

無筋橋脚の打継目移動制限装置による 地震対策工法の解析的研究

坂岡 和寛¹・小山 倫史²・橋本 涼太³・?⁴

¹正会員 西日本旅客鉄道株式会社 構造技術室 (〒532-0011 大阪市淀川区西中島5-4-20 中央ビル2階)
E-mail: kazuhiko-sakaoka02@westjr.co.jp

²正会員 関西大学准教授 社会安全学部 (〒569-1098 大阪府高槻市白梅町7-1 高槻ミュージックキャンパス)
E-mail: t-koyama@kansai-u.ac.jp

³正会員 広島大学大学院助教 工学研究科社会基盤環境工学専攻 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)
E-mail: ryotahashimoto@hiroshima-u.ac.jp

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い。筆者らは、打継目を有する無筋コンクリート橋脚を模擬し 1/2.5 に縮小した供試体により大型振動台を用いた動的試験を実施し、打継目上部のすべりやロッキングといった、被災事例と同様の変位、打継目下部コンクリートの剥落が確認できた。また打継目移動制限装置を設置した供試体による動的試験により加振中の最大変位や残留変位を抑制できることを確認した。本研究では、マニフォールド法 (NMM)を用いて、動的試験の再現解析を行った。その結果、打継目上部のすべりによる変位や回転を伴うロッキングといった挙動や荷重を概ね再現することができた。加振中のコンクリートや打継目の移動制限のために導入した鋼棒に作用する応力も、完全に再現できたわけではないが、各ケース間の比較を行うには十分な成果が得られた。

Key Words : plain concrete piers, construction joint of concrete, seismic retrofit, numerical manifold method (NMM), seismic response analysis, shaking table test

1. はじめに

地震による強い揺れの影響を受けた無筋コンクリート橋脚（以下、無筋橋脚という）には、図-1 に示すよう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い。無筋橋脚の耐震補強は、一般的に鉄筋コンクリート巻立て工法を用いて実施されているが、橋脚断面の増加を伴う。そのため河川内の橋脚においては、河積阻害率の観点から実施が困難になる場合が想定される。

そこで、筆者らは河積阻害率に影響を与えない、新しい地震対策工法の開発を進めており、その効果を確認するため打継目を有する無筋コンクリート橋脚を模擬し 1/2.5 に縮小した供試体および打継目移動制限装置を設置した供試体を製作し、静的試験ならびに大型振動台を用いた動的試験（以下動的試験という）を行い、地震時の挙動や破壊形態等の基本的な挙動および対策工の効果を検証した²⁾。

これまで筆者らや古川らが、この動的試験の再現解析

を実施している³⁾⁴⁾。筆者らは、マニフォールド法 (Numerical Manifold Method, 以下 NMM とする)、古川らは改良版個別要素法 (Refined DEM) を用いて再現解析を実施している。これらの解析では、打継目上部のすべり挙動は再現できているものの、変位量は試験結果と乖離しており、回転挙動を伴うロッキング現象については再現できていない。本研究では、NMM を用いて再現解析の再現性を向上させ、地震時の挙動や破壊形態および対策工の効果を検証することを目的とする。



図-1 JR 飯山線魚野川橋梁橋脚¹⁾

2. NMMについて

(1) NMMの概要

NMMは Shi⁹⁾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。

これまで NMMは岩盤工学分野における諸問題に多く適用されてきた⁹⁾が、不連続面における大変形、大変位とメッシュ分割したそれぞれの要素内の応力、ひずみの評価が同時に行えるという特徴を有しており、地震時の構造物の状態を詳細に検討できる。

ここでは、動的試験に用いた供試体をモデル化し、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⁸⁾と比較することにより妥当性を検証した。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滑り挙動の計算精度を改善した解析コード⁹⁾を用いた。

(2) モデル化

動的試験に用いた供試体は、図-1 に示す橋脚を 1/2.5 に縮小したもので、打継目処理の方法や移動制限装置の有無を変えた 3 体である（表-1）。打継目処理のタイプ A は分離して製作し平滑に仕上げすべりやすくしたもの、タイプ B は付着のある打継目を破断した粗なものである。

