

断層変位を考慮した PC 合成桁橋の応答評価 に関する一考察

松田 泰治¹・西村 孝²・梶田 幸秀³・難波 正幸⁴・内藤 伸幸⁵

¹正会員 九州大学大学院 教授 工学研究院 社会基盤部門 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)
E-mail: mazda@doc.kyushu-u.ac.jp

²学生会員 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 修士課程
(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)
E-mail: nishimura@doc.kyushu-u.ac.jp

³正会員 九州大学大学院 准教授 工学研究院 社会基盤部門 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)
E-mail: ykajita@doc.kyushu-u.ac.jp

⁴非会員 NEXCO 西日本コンサルタンツ株式会社 (〒733-0037 広島県広島市西区西観音町 17-17)
E-mail: m.nanba@w-nexco-consul.co.jp

⁵正会員 株式会社アーク情報システム (〒222-0033 神奈川県横浜市港北区新横浜 3-22-17)
E-mail: nnaito@ark-info-sys.co.jp

日本の高速道路では、地震発生から 24 時間以内に緊急車両が通行可能となるように目標設定されている。しかし、発生した地震動の特性や断層変位などの影響により、現在は地震発生直後に行う橋梁の緊急点検において点検すべき箇所を効率よく決定するのは困難である。昨年、2016 年に発生した熊本地震を受けて、道路橋示方書が活断層を考慮するように改定され、今後は、従来の耐震設計で考慮されてきた地震動に加えて、断層変位を考慮して橋梁の耐震性を検討する必要がある。本研究では、断層帯近傍の橋梁に対して、地表地震断層が生じた場合の橋梁の応答に関する検討を行うことで、断層変位が橋梁の安全性に及ぼす影響について検討を行った。

Key Words: expressway bridge, dynamic analysis, fault displacement

1. はじめに

高速道路は、日本の経済社会の大動脈を形成する重要な資本であり、過去に経験したことがないような災害が発生した場合でも、道路サービスを間断なく提供し続けるのが最大の使命である。現在、日本の高速道路では、発生した地震の規模によって、道路通行規制や点検などが実施されている。さらに、レベル 2 地震動を含む大規模地震が発生した場合でも、地震発生から 24 時間以内に緊急車両が通行可能となるように目標設定がなされている。

地震発生時の高速道路橋の被害内容は、発生した地震動の特性によって、橋脚・橋台が破損したり、上部工に亀裂が生じたり、支承部が破断したりと橋梁が受ける損傷の程度は大きく異なっている。また、1999 年台湾で発生した集集地震では、被害の多くが断層変位の影響に

よってもたらされたものもある¹⁾。今後発生する地震においても、損傷の程度は橋梁ごとで大きく異なっていることが考えられ、目視することができない地中部などの箇所においても、損傷の程度を評価することは困難である。そのために、地震発生直後に行う橋梁の緊急点検において点検すべき箇所を具体的に決めることができず、効率化や省力化が課題として挙げられる。

そのうち、断層変位という観点では、活断層のおおきたな場所はわかっているが、地震が発生したときに、どこにどのような形で地表地震断層として現れるのかは予想することは難しい。さらに、高速道路橋が断層帯を跨いでいたり、近傍にある場合において、地震が発生した際の断層変位による橋梁の被害を想定するのは、大変困難である。また、これまでも断層変位による影響を考慮した検討が行われているが^{2,3)}、高速道路橋に関する検討例は限られてくる。加えて、昨年、2016 年に発生し

た熊本地震を受けて、道路橋示方書が活断層を考慮するように改定され、従来の耐震設計で考慮されてきた地震動に加えて、断層変位を考慮して橋梁の耐震性を検討する必要がある。

本研究では、断層帯近傍の橋梁に対して、地表地震断層が生じた場合の橋梁の応答に関する検討を行うことで断層変位が橋梁の安全性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

2. 活断層および橋梁のモデル化

(1) 解析対象橋梁および活断層帯について

本解析では、広島県内に走る五日市断層帯近傍に実在する高速道路橋（図-1）を対象としている。この断層帯は既往の研究から右横ずれ断層であることがわかっている⁴⁾。この橋梁は活断層帯の真上に位置しているわけではないが、地表地震断層が橋梁の真下に出現することを

