

曲線橋の回転方向地震応答の影響 に関する動的解析

新井 大輔¹・党 紀²

¹ 学生正会員 埼玉大学大学院 理工学研究科 (〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255)

E-mail: d.rai.755@ms.saitama-u.ac.jp

² 正会員 埼玉大学 大学院理工学研究科 環境科学・社会基盤部門 (〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255)

E-mail: dangji@mail.saitama-u.ac.jp

2016 年に発生した熊本地震では、一部の橋梁では、橋台への衝突、ゴム支承のサイドブロックの破壊、ゴム支承の橋軸直行方向の歪み、フィンガージョイントのかけ違いなどの損傷外観が見られ、橋軸方向や橋軸直交方向の 2 方向応答のみならず、水平面上の回転変形も生じていた痕跡やそれによる地震被害も見られていた。これまでの耐震性能評価では、復元力特性を橋軸方向または橋軸直交方向もしくは弱軸方法などで行われてきたが、回転変位による変形やその応答を考慮されていいない。本研究では、熊本地震で被害を受けた扇の坂橋を解析対象として、水平 2 方向の設計地震波を同時に与えることによる曲線橋の応答特性の把握、及び回転変位の影響力を調べる。また、フィンガージョイントの考慮の有無が、どのように影響を及ぼすかについても解析を行う。

Key Words: 耐震性能評価, 曲線橋, モーメント, 振動解析

1. はじめに

現行の道路橋示方書¹⁾では多方向からの慣性力が同時に最大を取る可能性が低いことから、構造物の耐震性能については、1 方向地震動波形を、橋軸方向及び橋軸直交方向を含む、複数の方向へ独立入力によって照査を行う。しかし、実際の地震動は 3 次元的で複雑な振動であり、構造物に対する鉛直方向の作用の影響を無視しても、水平 2 方向の同時作用については考慮する必要がある²⁾。水平 2 方向へ同時に地震動が作用される場所では、終局状態を含む弾塑性挙動や局部座屈による複合非線形挙動など、現在の性能評価ではその相互作用が考慮されていない。

1 方向地震動入力による評価には、構造の弱軸方向への解析が必須である。しかし、日本は起伏に富んだ地形をしており、曲線橋が格段に多い。しかし曲線橋の場合では、設計地震波を橋軸方向やその直交方向入力する解析だけでは十分ではなく、橋全体の各部材にそれぞれ最も不利な入力方向を定めることは容易ではない。これらの方向が橋脚断面と直交しないケースも少なくない。以上のことから、構造

物の振動に対するより正確な応答を調べるに、2 方向震動に対する耐震性能の評価について考える必要がある。

2016 年に発生した熊本地震では、震度 7 の地震が 2 度起きるなどして、支承やフィンガージョイントの被害が多くみられる。フィンガージョイントとは、橋桁と橋台のつなぎ目にあたる部分に、ジグザグにカットされた部材同士を噛合わせることで、橋軸直角方向の変位を拘束、橋軸方向にはある程度の変位を自由に可動できる仕組みになっている。この地震では一部の橋梁が真上から見た際に、反時計回りに回転しているかのような残留変位が残されている。これらは、その残留変位に落ち着いているわけではなく、フィンガージョイントの凹凸のかけ違いによって、拘束されている状態であり、各橋脚の支承では変位と復元力が残ったままである。つまり、重心の位置が変わらず、橋梁全体としては水平 2 方向復元力が発生していないにもかかわらず、別の復元力が発生しているのである。