図-2 に動的試験の供試体の形状および鋼棒の配置は各色で示している。これに対して図-3 に示す解析モデルは、NMM の三角メッシュによってモデル化しており、図中の赤線がコンクリートの打継目である。この線の上下で 2 つの不連続なブロックに分割しており、打継目に沿った滑りや上部ブロックの浮き上がりについても取り扱うことができる。

表-1 供試体一覧

供試体 No.	打継目処理	対策工法
1	タイプ A	無対策
2	タイプ A	移動制限装置 鋼棒 φ40mm2 本、遊間 20mm
3	タイプ B	移動制限装置 (破壊後設置) 鋼棒 φ30mm4 本、遊間 20mm

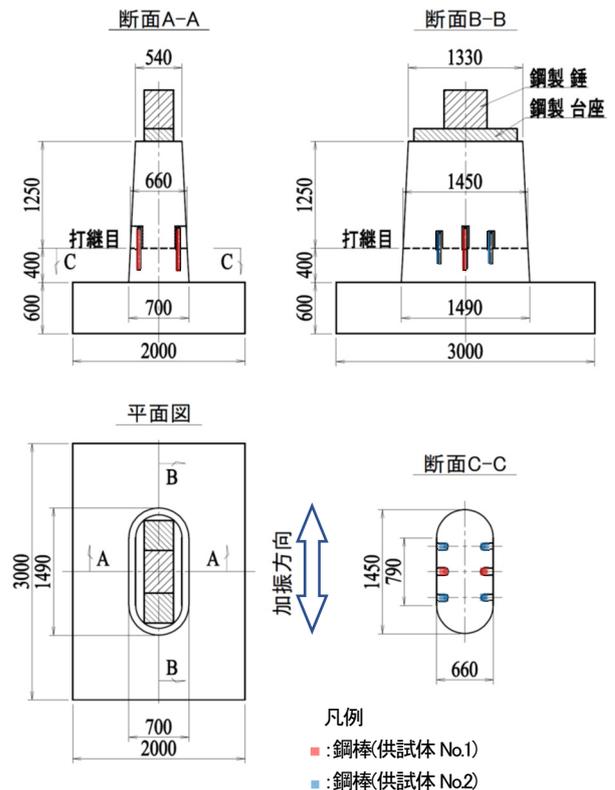


図-2 供試体形状図

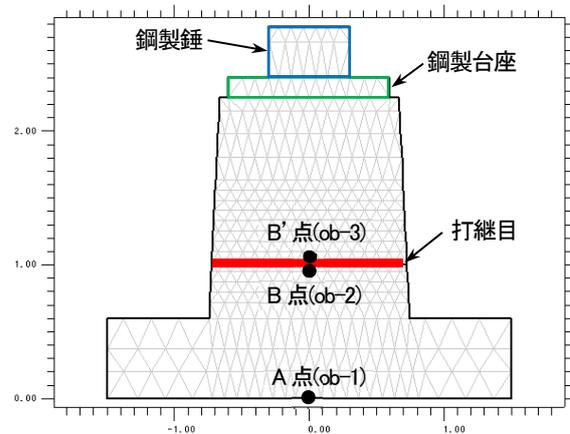


図-3 モデル図（供試体 No.1）

表-2 入力物性値一覧

	コンクリート	鋼製台座	鋼製錘
単位体積重量 γ (kN/m ³)	18.37	8.50	46.66
弾性係数 E (kN/m ²)	2.2×10^7	2.0×10^8	2.0×10^8
ポアソン比	0.2	0.3	0.3
打継目の物性値	最大静止摩擦角 32.65° (46.99°) 動摩擦角 31.80° (39.15°) 粘着力 0 N/mm ²		
接触に関するペナルティ係数	垂直ペナルティ係数	2.0×10^4 kN/m ²	
	せん断ペナルティ係数	2.0×10^3 kN/m ²	