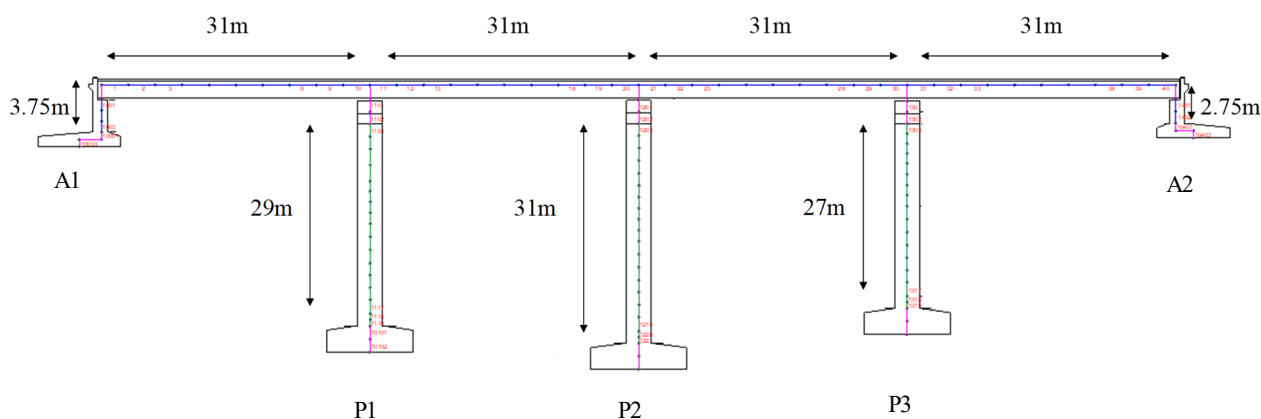


図-1 対象橋梁のモデル図

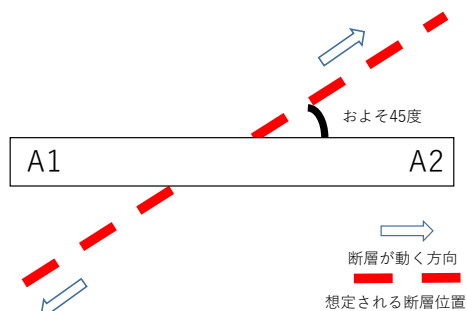


図-2 想定した断層と橋梁の位置関係

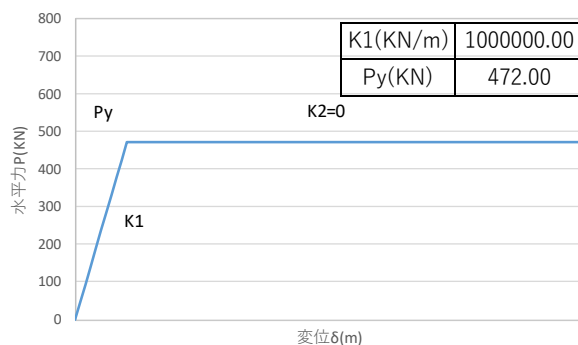


図-3 可動支承部の特性

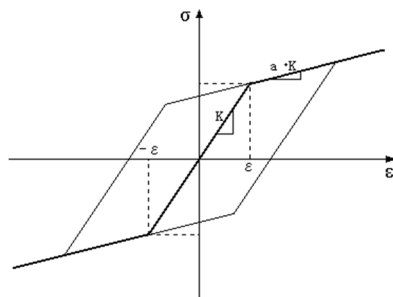


図-4 バイリニア型モデル

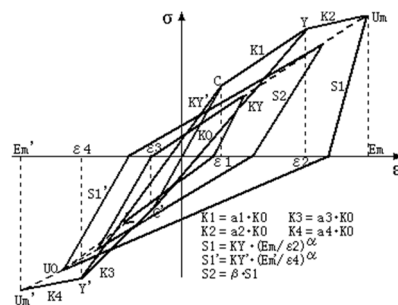


図-5 武田型モデル

想定した。また、図-2に示すように、実際は、断層帯が橋梁との間におよそ 45 度の角度を持っている。地表地震断層が図-2に示すような方向に生じると、橋軸方向に圧縮の強制変位が起こる。さらに、橋軸直角方向に回転が生じ、3 次元的に検討を行う必要がある。しかし、今回は、地表地震断層が生じた場合に、橋梁の安全性評価において最も厳しいとされる、図-1に示すモデルの橋軸方向に対して圧縮方向の受ける力を想定した検討を行うこととした。

(2) モデル化

本橋は、鋼製支承を有する 4 径間連続 PC 桁橋であり、解析モデルは図-1に示す。A1 および A2 の支承部は可動支承で、P1、P2、P3 の支承部は固定支承である。可動支承部の特性は図-3に示す。支間長は 31m、A1 の高さは 3.75m、P1 の高さは 29m、P2 の高さは 31m、P3 の高さは 27m、A2 の高さは 2.75m、地盤条件は I 種地盤である。対象橋梁のモデル化に際して、固定支承部は線形バネ要素で、可動支承部は非線形バネ要素で、橋脚部は非線形はり要素で、桁は線形はり要素でモデル化を行っており、フーチング下端には水平、鉛直、回転を考慮した 3 方向の地盤バネを用いている。バネの非線形特性は、図-4に示すようにバイリニアモデルを採用し、はりの非線形特性は図-5に示すように武田型モデルを採用した。減衰定数については、支承部のバネ要素を 0%、主桁を 3%、橋脚を 2%、地盤バネ要素を 10%とした。