これまでの耐震性能評価では、復元力特性を x 方向・ y 方向の 2 種類のみで行われてきたが、回転変位

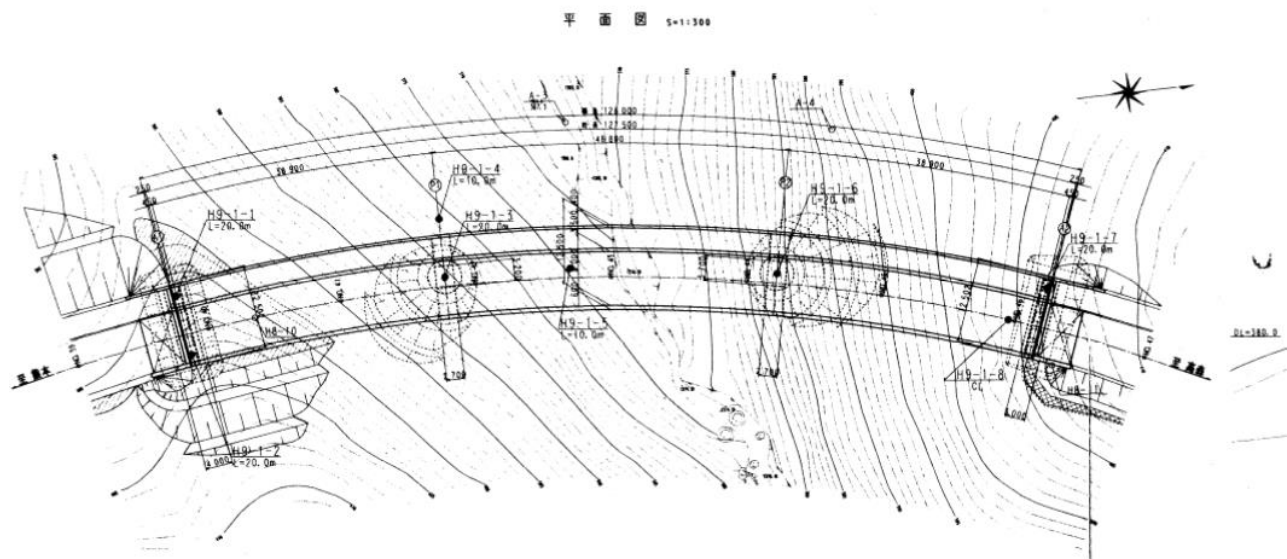


図-1 扇の坂橋全体図⁴⁾

表-1 解析対象パラメータ

	A1 橋台	P1 橋脚	P2 橋脚	A2 橋台
弾性ばね定数(kN/m) $k_i = (k_{xi} = k_{yi})$	1007.2	4822.6	7233.9	1007.2
扇中心からの x 方向距離 (m) x_i	243.06	249.43	249.43	243.06
扇中心からの y 方向距離 (m) y_i	-60.32	-22.41	22.41	60.31
橋梁重心からの x 方向距離 (m) xx_i	-4.65	-1.72	1.72	4.65
橋梁重心からの y 方向距離 (m) yy_i	-60.32	-22.41	22.41	60.32
支承数	5	5	5	5
フィンガージョイント剛性 (kN/m)	5036.0			5036.0
2 次剛性比 α	0.1		扇半径 (m)	256.68
橋長 (m)	126		橋桁幅 (m)	12.5
橋桁質量 m1(kg)	4.11×10^5		減衰比 h1	0.05

によるモーメントの復元力の考慮も必要とされている。

本研究では、橋軸方向が安定しない曲線橋に対して、水平 2 方向の設計地震波を同時に与えることによる曲線橋の応答特性の把握、及び水平 2 方向地震動を入力した際に発生する、回転変位の影響力、また、フィンガージョイントの考慮の有無による、応答特性の差について調べる。

2. 解析対象

本研究は、熊本県熊本市に存在する扇の坂橋(熊本地震の際、回転型の残留変位が発生した橋梁)を対象にモデル化を行い、ニューマーク β 及び予測子修正子法を用いて解析を行う。

解析対象となる扇の坂橋は、図-1 に示すような、橋

長 126m 支間長 38.9m+48.8m+38.9m からなる 3 径間連続曲線橋であり、桁端と橋台の斜角は 90° の直橋である。また、この曲線橋を 1 つの扇形の弧としてみた場合の中心角は 28.1° 半径は 256.7m である解析では、扇型の中心と橋梁の重心を通る直線を x 方向正とし、それを 90 度左に傾けた方向を、y 方向正とする