注：()は、打継目タイプ B の値を示す。

解析に用いた物性値を表-2に示す。本解析で使用した NMM の解析コードは 2次元であるため、奥行き方向の換算を行う必要がある。打継目に作用する鉛直応力度を一致させるため、実際の重量を、打継目部の奥行き 660mm とした重量に一致するよう単位体積重量を調整した。コンクリートの弾性係数は、供試体に用いたコンクリートの設計基準強度 24N/mm^2 から、鉄道の設計基準¹⁰⁾によって設定した。ポアソン比も同様に設計標準より設定した。

打継目の摩擦角は、動的試験に先立ち供試体で実施した静的一面せん断すべり試験結果より設定した。摩擦は一般的に式(1)で表される。

$$\tau = \mu \cdot \sigma + c \quad (1)$$

ここに、 τ は摩擦応力(N/mm^2)、 μ は摩擦係数、 σ は鉛直応力(N/mm^2)、 c は粘着力(N/mm^2)、である。今回の NMM による解析では摩擦角のみを用い、粘着力は考慮しないものとするため、実測した摩擦力を打継目より上部の重量で除した値を摩擦係数(摩擦角)とした。

小山らの研究¹¹⁾により、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、地震応答解析の場合、接触ブロックの弾性係数より小さな値で、上段ブロックの質量に比例することが明らかになっている。そこで、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 $2.0 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ [接触ばね/ブロック質量 $0.446 \text{ kN/m}^2/\text{kg}$] とし、鉛直ペナルティは $2.0 \times 10^4 \text{ kN/m}^2$ [接触ばね/ブロック質量 $4.46 \text{ kN/m}^2/\text{kg}$] とした。

(3) 理論値との比較(すべり)

解析の妥当性を確認するための解析モデルは図-4に示すとおりで、供試体 No.1 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(中の A 点)に正弦波の加速度を作用させた。

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 μ 、重力加速度を g とし、以下の状態に場合わ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 μg 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 μg 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

