

# 論文 東北地方太平洋沖地震により被災した無筋コンクリート橋脚の調査および再現解析について

坂岡 和寛\*1・荒巻 智\*2・小山 倫史\*3・橋本 涼太\*4

**要旨：**無筋コンクリート橋脚は、鉄道構造物として現在も多数供用されているが、地震時に打継目での水平方向の貫通ひび割れやずれ、打継目下部コンクリートの剥落が生じている事例が多く、東北地方太平洋沖地震においても、同様な被害が生じている。そこで、被災した無筋コンクリート橋脚について主に打継目の粗度に着目して調査を行い、調査結果を基にマニフォールド法(NMM)を用いて再現解析を実施した。その結果、ずれや剥落寸法等の損傷の程度は、損傷した打継目の粗度と関係があると想定できることがわかった。

**キーワード：**地震、無筋コンクリート橋脚、打継目、粗度、再現解析、マニフォールド法

## 1. はじめに

無筋コンクリート橋脚は、鉄道構造物として現在も多数供用されているが、耐震性に劣り大地震時には打継目での水平方向の貫通ひび割れやずれ、打継目下部コンクリートの剥落といった大きな被害が生じ、東北地方太平洋沖地震でも、図-1に示す被害が生じている。そこで、被害程度と打継目性状との間の関係について明らかにすることを目的に、被災した無筋コンクリート橋脚の主に打継目の粗度に着目して調査を行い、調査結果を基にマニフォールド法 (Numerical Manifold Method, 以下 NMM とする) を用いて被害状況の再現解析を実施した。

## 2. 調査

### 2.1 対象橋梁

対象とした橋梁は、鉄道橋で橋長 106.7m、上路鋼桁 19.35m×5 連、9.95m×1 連の上部工で構成されている。下部工は井筒基礎の円形コンクリート橋脚で、井筒、桁

受け梁、基礎接合部のみに配筋されており、打継目を含む躯体一般部は無筋構造となっている。

橋梁の付近には、KiK-net (Kiban-Kyoshin Net : 基盤強震観測網) の観測点(FKSH20)が存在しており、計測震度 6.2、最大加速度 633.0gal が観測されている。観測点から橋梁までの距離は約 1km である。

### 2.2 被害概況

橋脚には、打継目に貫通ひび割れおよび橋軸直角方向のずれが生じており、図-2に示すようにずれた側の打継目下側のコンクリートは剥落していた。なお、4 基の橋脚でずれの方向は同一であった。現地にて測定した橋脚の寸法やずれ量を表-1に示す。もっとも被害が軽微な 1P 橋脚では、貫通ひび割れが打継目に発生したのみである。最も被害の大きな 2P 橋脚では、ずれが 370mm にも達している。ずれの程度で比較した場合、損傷は 1P<3P<4P<5P<2P の順に大きくなっている。なお本橋は、津波の遡上範囲外で影響はなかった。



(a) 打継目のずれ



(b) 打継目下部の剥落  
図-1 被害状況

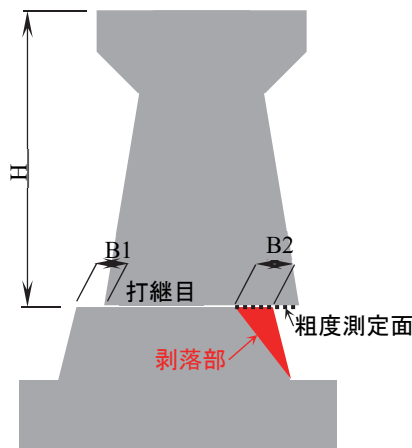


図-2 測定位置図

表-1 測定値の一覧 単位:m

	打継目から天端までの高さ (H)	打継目のずれ (B1)	剥落寸法 (B2)
1P	3.28	0.00	0.00
2P	3.12	0.37	0.58
3P	3.63	0.02	0.30
4P	3.65	0.02	0.20
5P	4.10*	0.10	0.50

※：5P 橋脚には掛け違いの寸法 0.50m が含まれている。

\*1 西日本旅客鉄道(株) 構造技術室 (学生会員)

\*2 西日本旅客鉄道(株) 施設部 (正会員)