本解析では橋台・橋脚の変位は考慮せず、橋台・橋脚の基部と橋桁の支承接合部との変位差は支承変位のみによって発生する。橋梁の上部構造(橋桁・付属品など)を 1 つの質点と見なし、その質点の変位・回転から各橋台・橋脚の支承変位を求める。また、ゴム師匠の変位-復元力モデルには、バイリニアモデルを用いる。

解析に必要なパラメータを表 1 に示す。

3. 解析手法

使用する地震動は扇の坂橋付近で観測された熊本地震の波形、及びレベル2地震動Ⅱ種地盤タイプ2の設計地震波の2種である。

解析には、予測子修正子法及びニューマークβ法(β=1/6)を用いる。なお、比較のため回転変位を考慮する場合と考慮しない場合の2種類の解析を行う。それぞれの解析のモデルを図2に示す。

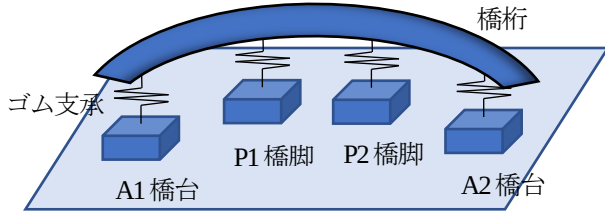


図-2 解析モデル

(1) 回転が発生しない場合

重心の変位 d から、橋軸を正とした各支承の変位 u_i を以下のように求める。

$$\begin{bmatrix} u_{xi} \\ u_{yi} \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} (i = 1 \sim 4) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 θ_i は、 x 軸方向と支点 i における橋軸直行方向の差を表し、 $\cos \theta_i = x_i/R$ 、 $\sin \theta_i = y_i/R$ で求められる。

また、反力 $[F]$ は各支承変位 $[u]$ と剛性 $[\hat{K}]$ を用いて以下のように求められる。ただし、ここで剛性 $[\hat{K}]$ は、復元力が降伏荷重に達していない場合には一次剛性の値を、降伏荷重に達している場合には2次剛性の値を用いる。

$$\{f\} = \begin{Bmatrix} f_{x1} \\ f_{y1} \\ f_{x2} \\ f_{y2} \\ f_{x3} \\ f_{y3} \\ f_{x4} \\ f_{y4} \end{Bmatrix} = [\hat{K}]\{u\} =$$

$$\begin{bmatrix} [K]_1 & & & \\ & [K]_2 & & \\ & & [K]_3 & \\ & & & [K]_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{x1} \\ u_{y1} \\ u_{x2} \\ u_{y2} \\ u_{x3} \\ u_{y3} \\ u_{x4} \\ u_{y4} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

修正子に用いる復元力 R は、各支点の反力を合計し、以下のように求めることができる。

$$R_x = \sum f_{xi} \cos \theta_i + f_{yi} \sin \theta_i = \sum F_{xi} \quad (3.a)$$

$$R_y = \sum -f_{xi} \sin \theta_i + f_{yi} \cos \theta_i = \sum F_{yi} \quad (3.b)$$

ここで F_{xi} 、 F_{yi} は各質点の反力を、 $k_{xi}k_{yi}$ は各支点での剛性を、 θ_i は座標軸と橋軸方向の角度の差を表す。

次に、解析に必要な、質量マトリクス M 減衰係数 C 剛性マトリクス K を求める。質量マトリクス M は桁質量で表し、剛性マトリクス K は各支承の剛性の合計、減衰係数 C はモード減衰の定義式から、以下のように求められる。

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_1 \end{bmatrix} (kg) \quad (4)$$

$$K = \begin{bmatrix} \sum k_{xi} & 0 \\ 0 & \sum k_{yi} \end{bmatrix} (N/m) \quad (5)$$

$$C = 2 \times h_1 \times \sqrt{\frac{k}{m_1}} \times M = (N/(m/s)) \quad (6)$$

(2) 回転が発生する場合

重心の変位 d から、橋軸を正とした各支承の変位 u_i を以下のように求める。

$$\begin{bmatrix} u_{xi} \\ u_{yi} \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} (i = 1 \sim 4) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & -xx_i \sin \theta_i + yy_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & xx_i \cos \theta_i + yy_i \sin \theta_i \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ \phi \end{bmatrix} \quad (7)$$

