では断層の両側の下部

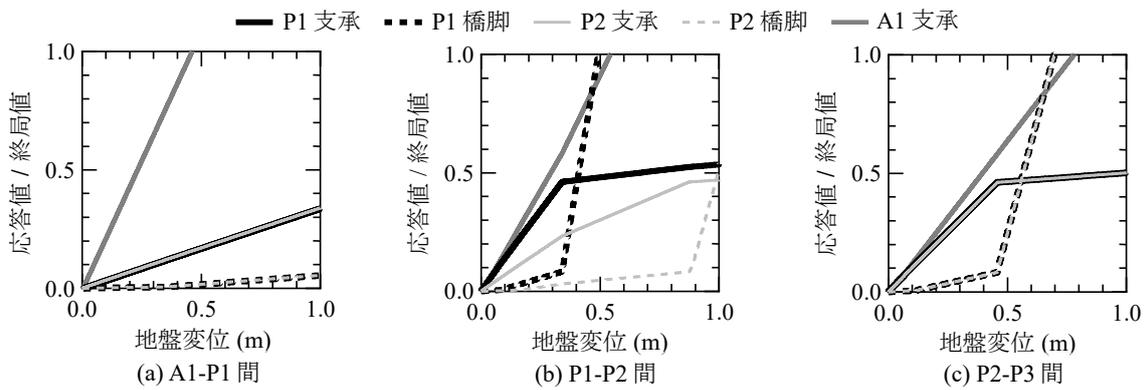


図-4 変位漸増解析結果

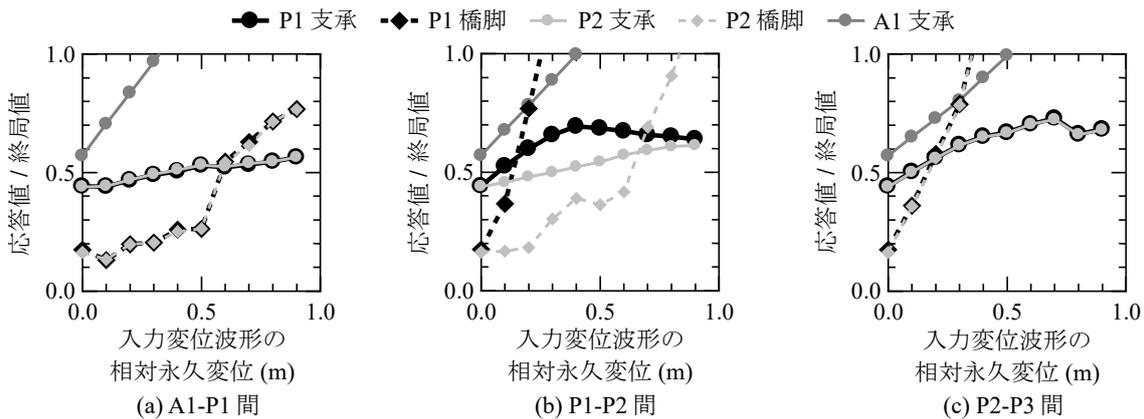


図-5 熊本の波形を入力した場合の動的解析結果

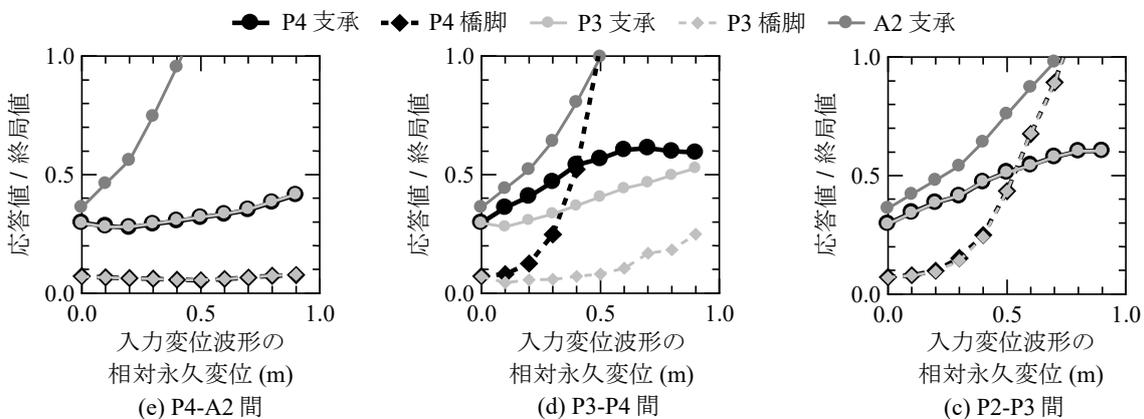


図-6 大津の波形を入力した場合の動的解析結果

構造の数が2基と4基となる。基数の少ない側のP1橋脚では負担が大きくなって先行して降伏し、塑性化が進展する。このとき荷重は降伏耐力で一定となるため、基数の多い側のP2橋脚は弾性域内に留まり続ける。

(a)では地盤変位1.0mまででは橋脚の降伏が起こらず、A1支承が最も小さい地盤変位で終局に至った。A1支承に関しても橋脚と同様の理由で負担が大きくなるため、断層位置がA1橋台に近い径間になるほど小さい地盤変位で終局に至っている。3つのケースの中で最も小さい地盤変位で終局に至ったのは(a)のA1支承で、このときの地盤変位は0.46mであった。