3. 解析手法

(1) 断層変位を考慮した解析

解析モデルは、図-1に示すものである。本検討では、断層変位を考慮するにあたり、図-2より圧縮方向に断層が動くことを想定しており、最終的な断層の変位量を A1-A2間で引き起こされる変位量とした。そこで、A1側を固定とし、A2側で最終的な変位量を決めるものと仮定して、A1、P1、P2、P3 では線形的に補間することで単純なパターン化して、解析を行うこととした。また、圧縮方向に力を作用させるために、図-6の左側矢印方向に一定で増加する強制変位を与える解析を行った。解析ケースとしては、A2側での最終的な変位量を 2.0m とした。そのため、最終的な変位量としては、A1-P1間で 0.5m、A1-P2間で 1.0m、A1-P3間で 1.5m、A1-A2間 2.0m としている。さらに、強制変位を与え始めてから最終的な変位に到達するまでの載荷時間に差異を与えるために 10 秒、100 秒、1000 秒とした。

(2) 地震動および断層変位を考慮した解析

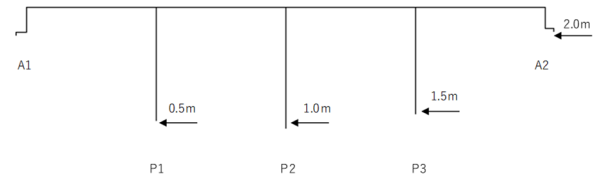


図-6 断層変位を考慮した解析の入力方向について

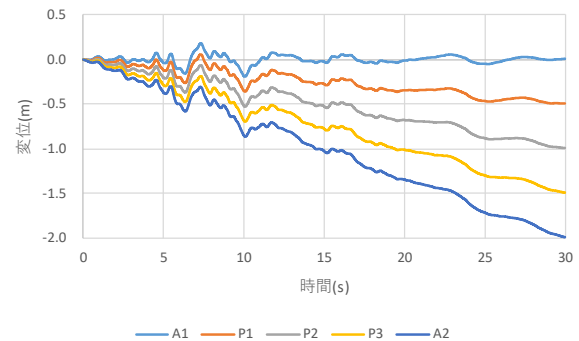


図-7 地震動と断層変位を考慮した解析で用いた変位波形

同様の解析モデルを用いて、地震動および断層変位を考慮したときの橋梁への影響を評価・検討するために、各基部で最終的な変位の異なる変位波形を入力して解析を行った。

変位波形を作成するにあたり、今回は道路橋示方書⁹⁾に示された設計地震動である I 種地盤に対する加速度応答スペクトルの適合波形（タイプⅡ－Ⅰ－1、タイプⅡ－Ⅰ－2、タイプⅡ－Ⅰ－3）の 3 つの波形を積分することで算出した。積分を行うにあたり、周波数フィルタリングにより、長周期成分をカットした。積分して算出した波形を、図-7に示す。A2側で最終的な変位量を決めるものと仮定し、A1、P1、P2、P3 では線形的な補間により加工した波形を作成し、それぞれの波形を入力することで、断層変位を考慮した解析を行った。また、加速度応答スペクトルの適合波形のみを用いて解析を行った。

4. 解析結果

(1) 断層変位を考慮した解析

強制変位を与えて 10 秒、100 秒、1000 秒で解析を行った結果のうち、代表例として、A2 の上部工における応答加速度の時刻歴図を図-8に示し、応答加速度の最大値を表-1に示す。なお、100 秒、1000 秒の時刻歴図に関し

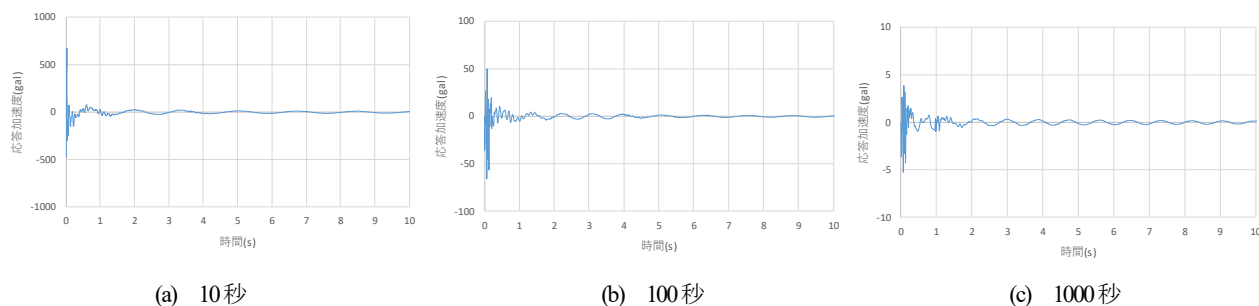
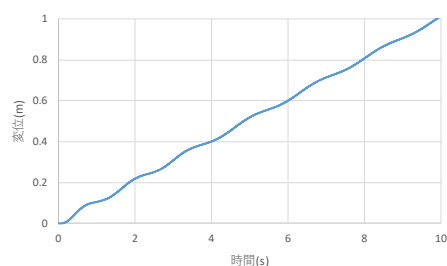