ここで、 ϕ はそのステップでの回転角を表す。

また、反力 $[F]$ は各支承変位 $[u]$ と剛性 $[\hat{K}]$ を用いて以下のように求められる。ただし、ここで剛性 $[\hat{K}]$ は、復元力が降伏荷重に達していない場合には一次剛性の値を、降伏荷重に達している場合には2次剛性の値を用いる。

$$\{f\} = \begin{Bmatrix} f_{x1} \\ f_{y1} \\ f_{x2} \\ f_{y2} \\ f_{x3} \\ f_{y3} \\ f_{x4} \\ f_{y4} \end{Bmatrix} = [\hat{K}]\{u\} =$$

$$\begin{bmatrix} [K]_1 & & & \\ & [K]_2 & & \\ & & [K]_3 & \\ & & & [K]_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{x1} \\ u_{y1} \\ u_{x2} \\ u_{y2} \\ u_{x3} \\ u_{y3} \\ u_{x4} \\ u_{y4} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

$$[K]_i = \begin{bmatrix} k_{xi} & 0 \\ 0 & k_{yi} \end{bmatrix} \quad (9)$$

(k_{xi} :x 方向剛性, k_{yi} :y 方向剛性)

ここで, f_i は橋軸を基準とした支点 i での反力, F_i は全体座標を基準とした支点 i での反力, を表す.

以上より各支点 i で変位 d_i が起きた際, 修正子に用いる復元力 R 及び M は, 各支点の反力を合計し, 以下のように求めることができる.

$$R_x = \sum f_{xi} \cos \theta_i + f_{yi} \sin \theta_i = \sum F_{xi} \quad (10.a)$$

$$R_y = \sum -f_{xi} \sin \theta_i + f_{yi} \cos \theta_i = \sum F_{yi} \quad (10.b)$$

$$M = \sum yy_i F_{xi} + xx_i F_{yi} \quad (10.c)$$

次に, 解析に必要な, 質量マトリクス M 減衰係数 C 剛性マトリクス K を求める. 質量マトリクス M は桁質量で表し, 剛性マトリクス K は各支承の剛性の合計, 減衰係数 C はレイリー減衰の定義式から, 以下のように求められる.

$$M = \begin{bmatrix} m1 & 0 & 0 \\ 0 & m1 & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} = (kg) \quad (11)$$

ここで, I は全体の回転モーメントを表す. 橋桁を 100 要素に分割し, それぞれの要素で質量

($m1/100$), 重心までの距離(r)からモーメントを算出し, その合計を以下の式のように求める.

$$I = \frac{m1}{100} \sum r_i^2 \quad (12)$$

$$K = T_1 \cdot [\hat{K}] \cdot T_2 \quad (N/m) \quad (13)$$

ここで, T_1, T_2 は置換行列を表し, 以下のように定義される.

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ yy_1 & xx_1 & yy_2 & xx_2 & yy_3 & xx_3 & yy_4 & xx_4 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & yy_1 \\ 0 & 1 & xx_1 \\ 1 & 0 & yy_2 \\ 0 & 1 & xx_2 \\ 1 & 0 & yy_3 \\ 0 & 1 & xx_3 \\ 1 & 0 & yy_4 \\ 0 & 1 & xx_4 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$C = \alpha[M] + \beta[K] = \frac{2w_1w_2(h_1w_2 - h_2w_1)}{w_2^2 - w_1^2} [M] + \frac{2(h_2w_2 - h_1w_1)}{w_2^2 - w_1^2} [K] \quad (N/(m/s)) \quad (16)$$

(3) フィンガージョイント

1 章でも述べた通り, 橋梁には, 振動抑制のためのフィンガージョイントが設置されている. この橋梁のフィンガージョイントには, 遊間(ul)が設けられており, それを超える変位が発生したときのみ反力 f_j が発生する. このことを式に表すと以下ようになる. なお, ここで用いられている変位 u は, 橋桁が橋台に向かって変位していく方向を正としている.

$$f_j = \begin{cases} K_j \cdot u & (u > ul \text{ のとき}) \\ 0 & (u \leq ul \text{ のとき}) \end{cases} \quad (17)$$

解析においてこの反力は, 式(2)及び式(8)の橋台の x 方向支承反力 $f_{x1}f_{x4}$ に加算される.