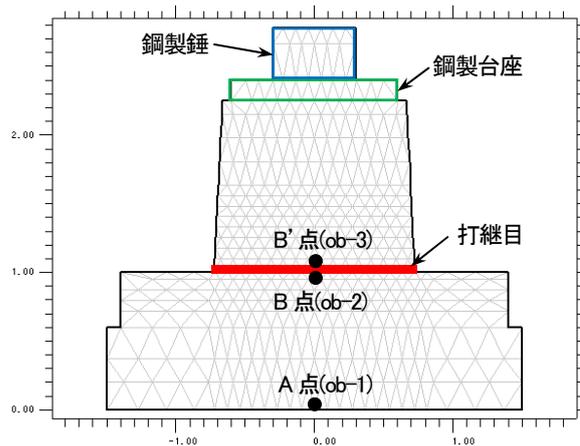


図-4 モデル図

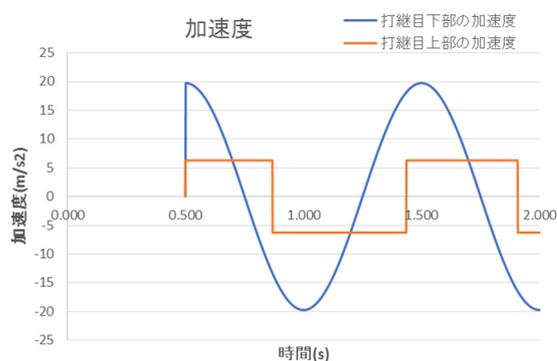


図-5 加速度

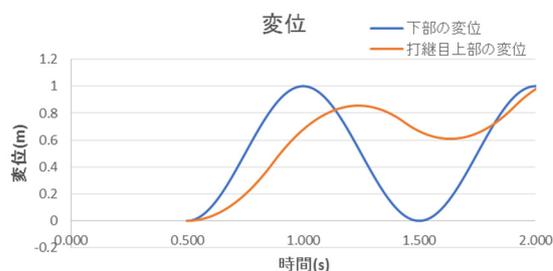


図-6 水平変位

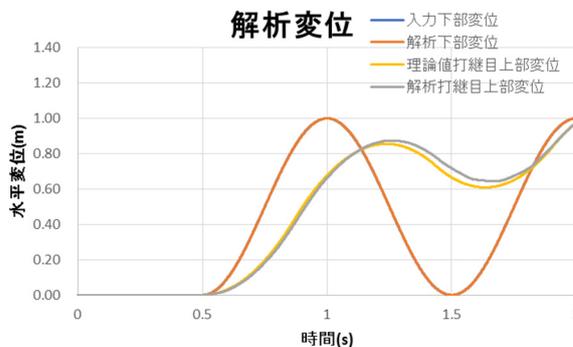


図-7 解析結果

目上部は右向きの力を受け、 $a_x = \mu g$ 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、 $a_x = -\mu g$ 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-4)ことで、打継目上部(図-3中のB'点)の変位の推移を計算した(図-5)。なお、打継目の摩擦係数はタイプAの値を用い、静止摩擦角のみ考慮した。

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-7に示す。本図より、解析結果は理論値とほぼ一致する結果となり、解析の妥当性が確認できた。

3. 動的試験の再現解析

前項で理論値との比較を行い、解析および入力値の妥当性が確認できたことから、次に動的試験の再現解析を実施した。

動的試験は、表-1に示す3供試体を用いて実施し、同一の供試体を用いて加速度を増加させながら加振している。再現解析の対象は、各供試体で比較的大きな挙動を生じた試験で、試験番号(以下 試番という)は表-3に示すとおりである。詳細は参考文献²⁾による。

(1) 入力加速度

動的試験の変位計および加速度センサー配置を図-8に示す。振動台とスタブで0.5mm程度のずれが生じていたため、解析に用いる入力動は、振動台備付けの加速度センサー(ASL)ではなくスタブに取り付けられた水平、鉛直加速度センサー(ALL1, ALV1)の測定値とした。図-9に供試体 No.1 試番 8 (最大加速度 776gal) において計測された加速度を示す。実際の試験では、水平方向のみの加震であるが、鉛直方向の加速度センサー(ALV1)にも、ロッキング挙動の影響と想定される大きな加速度が観測されているため、解析に考慮することとした。解析は、入力動が大きく挙動が生じている図-9の赤枠で囲んだ10.1~16.1秒の間の6秒間を対象として実施した。

なお、0~0.1秒は自重解析を行い、0.1秒以降に加速度を入力した。すなわち、本解析の解析上の時間に10秒を加えたものが実際の試験の時間となる。計算間隔は前項同様に1/1000とした。

(2) 供試体 No.1 (無対策: 打継目タイプA)

a) 概要およびモデル化

最初に、平滑な打継目タイプAで対策工を設置していない供試体 No.1 を対象として再現解析を実施した。解析モデルは、図-3に示すとおりである。NMMでは全

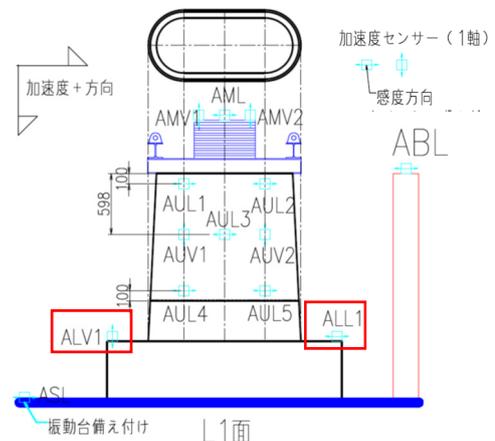
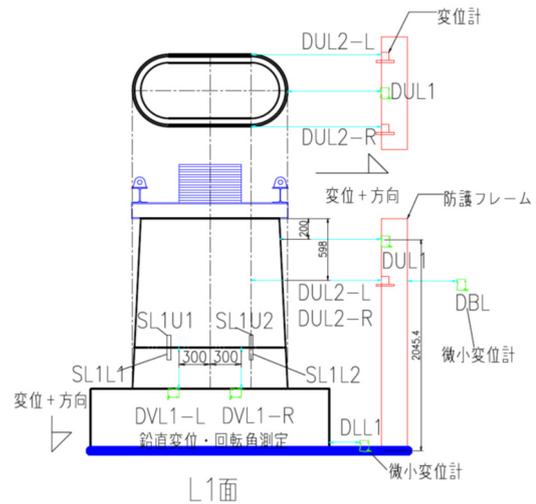