図-8 断層変位を考慮した解析の10秒間の応答加速度の結果（A2側の上部工）

表-1 断層変位を考慮した解析の応答加速度の大きさ (gal)

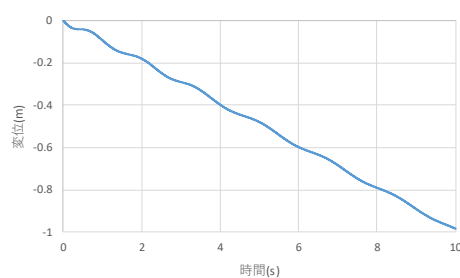
	A1	P1	P2	P3	A2
10秒	-266.55	-259.90	-339.52	466.74	676.52
100秒	-42.97	-45.65	-51.71	-41.99	-65.59
1000秒	-4.39	-4.81	-5.21	-5.80	-5.26



(a) A1 支承部

表-2 断層変位を考慮した解析の上部構造と地盤の最終的な相対変位(m)

	A1	P1	P2	P3	A2
10秒	-1.014	-0.514	-0.015	0.484	0.983
100秒	-1.006	-0.506	-0.007	0.492	0.992
1000秒	-1.006	-0.506	-0.007	0.492	0.992



(b) A2 支承部

図-9 断層変位を考慮した解析の支承部の時間変位関係（10秒）

ては、強制変位を入力し始めてから10秒間の応答を示している。この3つのケースで、いずれも入力から1秒ほど経過すると応答値が一定の値に収束していくことも確認できる。そのため、図-8では、解析を始めてから10秒間の応答のみとした。この原因として、線形的に変位を増加させていることが挙げられる。また、図-8および表-1に示す3つのケースで、強制変位の入力開始から終了までの载荷時間と応答値の大きさがほぼ反比例することがわかり、载荷時間を長くするほどに、応答加速度の影響が小さくなっていることが確認できる。次に、図-9に、10秒間の強制変位入力を加えたときの可動支承部の時間と変位の関係図を代表例として示す。この結果から、A2では、地盤からの力を受けたことで支承部が破壊した可能性が考えられる。一方で、A1では、ほかの橋脚が地盤から受けた力によって、A1支承部が上部工から図-8の左方向に力を受けたことで破壊した可能性があると考えられる。また図-8から、A1とA2でほぼ対称の損傷が発生していることがわかる。さらに、応答曲率を要素ごとに図-10に示す。なお、橋脚の高さとは、上

部構造を0mとしたときの各橋脚の要素の座標位置であり、線形的に変位を加えていったので、A2における変位入力の値が0.5m、1.0m、1.5m、2.0mのときの応答値を示している。P1では、10秒および1000秒で解析を行った場合、すべての要素で1.0mと1.5mのときの応答値がほとんど同じであった。橋脚基部付近を除くと1.0m、1.5m、2.0mの3ケースの応答値もほとんど同じであった。しかし、橋脚基部付近では、2.0mの変位を受けた際に応答値が大きくなり、許容値を超える応答が得られた。1000秒で解析を行った場合、1.0mと1.5mのときの応答値に違いが見られており、1.5mの変位を受けた場合でも、許容値付近の大きな応答が得られている。P2では、いずれの場合でも、応答値が線形的に増加しているが、降伏値には達していない。10秒で解析を行った場合は、変位の値によって応答値に違いが生じているが、