4. 解析結果

応答解析の結果を図 3~10 にまとめる. なお, 回転を考慮しない解析結果を実線, 回転を考慮した結果を破線で表す. なお, 図タイトルに示す(FJ 無)とは, フィンガージョイントを考慮しない解析結果であり, (FJ 有)とはフィンガージョイントを考慮した解析結果である.

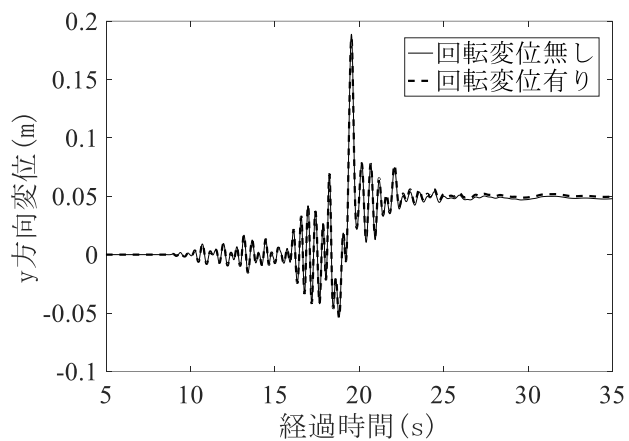


図-3 熊本地震EW方向変位(FJ無)

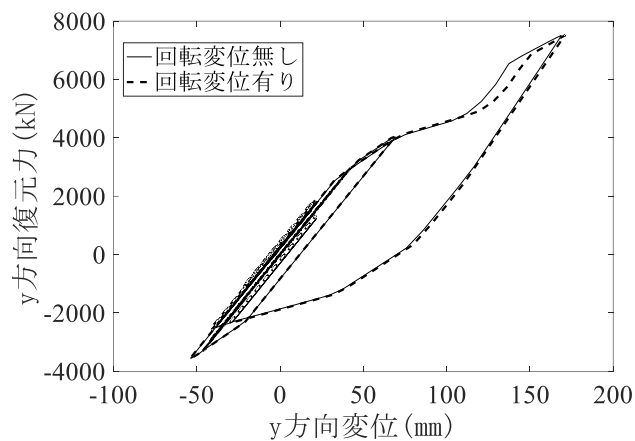


図-6 熊本地震EW方向復元力(FJ有)

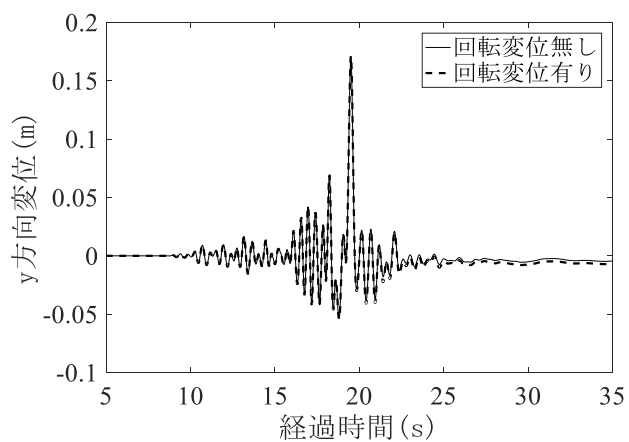


図-4 熊本地震EW方向変位(FJ有)