\*3 関西大学 社会安全学部 准教授

\*4 広島大学大学院 工学研究科社会基盤環境工学専攻 助教

### 3. 打継目の粗度

#### 3.1 概要

各橋脚は同形状のケーソン基礎で躯体高さもほぼ同等であるため、構造物への地震動の入力および地震動による応答は同じで、挙動の差は少ないことが想定されるため、損傷程度の差の原因は、打継目粗度（凹凸）の差であると考えた。粗度の指標としては、主に地質工学（岩石）で用いられる JRC 値(Joint Roughness Coefficient)<sup>2)</sup>や各種の表面粗さを示す指標があり、これらの指標を用いて評価を行った。

JRC 値は、岩盤の亀裂や節理などの不連続面の表面粗さ、かみ合わせの程度を表す指標として一般的に用いられているものだが、粗さの異なる 10 本のプロファイルとの比較により 0~20 の値を決めるもので、かなり主観的な指標のため、これまで定量的に評価する研究が種々行われてきた。本研究では、簡易に算出することが可能な、不連続面の定量化指標値  $Z_2$ <sup>3)</sup>から JRC( $Z_2$ )を算定する方法と、ステープネス  $V$ <sup>4)</sup>より JRC( $V$ )を算定する方法を用いて検討を行う。JRC( $Z_2$ )は、式(1),(2)を、JRC( $V$ )は、式(3),(4)を用いて算出した。

$$Z_2 = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L (dy/dx)^2 dx} \quad (1)$$

$$JRC(Z_2) = -4.41 + 64.46 \cdot Z_2 \quad (2)$$

ここに、L：測定長(mm)、dy/dx：不連続面の傾き

$$V = \gamma(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (3)$$

$$JRC(V) = 150.523 \cdot V^{0.693} \quad (4)$$

ここに、h：2 データ間の距離(1mm)、z(x)：x 点における表面の高さ、N：ペアの数

その他に“平均山高さ Rpm”を用いて評価を行った。平均山高さ Rpm とは、測定範囲を基準長さ毎に区切り、各基準長さ毎に平均線から最も高い山頂までの高さを求めそれらを平均したものであり、せん断伝達強度との関係が Mohamad らにより研究されている<sup>5)</sup>。今回は基準長さを 100mm として算出した。

その他の評価指標として、標準偏差と JIS B 0601 に示

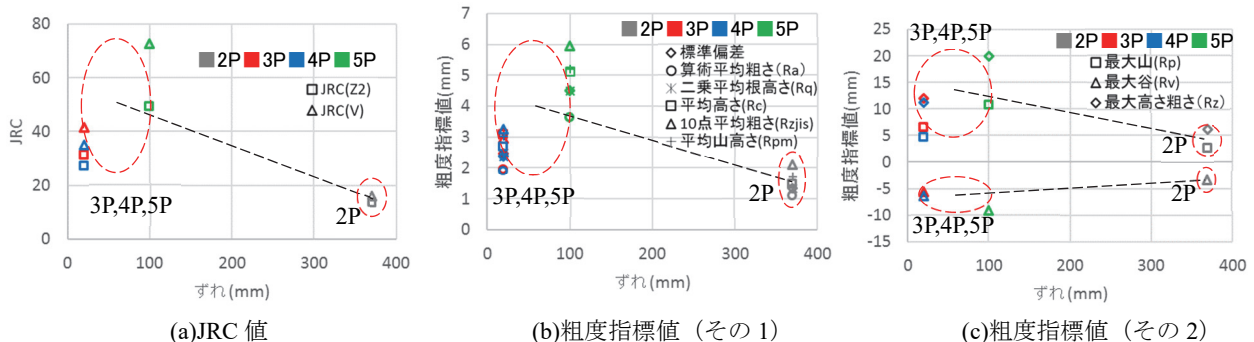


図-3 粗度とずれとの関係

される 9 種の指標により検討を行った。

#### 3.2 粗度の計測方法

粗度の測定は、型取りゲージを用いて行い、橋軸直角方向に測線を設定した。測線間隔は橋軸方向 0.2m 程度で、1 橋脚あたり 5~7 測線とし、図-2 に示すように打継目の上部面に現れた粗度を上向きに測定した。型取りゲージを打継目に押し当てた後、方眼紙上に置いて撮影し、パソコン画面上で数値化を行った。測線方向の測定ピッチは 1mm で、凹凸は 0.1mm 単位で読み取り、各測線ごとに最小二乗法により基準線を設定し、基準線と測定点の差で評価を行った。