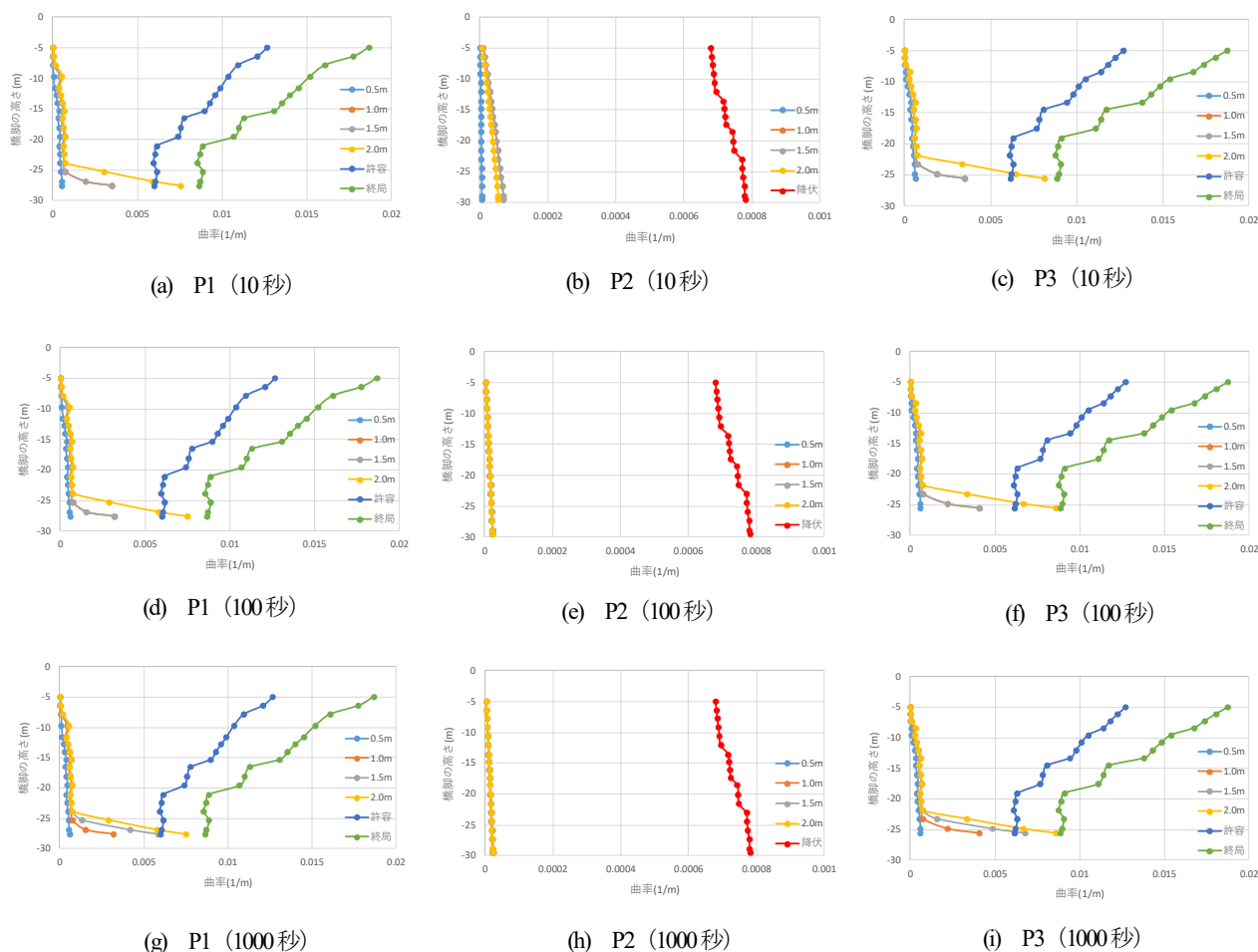


図-10 断層変位を考慮した解析を行ったときの応答曲率

100秒や1000秒で解析を行った場合は、変位の値によらずほぼ同じ値をとっていることが確認できる。この原因として、表-2に示す相対変位の値がP2では、小さいことが挙げられる。P3では、P1と同様の傾向が見られ、橋脚基部付近で変位の値によって応答値にばらつきが生じている。P1と比べるとP3のほうが応答値が大きくなっている。ここで、橋脚基部付近における応答値が大きくなる原因としては、塑性化する際に剛性が著しく低下するトリリニア型を採用しているために、塑性化して大きな力がかかっているためであると考えられ、危険域に達する可能性があることがわかる。さらに、今回は線形バネを用いてモデル化した固定支承部の応答を調べると、支承部は破壊していなかった。この原因としても、橋脚基部の塑性化が挙げられる。表-2には、上部構造と地盤面の最終的な相対変位を示している。全体を通して、10秒で解析を行ったときが最も大きい応答を示し、100秒と1000秒では、応答が同じであった。応答が同じ値を示した原因としては、発生する応答加速度の大きさが影響を与えていると考えられ、100秒と1000秒では応答

加速度の差異が相対変位に与える影響はなかった。また、線形補間を行って変位入力を行ったために、P2においては、相対変位がほとんど発生せず、P2を基準としておおよそ左右対称の形になっていることが確認できた。このため、P1やP3と比較して、P2では、損傷の程度が低くなることが示された。