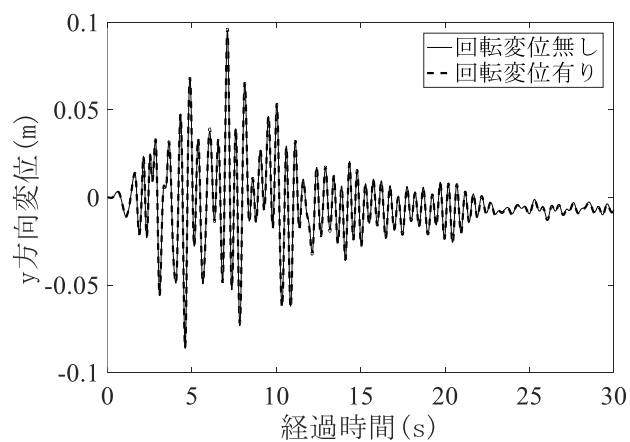


図-7 JRT EW 方向変位(FJ無)

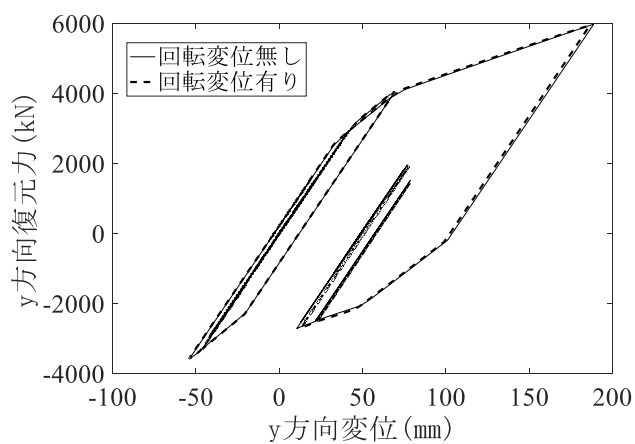


図-5 熊本地震 EW 方向復元力(FJ無)

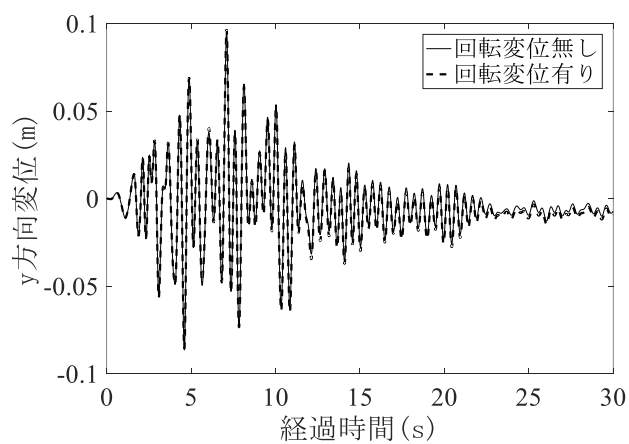


図-8 JRT EW 方向変位(FJ有)

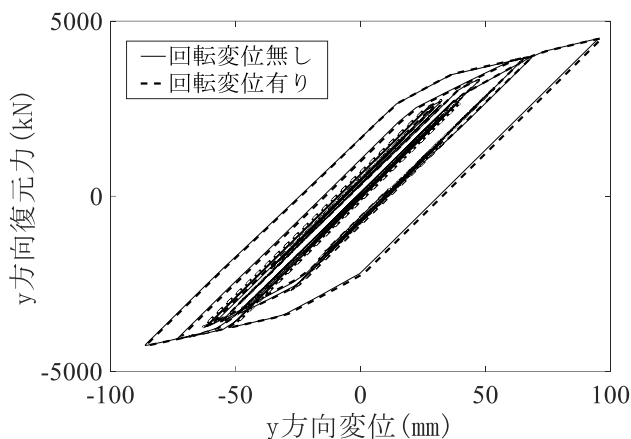


図-9 JRT EW方向復元力(FJ無)