#### 3.3 粗度の計測結果

測定結果を図-3 に示す。シンボル形状で指標値の種別を、シンボル色で橋脚を示している。JRC 値は、プロファイルの範囲(0~20)を超える結果となったが、本研究では計算により算出した値であることと、比較指標として用いることから有効と考え計算値のままとした。また JIS に示す指標のうち 2 種については他と傾向が異なったため除いた。

ずれの小さな 3P および 4P 橋脚は粗度が大きく、ずれの大きな 2P 橋脚は粗度が小さいことから、粗度とずれには相関関係があると推測できるが、ずれが中間の 5P 橋脚は粗度が最も大きく、推測と異なる。しかし 3P,4P,5P を粗度の大きな一群と考え、粗度の小さな 2P と比較すれば、粗度とずれ量は相関していると推測もできる。

実際の構造物では、桁やレールで拘束されおり、特に変位が小さい橋台に近接している 1P および 5P 橋脚は他の橋脚に比べて拘束の影響が大きく、異なった挙動となったとも考えられる。

### 4. 再現解析

#### 4.1 概要

前項で打継目の粗度とずれ量は相関していると推測もできることから、打継目の物性値を変化させた NMM による再現解析を実施し確認した。NMM は Shi<sup>6)</sup>により 1991 年に開発された不連続体解析手法の一つであり、カバーの概念を用いることで有限要素法同様に要素節点の

変位を主変数として、ハミルトンの原理に基づき、接触を含む運動方程式をエネルギー最小化原理により釣り合い方程式を求めて定式化する。解析対象であるブロック（物理メッシュ）を独立な数学メッシュで覆い、変位を離散化するため、各ブロック内部の詳細な応力・ひずみ状態についても追跡することができる。ブロック間の相互接触はペナルティ法によって処理される。

なお、本研究では Shi によるオリジナル NMM に摩擦構成則の陰的積分アルゴリズム（リターン・マッピング法）を導入して不連続面のすべり挙動の計算精度を改善した解析コード<sup>7)</sup>を用いた。

#### 4.2 モデル化

解析は最も大きなずれが生じた 2P 橋脚を対象として実施した。解析モデルを図-4 に、入力に用いた物性値を表-2 に示す。2次元解析のため、奥行き方向を 1m とし、躯体の単位体積質量はそのまま、上部工は重量を桁面積で除し、さらに躯体の奥行き方向の幅で除して入力した。境界条件は、地盤底面を鉛直方向固定、側面を水平方向固定とした。地盤条件が不明なため、側方地盤は N 値 10 の砂質土、支持地盤は N 値 50 の砂質土と仮定した。なお、変位は打継目上部が右にずれる、時計回りに回転する方向を正(+)とした。なお、減衰は設定していない。

打継目の粗度に相当する入力値は摩擦角で、以下のとおり設定した。なお、粘着力や引張力は考慮していない。

Case1：実橋脚の打継目から採取した供試体のうち、最も平滑なものから得られた値<sup>8)</sup>で、摩擦角 43.72° とした。この供試体では載荷時に明確な最大静止摩擦がみられないことから、動摩擦角と最大静止摩擦角は同一とした。

Case2：60°（摩擦係数 1.73）、Case3：70°（摩擦係数 2.75）、Case4：80°（摩擦係数 5.67）、Case5：85°（摩擦係数 11.43）

なお、前項の粗度の指標値のうち、平均山高さ Rpm は Mohamad らの研究<sup>5)</sup>によりせん断伝達応力との関係式((5)式)が示されている。

$$\tau = \left(0.2363e^{0.237R_{pm}}\right) f_t + \left(0.8766R_{pm}^{0.3978}\right) \sigma_n \quad (5)$$