(2) 地震動および断層変位を考慮した解析

作成した変位波形を用いて地震動および断層変位を考慮した解析を行った結果のうち、代表例として、A2の上部工における応答加速度の時刻歴図を図-11に示し、地震動のみを用いて解析を行った結果のうち、同様の結果を図-12に示す。地震動および断層変位を考慮した解析では、3波ともに解析開始点近傍で、応答値が大きくなる傾向にある。また、地震動のみを用いて解析を行った方が応答値の最大値は大きくなる傾向にある。しかし、図-11の解析開始点近傍を除いて、加速度レベルで比較すると、ほぼ同程度の応答が見られていることが確認で

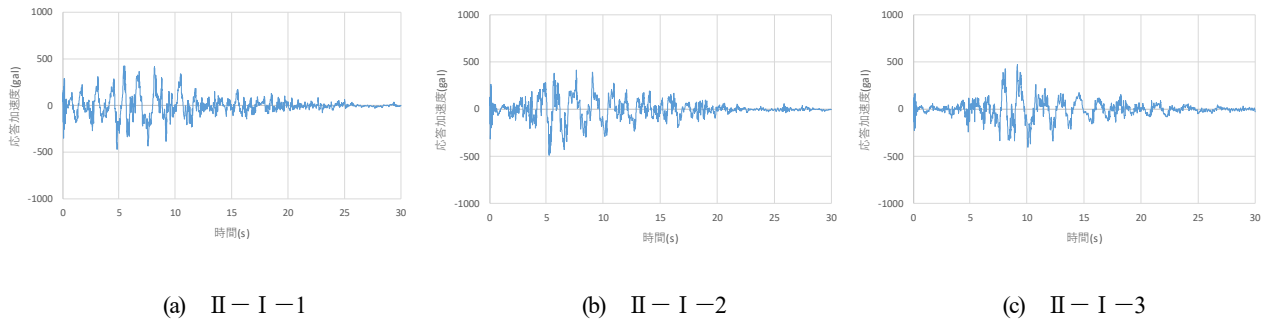


図-11 地震動および断層変位を考慮した解析の応答加速度の結果（A2側の上部工）

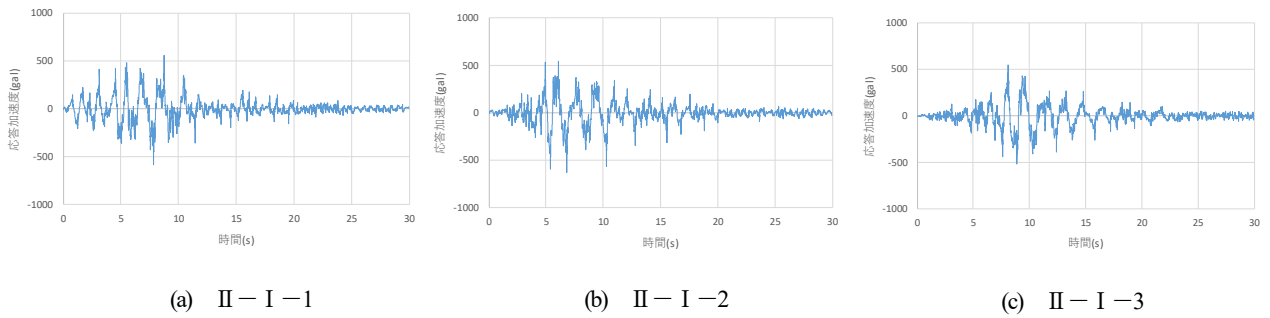


図-12 地震動のみを用いた解析の応答加速度の結果（A2側の上部工）

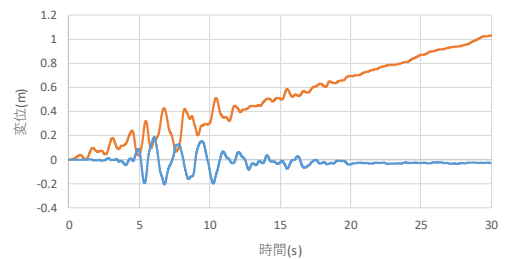
表-3 地震動および断層変位を考慮した解析の上部構造と地盤の最終的な相対変位(m)

	A1	P1	P2	P3	A2
II-I-1	-1.034	-0.534	-0.035	0.464	0.963
II-I-2	-0.993	-0.493	0.006	0.504	1.004
II-I-3	-1.047	-0.547	-0.048	0.451	0.951

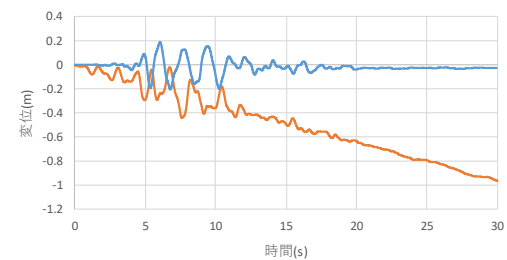
表-4 地震動のみを用いた解析の上部構造の変位(m)