(2) 動的解析

熊本及び大津の波形を入力した場合の動的解析結果について、それぞれ図-5及び図-6に示す。動的解析では地震動加速度の影響が含まれるため、変位漸増解析とは異なり、断層位置(a)と(c)、(b)と(d)の応答はそれぞれ対称とはならなかった。このため、より大きい応答を示す傾向のあった部材(図-5では断層位置(a),(b),(c)のA1側の部材、図-6では断層位置(c),(d),(e)のA2側の部材)の応答値を代表として示している。終局条件は4.(1)と同様である。熊本の波形を入力した場合を見ると、変位漸増解析と同様に、(a)と(c)では、P1、P2橋脚、P1、P2支承の応答が

それぞれほぼ等しくなっている。それぞれのケースで先行して終局に至る部材や断層位置による各部材の応答における変化の傾向は、変位漸増解析と同様であった。また、(a), (b), (c)の全てで、各部材が変位漸増解析よりも小さい地盤の相対変位で終局に至っており、加速度の影響を受けて応答が大きくなっている。(a), (b), (c)の中で最も小さい相対永久変位で終局に至ったのは、変位漸増解析とは異なり、(b)の P1 橋脚であることが確認できる。終局に相当する相対永久変位は 0.2~0.3m であった。橋脚の降伏耐力は支承の終局耐力よりも低いため、橋脚が先行して塑性化して支承の応答は頭打ちになる。そのため加速度を入力した際に橋脚の塑性化が大きく進展し、支承に比べ橋脚の応答値が大きく増加したと考えられる。

大津の波形を入力した場合には、橋台上の支承は、(c), (d), (e)の全てで、熊本の場合と同様に変位漸増解析よりも小さい地盤の相対変位で終局に至った。一方で橋脚の応答を見ると、熊本の場合に比べ塑性化が進展しにくい。その結果、橋脚の終局に相当する相対永久変位は(d)では 0.5m 程度、(c)では 0.7m 程度と、変位漸増解析と同程度の地盤の相対変位で終局に至っており、大津の場合では入力変位波形の相対変位の影響を大きく受けている。図-3 を見ると、大津の場合では熊本の場合と比べ、固有周期 0.2s 以上の領域では入力波形の加速度応答スペクトルの値が小さく、応答値も小さくなったと考えられる。また、(c), (d), (e)の中で最も小さい相対永久変位で終局に至ったのは、変位漸増解析での(a)の A1 支承と対応する、(e)の A2 支承であることが確認できる。終局に相当する相対永久変位は 0.4m 程度であった。

熊本、大津の場合に共通して、先行して終局に至るような部材では、相対永久変位が大きくなるのにしたがって、部材の応答も大きくなった。図-5 と図-6 を比べると、橋脚の応答に最も大きな違いが見られることから、地震動加速度の強度や特性によって橋脚の応答が変化しやすいことが示唆される。

5. まとめ

断層の出現位置及びその変位が橋梁の地震時安全性に与える影響に関して検討を行った。また、動的解析によって加速度と断層変位の同時作用の影響についても検討を行った。得られた主な結論を以下に示す。

- 1) 断層の出現により相対変位が生じる位置や、入力する地震動加速度によって、応答が増加しやすい部材や、先行して終局に至る部材が変化する。
- 2) 断層変位と地震動加速度の両方を考慮した動的

解析では、静的な変位漸増解析や一様加速度入力をした解析よりも応答値が大きくなる傾向がある。特に橋脚は非線形挙動をする影響で応答値が大きく変化する傾向がある。

今後は、断層の両側で加速度が異なる変位波形を入力した検討、橋軸直角方向や鉛直方向の断層変位を想定した検討、断層変位対策をした橋梁の地震時安全性評価などを行う予定である。

謝辞：本研究では、防災科学技術研究所 K-NET の観測記録を利用させて頂きました。ここに記して関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 矢葦亘, 野口邦生, 真崎洋三, 越智大三: 断層変位を受ける PC ラーメン橋の耐震安全性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.1429-1434, 2003.
- 2) 大塚久哲, 古川愛子, 中村壮: 断層変位を受ける鋼斜張橋の動的解析, 土木学会地震工学論文集, 第29巻, pp.450-457, 2007.
- 3) 松永昭吾, 大塚久哲: 断層変位を受けるコンクリートアーチ橋の耐震特性, 土木学会論文集, Vol.65, No.1, pp.417-425, 2009.
- 4) Saiidi, M., Vosooghi, A., Choi, H. and Somerville, P.: Shake Table Studies and Analysis of a Two-Span RC Bridge Model Subjected to a Fault Rupture, *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, Vol.19, No.8, A4014003, 2014.
- 5) Shirahama, Y., Yoshimi, M., Awata, Y., Maruyama, T., Azuma, T., Miyashita, Y., Mori, H., Imanishi, K., Takeda, N., Ochi, T., Otsubo, M., Asahina, D. and Miyakawa, A.: Characteristics of the surface ruptures associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence, central Kyushu, Japan, *Earth, Planets and Space*, Vol.68, 191, 2016.
- 6) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, 2012.
- 7) Iwan, W. D., Moser, M. A. and Peng, C.-Y.: Some observations on strong-motion earthquake measurement using a digital accelerograph, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.75, No.5, pp.1225-1246, 1985.
- 8) Boore, D. M.: Effect of Baseline Corrections on Displacements and Response Spectra for Several Recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.95, No.5, pp.1199-1211, 2001.
- 9) 国土地理院ホームページ: <http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27-kumamoto-earthquake-index.html#3> (2018年6月13日閲覧)