ここで、コンクリートの引張強度( $f_t$ )は、 $f_t = 0.23 f_c^{(2/3)}$ を用いて、圧縮強度 $f_c = 24\text{N/mm}^2$ より  $1.91\text{N/mm}^2$ とした。界面に作用する鉛直応力( $\sigma_n$ )は、死荷重時の  $0.136\text{N/mm}^2$ とした。2P および 5P 橋脚の Rpm 値 1.7, 5.2 を用いて計算すると、せん断伝達応力  $\tau$  はそれぞれ  $0.823, 1.778\text{N/mm}^2$  となり、鉛直応力  $0.136\text{N/mm}^2$  で除せば、摩擦係数は 6.05, 13.08、摩擦角は、 $80.6^\circ, 85.6^\circ$  となる。これは Case4 および 5 に相当する値である。

不連続体解析手法特有の接触処理を行うためのペナルティ係数の値は、後述の理論値との比較による検討を行った結果により、せん断ペナルティ  $5.0 \times 10^5\text{kN/m}^2$ 、鉛直ペナルティ  $5.0 \times 10^4\text{kN/m}^2$  とした。

入力地震動は、前述の KiK-net の観測点(FKSH20)で観測された波形を、ずれが発生している橋軸直角方向(方向角  $63^\circ$ )に換算したものを、モデル底面(GL-10m)に時間変化強制加速度として作用させた。なお、鉛直方向は、計測値をそのまま作用させた。加速度波形を図-5 に示す。

解析結果は、打継目に生じるずれと打継目上部の回転角について取りまとめた、ずれは打継目上部(B 点)と躯体下端(A 点)との水平変位差で、回転角は打継目より上部の回転角で図-6 に示す算出値より計算した。

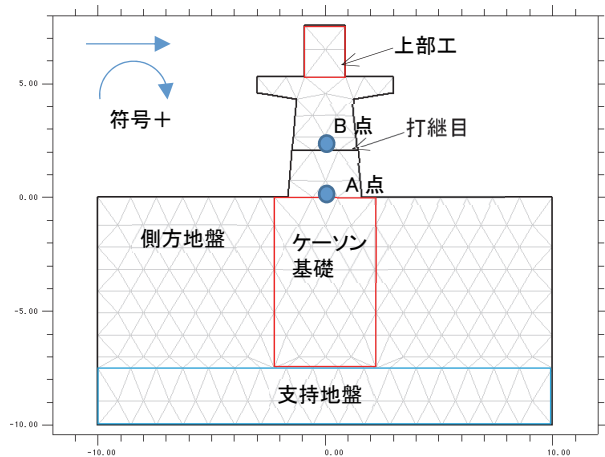
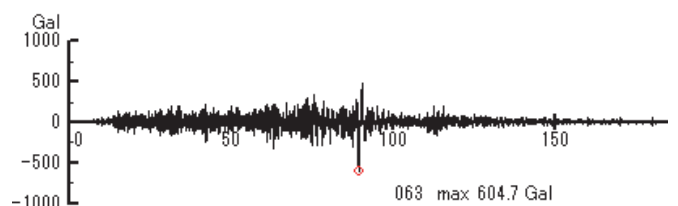


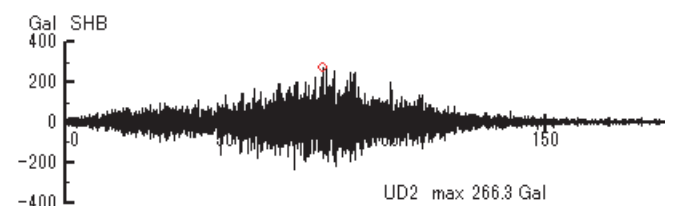
図-4 解析モデル

表-2 入力物性値

	コンクリート	上部工	側方地盤 N 値 10 砂質土	支持地盤 N 値 50 砂質土
単位体積質量 $\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )	2.30	3.22	1.80	2.00
弾性係数 E(kN/m <sup>2</sup> )	$2.2 \times 10^7$	$2.0 \times 10^8$	$4.0 \times 10^4$	$2.0 \times 10^5$
ポアソン比	0.2	0.3	0.3	0.3
ペナルティ係数	垂直ペナルティ係数		$5.0 \times 10^5\text{ kN/m}^2$	
	せん断ペナルティ係数		$5.0 \times 10^4\text{ kN/m}^2$	