	A1	P1	P2	P3	A2
II-I-1	-0.248	-0.248	-0.247	-0.247	-0.248
II-I-2	0.205	0.204	0.204	0.204	0.204
II-I-3	-0.217	-0.217	-0.217	-0.216	-0.216

きる。次に、図-13にタイプII-I-1を積分することで得られた変位波形を用いた解析および同地震動のみを用いた解析の結果の可動支承部の時間変位関係を代表例として示す。断層変位のみを考慮した解析の結果と比較して、支承部が入力波形と同様の応答を示している。地震動と断層変位を考慮した解析では、A1、A2両方の支承部ともに入力した波形による影響で破壊した可能性があると考えられる。また、地震動のみを用いた解析結果と比較すると変位の影響を受けて変形していることが確認



(a) A1 支承部



(b) A2 支承部

図-13 地震動および断層変位を考慮した解析と地震動のみの解析の支承部の時間変位関係（II-I-1）

できる。さらに、地震動と断層変位を考慮した解析の応答曲率を要素ごとに図-14に示し、地震動のみの場合を図-15に示す。P1では、地震動と断層変位を考慮した解

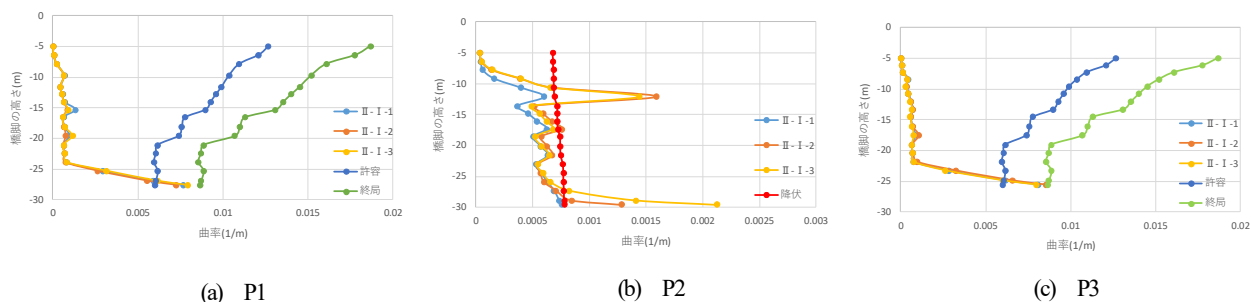


図-14 地震動および断層変位を考慮した解析を行ったときの応答曲率

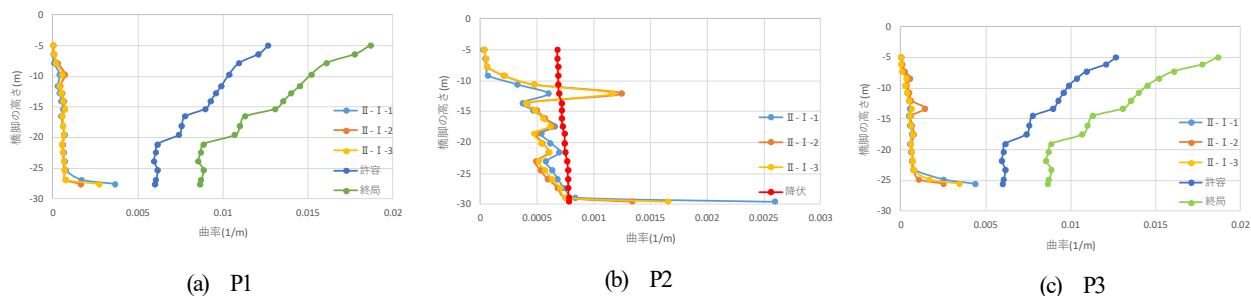


図-15 地震動のみを用いて解析を行ったときの応答曲率

析において、用いた3つの波形による顕著な応答の変化が表れなかった。いずれの波形を用いた場合でも、橋脚基部付近において、応答値が著しく大きくなっており、許容値を超える値を得られていることが確認できる。一方で、地震動のみを用いた場合、3波ともに橋脚基部付近においても許容値を超えるような応答は示さなかった。また、図-10の断層変位のみを考慮した場合の応答値と比較して、図-14の応答値は大きくなっており、P1では、地震動のみのケース、断層変位のみのケース、地震動と断層変位を考慮したケースの順に応答値が大きくなっていることが確認できる。このため、P1では、断層変位を考慮したことが応答結果に大きく影響を与えていることが考えられる。P2では、地震動と断層変位を考慮した解析において、3つの波形でケースごとに違いが表れた。タイプII-I-2およびタイプII-I-3の変位波形を用いた場合に、上部構造からおおよそ12m下部において、降伏値を超える値が得られた。しかし、タイプII-I-1の変位波形を用いた場合では、降伏値を超えることはなかった。また、橋脚基部付近においても、タイプII-I-1の場合のみ降伏値を超えていなかった。一方で、地震動のみを用いた場合もほぼ同様な応答が見られた。P1同様に、図-10と比較して、P2では、断層変位のみを考慮したケースが最も応答が小さくなっていることが確認できる。この原因として、P2においては、表-2と表-3に示すように、断層変位による影響がほとんどなかったことが考えられ、地震動による影響が大きい