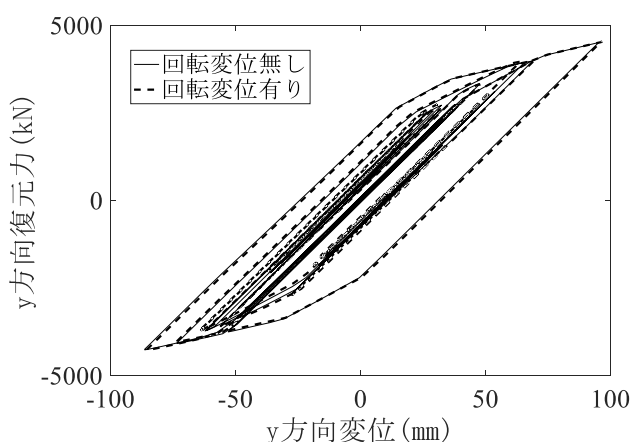


図-10 JRT EW方向復元力(FJ有)

解析の結果より、回轉變位の考慮の有無による変位差、復元力の差はあまり見られない。なお、これらは重心の応答値であるため、回転による変位の修正は存在せず、あくまで回轉變位の考慮の有無による振動特性および最大変位の応答差である。重心から離れた位置に存在する橋台などは、回転による変位の修正が入るため、応答差はより顕著なものになる。

フィンガージョイントの有無による差異については、設計地震波を用いた解析においては、変位・復元力ともに大きな差異は見られなかったが、熊本地震を用いた解析結果においては、大きな差異が存在した。まず、フィンガージョイントを考慮しない際に発生していた残留変位が消失している。次にフィ

ンガージョイントを考慮しない場合の復元力においては、グラフがきれいなバイリニアを描いているが、フィンガージョイントを考慮した場合においては、グラフがいびつな形になっている。これは、従来の弾性力、弾塑性力に加え、一部に個所においてのみ、フィンガージョイントによる反力が発生してしまうため、橋梁全体としては整ったバイリニア型のグラフにならなかったと考えられる。

以上のことから、この橋梁において、回轉變位の考慮による重心の変位及び復元力への影響は小さいが、フィンガージョイントの考慮の有無は使用する地震波形によって影響力が異なるという結果が出た。

5. まとめ

本研究では、熊本地震で損傷を受けた扇の坂橋を対象に、水平2方向地震動応答解析を行い、回轉變位及びフィンガージョイントの考慮の有無によって、どのような応答差が発生するか、検討を行った。以下に本研究で得られた知見を示す。

- 1) 熊本地震及び設計地震波による解析を行ったが、回轉變位の考慮の有無による振動特性の違いは見られなかった。
- 2) フィンガージョイントの考慮の有無によっては、熊本地震でのみ、応答に変化が見られた。
- 3) フィンガージョイントの考慮によって、応答差が発生することは分かったが、どの程度増減するのかは、地震動や構造物によって異なる。

参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編（2012）
- 2) 秦吉弥，矢部正明，野津厚，葛西昭，高橋良和，松崎裕，秋山充良：臨時余震観測に基づく2016年熊本地震における西原村および南阿蘇村の被災橋梁に作用した地震動の評価，構造工学論文集，Vol. 63A，pp.265-278，2017.
- 3) 道路橋の耐震設計における動的解析に用いる加速度波形(H24年版対応)，日本道路協会
- 4) 扇の坂橋 竣工施工図

DYNAMIC ANALYSIS ON THE INFLUENCE OF EARTHQUAKE RESPONSE IN THE DIRECTION OF ROTATION OF A CURVED BRIDGE

Daisuke ARAI, Ji DANG

In the Kumamoto earthquake that occurred in 2016, not only the two-way response in the direction of the bridge axis and the direction perpendicular to the bridge axis but also traces of rotational deformation on the horizontal plane and the damage caused by the earthquake were also observed. In this study, Understand the response characteristics of the curved bridge by giving simultaneous design seismic waves in the horizontal two directions, and investigate the influence of the rotational displacement by simultaneously analyzing "Ouginosaka bridge" damaged by the Kumamoto earthquake. Also, we analyze the influence of whether or not consideration of finger joint is influenced.