(a) 加速度波形：水平方向(橋軸直角方向)



(b) 加速度波形：鉛直方向

図-5 入力地震動

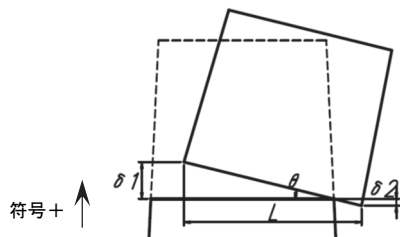


図-6 回転角の算出方法

#### 4.3 ペナルティ係数の決定

橋脚をモデル化し、簡単な正弦波を入力した解析を実施し、解析結果と理論解<sup>9)</sup>を比較することにより入力に用いるペナルティ係数を決定した。ペナルティ係数を確認するための解析モデルは図-7に示すとおりで、2P橋脚の躯体を取り出したものを基本としつつ、ずれにより打継目に生じる鉛直応力度が偏ることを防ぐため、実際の形状より打継目下部を大きくし、モデル下端に正弦波の加速度を作用させた。なお、摩擦角はCase1の $43.72^\circ$ とした。

打継目下部の加速度、速度を $a_1$ 、 $v_1$ 、打継目上部の加速度、速度を $a_2$ 、 $v_2$ 、打継目の摩擦係数を $\mu$ 、重力加速度を $g$ とし、以下の状態に場合分けしてブロックの加速度を求めた。ここでは、右向きを正としている。

- 1) 相対速度  $v_1 - v_2 = 0$  の場合、打継目下部の加速度の大きさと方向で打継目上部の加速度は決定される。打継目下部の加速度の絶対値が $\mu g$ よりも小さい場合には、 $a_1 = a_2$ となる。また打継目下部の加速度の絶対値が $\mu g$ よりも大きい場合、 $a_1 > 0$ ならば打継目上部は右向きの力を受け、 $a_2 = \mu g$ となる。また $a_1 < 0$ ならば打継目上部は左向きの力を受け、 $a_2 = -\mu g$ となる。
- 2) 相対速度  $v_1 - v_2$  が0以外の場合、 $v_1 - v_2 > 0$ ならば打継目上部は右向きの力を受け、 $a_2 = \mu g$ となる。また $v_1 - v_2 < 0$ ならば打継目上部は左向きの力を受け、 $a_2 = -\mu g$ となる。

この条件に従い、時間ステップごとの変位、速度、加速度を逐次計算する(図-8(a))ことで、打継目上部(図-7中のB点)の変位の推移を計算した(図-8(b))。なお、打継目の摩擦係数はCase1の値を用いた。

これに対して、同様の強制変位をモデル下端A点に入力してNMMで解析を行った。計算間隔は1/1000秒とし、0~0.5秒は、初期応力を得るための自重解析、0.5秒以降に強制変位を入力した。解析の結果得られた水平変位を図-8(c)に示す。変位を生じる打継目上下部の重心位置が高く、荷重偏心により打継目界面の鉛直応力度が不均一となったことに起因し、完全に一致する係数はなかったが、変位の変曲点が比較的近似できた垂直ペナルティ係数 $5.0 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$ 、せん断ペナルティ係数 $5.0 \times 10^4 \text{ kN/m}^2$ を採用値とした。