ことが考えられる。P3では、P1と同様の傾向が見られるが、P3のほうがP1と比べると応答値が大きい。このことから、P1やP3では、断層変位を考慮することで、地震動のみを用いて行った解析と比べ、特に橋脚基部付近で、塑性化が進んで応答が大きくなっていたことが考えられる。しかし、P2においては、断層変位の影響が顕著に表れなかった。加えて、断層変位を考慮することでP1やP3の応答値は橋脚基部において、危険域に達する可能性があることが示された。表-3には、上部構造と地盤面の最終的な相対変位を示し、表-4に地震動のみの解析の最大変位を示している。表-3から用いた3波によって、相対変位に差が生じているが、表-4では最大変位が各橋脚でほとんど同じであった。断層変位を考慮したことで、P2においては、相対変位がほとんど発生せず、P2を基準としておおよそ左右対称の形になっていることが確認できた。

5. まとめ

本解析では、断層帯近傍に実在する橋梁をモデル化して、地表地震断層が生じた場合に、橋軸方向に発生する圧縮力に焦点を当て、橋梁の応答に関する検討を行うことで断層変位が橋梁の安全性に及ぼす影響について検討した。今回得られた知見を以下に示す。

(1) 断層変位を考慮した解析において、A1, A2 支承部の時間変位関係から、両方の支承部が破壊している可能性がある。また、最終的に 1.5m 以上の変位を与えた場合に、P1, P3 の橋脚基部が許容値を上回り大きく塑性化していることが示唆された。一方で、P2 は橋梁の対称性から断層変位の影響をほとんど受けていないことが確認できた。

(2) 地震動と断層変位を考慮した解析において、断層変位のためのケースと同様に、A1, A2 支承部の時間変位関係から、両方の支承部が破壊している可能性がある。また、P1 と P3 では、橋脚基部が許容値を上回り大きく塑性化していることが示された。P2 において、断層変位に加えて地震動の影響を受けることで、損傷は進展しているが、橋梁の対称性により、ほかの橋脚と比べて損傷の程度は低くなること可能性が高いことが示された。

(3) 地震動と断層変位を考慮した解析と地震動のみの解析結果から、断層変位を考慮することで、支承部が変位の影響を受けて、変形量が 5 倍程度になることが示された。また、断層変位を考慮することで、P1 と P3 では、橋脚基部が許容値を上回り大きく塑性化してしまうが、P2 では、橋梁の対称性から断層変位の影響を受けにくくなることが原因で応答値に大きな影響はないことが確認できた。P1 と P3 では損傷の度合いが大きくなることが示された。

今後は、橋軸直角方向や鉛直方向における断層変位を考慮した検討や橋軸方向と橋軸直角方向の両方の影響を考慮した検討などを行う予定である。

謝辞：本研究では、NEXCO 西日本コンサルタンツ株式会社の橋梁のデータを使用しました。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) 九州大学建設振動工学研究室：921 集集地震(台湾)被害調査報告書，2000
- 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，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，Vol65, No.1, pp417-425，2009
- 4) 丸山正：広島湾における五日市断層帯延長部の活動性調査，活断層・古地震研究報告，No.11, pp197-226，2011
- 5) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，2002

A STUDY ON SEISMIC RESPONSE EVALUATION FOR PC COMPOSITE GIRDER BRIDGES CONSIDERING FAULT DISPLACEMENT

Taiji MAZDA, Takashi NISHIMURA, Yukihide KAJITA, Masayuki NANBA and Nobuyuki NAITO

In Japan's expressway, even if the large scale earthquake of level 2 occurs, it is required that emergency vehicles can pass through within 24 hours. However, due to the characteristics of the earthquake motions and the effects fault displacement, it is difficult to determine the part which should be inspected immediately in the emergency check of the bridge after an earthquake. Last year, in response to the Kumamoto earthquake that occurred in 2016, specifications for highway bridges was revised to consider active faults. In addition to the earthquake ground motions that have been considered in the conventional seismic design, it is necessary to consider the earthquake resistance of the bridge considering the fault displacement from now on. In this study, the influence of the fault displacement on the safety of the bridge is investigated by examining the response of the bridge when the ground earthquake fault occurs to the bridge near the fault zone.