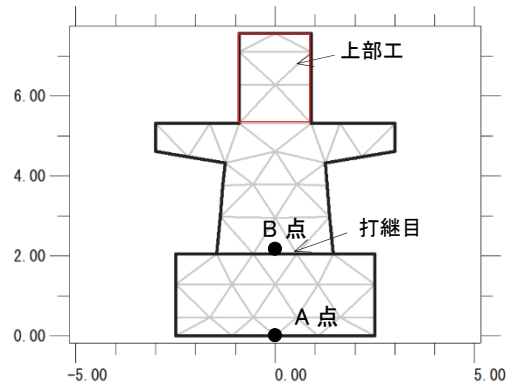
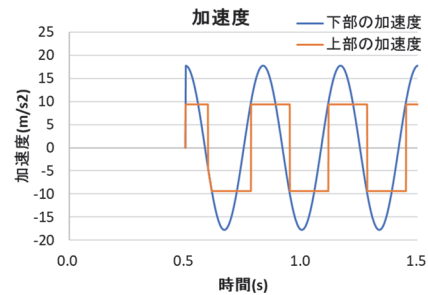
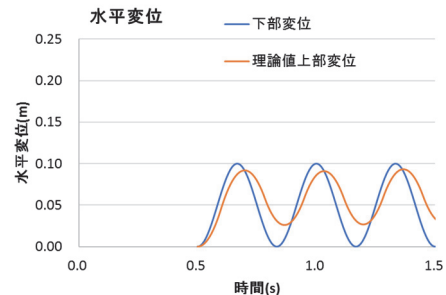


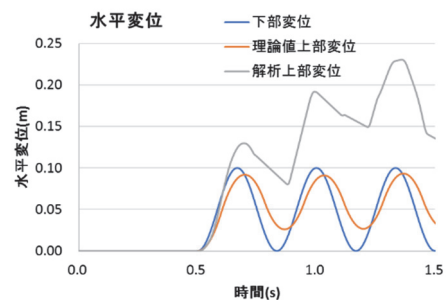
図-7 モデル図



(a) 加速度波形



(b) 水平変位



(c) 解析結果

図-8 理論値との比較

#### 4.4 再現解析結果

表-3 および図-9に、再現解析結果の代表的な値を示す。打継目ずれは、各ケースの最大値時刻を全ケースにおいて示したもので、表中の赤字が最大値である。Case2を除けば残留ずれの方向は一致しているものの、実際の2P橋脚の残留ずれ+370mmと比較すると最大ずれ、残留ずれは小さな値となっている。これは、地盤条件が不明

で仮定の値としていること、地盤を線形で入力していること等が影響し、構造物への入力動が実際と異なっていることが原因と考えられる。しかし、その差は各 Case において同程度で、各ケース間の比較を行うには、十分な成果が得られたと考える。

打継目での水平ずれは、Case1,2 の 90.6,93.4 秒付近および Case5 の 64.9,66.3 秒付近を除けば概ね一致しており摩擦角に反比例する結果となっている。また、最大回転角は、全ケースで同一時刻(91 秒付近)で発生しており、Case5 を除けば摩擦角に比例しており、滑りにくいことにより回転挙動が増加したと考えられる。

図-10 に、摩擦角が最も小さな Case1 と、最も大きな Case5 の打継目水平ずれ時刻歴を示す。比較すると概ね摩擦角の大きな Case5 のずれのほうが小さいが、62 秒付近では Case5 のずれが非常に大きくなっている。そこで、62 秒付近の詳細を図-11 に示す。打継目ずれと躯体下端に生じている加速度を比較すると、摩擦角の大きな Case5 では、スパイク状に大きな加速度が生じている(図-11(b))。図-11(c)に Case5 の打継目水平ずれと打継目上下部の隙間を示す。隙間  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  は左右端部における鉛直方向の隙間(図-6 中の  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ )で、いずれも正(+)であれば打継目上部が浮いて打継目で接触していないことを示しており摩擦が生じていない。どちらかが 0 になった瞬間に打継目が接触し、局所的な大きな摩擦力が発生することによりスパイク上に大きな加速度が生じている。また、隙間の最大値は 30~40mm 程度と大きな値となっており、

回転挙動が大きいことがわかる。そのため解析上回転挙動が大きい場合には、摩擦角が大きいにもかかわらず大きなずれが生じているものと推測される。また本地震では、強い揺れの継続時間が長いことから回転挙動が継続していることも要因と考えられる。

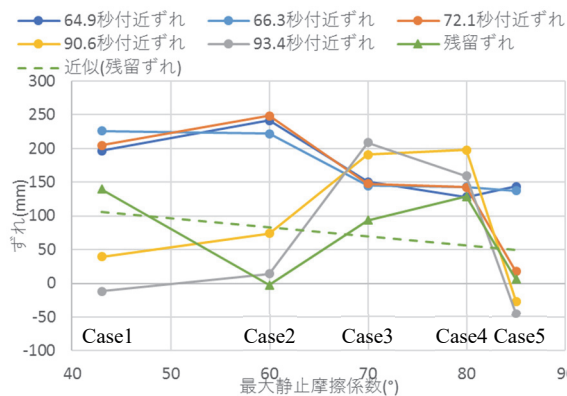
## 5. まとめ

2011 年の東北地方太平洋沖地震で被災した、無筋コンクリート橋脚を調査し、再現解析を行った結果、地震により打継目で損傷した場合、以下のことが推測された。

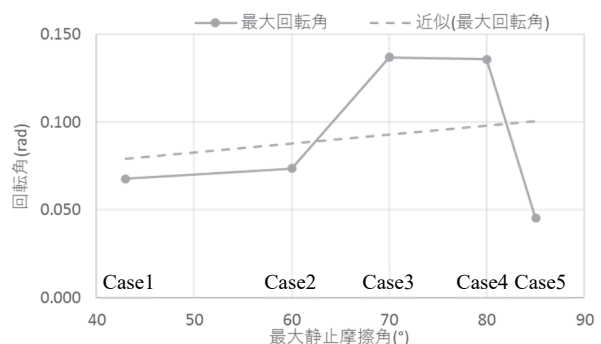
- ① 調査の結果、ずれや剥落寸法等の損傷の程度は、損傷した打継目の粗度と相関関係があり、損傷した打継目の粗度が小さいほど、ずれや剥落寸法が大きく損傷程度も大きいと想定できる。しかし、実際の構造物では、桁やレールで拘束されており、特に変位が小さい橋台に近接している橋脚は他の橋脚に比べて拘束の影響が大きく異なった挙動となったとも考えられる。
- ② 再現解析の結果、概ね打継目での水平ずれは摩擦角(粗度)が小さいほど大きく、回転角は摩擦角(粗度)が大きいほど滑りにくいことにより回転挙動が増加する。
- ③ 摩擦角の大きな解析においては、回転挙動が大きく打継目に隙間が生じて、摩擦が生じていない瞬間がある。これにより摩擦角が大きいにもかかわらずずれが生じていると推測される。

表-3 解析結果一覧

Case	最大静止摩擦角 (°)	打継目ずれ(mm)					残留ずれ (mm)	最大回転角 (rad)
		64.9 秒付近	66.3 秒付近	72.1 秒付近	90.6 秒付近	93.4 秒付近		
1	43	196.4	<b>225.9</b>	204.8	39.4	-11.6	139.7	0.068
2	60	241.8	221.9	<b>248.7</b>	74.2	14.2	-2.5	0.074
3	70	150.7	144.9	147.6	190.8	<b>208.8</b>	93.8	0.137
4	80	128.1	143.3	142.5	<b>198.0</b>	159.2	128.7	0.136
5	85	<b>143.6</b>	137.3	17.8	-27.0	-45.3	6.1	0.045



(a) 代表的な時刻におけるずれおよび残留ずれ



(b) 最大回転角

図-9 解析結果の概要

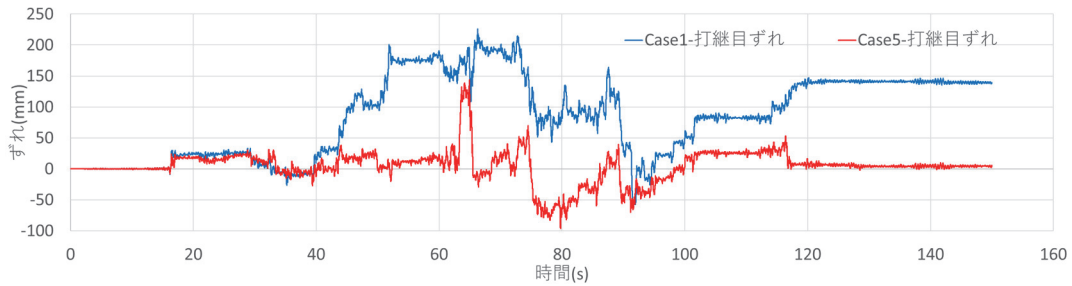


図-10 打継目水平ずれ時刻歴

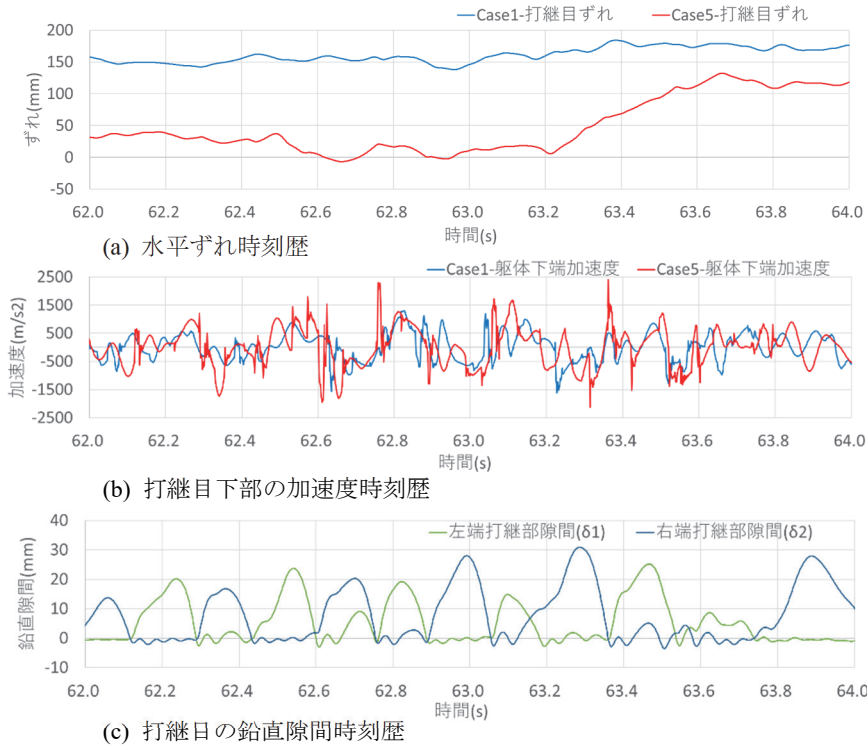


図-11 打継目水平ずれ時刻歴

謝辞：橋脚の調査に際し、東日本旅客鉄道(株)にご協力いただきました。また、(公社)日本材料学会に委託している「鉄道コンクリート構造物の長寿命化に向けた検討委員会」(委員長：宮川豊章京都大学特任教授)の委員各位より貴重なご助言をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 坂岡和寛, 大坪正行, 小山倫史: 無筋コンクリート橋脚の実態と地震時の被災状況についての考察, 関西大学 社会安全学研究, 第7号, pp.3-23, 2017.3
- 2) Barton, N., Review of a new shear-strength criterion for rock joints, Eng. Geology, Vol.7, pp.287-332.1973
- 3) Tse, R. and Cruden, D.M., Estimating joint roughness coefficients, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.16, pp.303-307.1979
- 4) 村田澄彦, 斎藤敏明: フラクタルモデルによる岩盤不連続面の表面粗さ評価法について, 資源と素材, Vol.133, pp.555-560.1997

- 5) Mohamad, M. E. et al.: Friction and cohesion coefficients of composite concrete-to-concrete bond, Cement & Concrete Composites, 56, pp.1-14.2015
- 6) Shi, G.H.: Manifold Method of Material Analysis, Transactions of the 9th Army Conference on Applied Mathematics and Computing, Report No. 92-1, U.S. Army Research Office, 1991.
- 7) Hashimoto, R., Koyama, T., and Kikumoto, M.: Introduction of implicit integration of friction law into numerical manifold method, Proc. of 10th Asian Rock Mechanics Symposium, No.378, 2018.10
- 8) 坂岡和寛, 土井達也, 大江崇元: 無筋コンクリート橋脚の打継目性状に関する基礎的検討, 土木学会第70回年次学術講演会, V-114, pp.227-228, 2015.9
- 9) Kamai, R. and Hatzor, Y. H.: Numerical analysis of block stone displacements in ancient masonry structures: a new method to estimate historic ground motions, Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., 32(11), pp.1321-1340, 2008.8