図-8 変位計および加速度センサーの配置
上図: 変位計配置, 下図: 加速度センサー配置

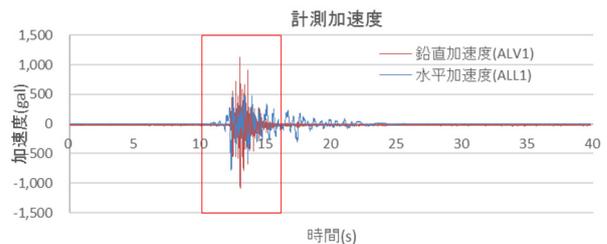


図-9 計測加速度

表-3 再現解析のケース

供試体	打継目	試番	最大加速度 (gal)
1 (無対策)	タイプA	8	776
		9	1034
2 (鋼棒対策)	タイプA	10	1018
		11	1248
3 (鋼棒対策)	タイプB	14	1436

ステップにおける変位，速度，加速度を出力する観測点を設定することができる．この観測点を試験における変位計や加速度センサー位置に対応するように設定した（表-4）．なお図-3に示すA点が ob-1，B点が ob-2，B'点が ob-3 である．打継目上部のすべりによる水平変位（以下 水平変位という）は，B点(ob-2)と B'点(ob-3)の相対変位で表す．これに対して試験の実測値は，打継目上部の重心位置の水平変位(DUL2-Lと DUL2-Rの平均)から回転による変位を差引いたものである．ロッキング挙動による回転角（以下 回転角という）は試験と同様に，図-10に示す DVL1-L(ob-8)，DVL1-R(ob-10)の鉛直変位より式(2)により算出した．また水平変位は，B'点が右側にずれる方向を正，回転角は時計方向を正として表す．

$$\theta_v = \tan^{-1} \left(\frac{(DVL1-L) - (DVL1-R)}{L_v} \right) \quad (2)$$

打継目下部コンクリートの剥落が生じている試験では，剥落をモデルに考慮した（図-11）．剥落寸法は試験後の画像より設定した．試番8では剥落寸法が非常に小さいため考慮せず，試番9では，左側42mm，右側21mmとした．

表-4 観測点一覧

観測点	X	Y	説明
ob-1	0.000	0.000	A点 中央，基礎底面 (全体不動点，強制変位点)
ob-2	0.000	0.999	B点 中央，打継目直下 (ob-3,4,5,6 対比点)
ob-3	0.000	1.001	B'点 中央，打継目直上
ob-4	0.000	1.652	中央，躯体重心位置 (DUL2,AUL3)
ob-5	0.000	2.050	中央，全体重心位置(DUL1)
ob-6	0.000	2.775	中央，錘上面(AML)
ob-7	-0.300	0.999	左，打継目直下 (ob-8 対比点,DVL1-L 対比点)
ob-8	-0.300	1.001	左，打継目直下(DVL1-L)
ob-9	0.300	0.999	右，打継目直下 (ob-10 対比点,DVL1-R 対比点)
ob-10	0.300	1.001	右，打継目直下(DVL1-R)
ob-11	-0.395	1.100	左，水平加速度1(AUL4)
ob-12	-0.395	1.652	左，鉛直加速度1(AUV1)
ob-13	-0.395	2.150	左，水平加速度2(AUL1)
ob-14	0.395	1.100	右，水平加速度1(AUL5)
ob-15	0.395	1.652	右，鉛直加速度1(AUV2)
ob-16	0.395	2.150	右，水平加速度2(AUL2)

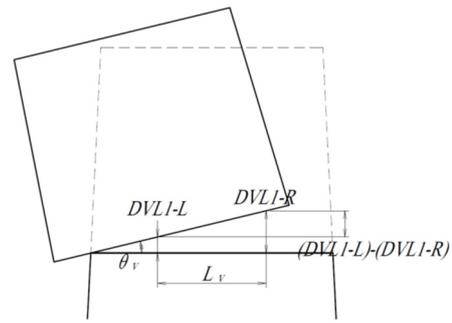


図-10 鉛直変位による回転角の算出

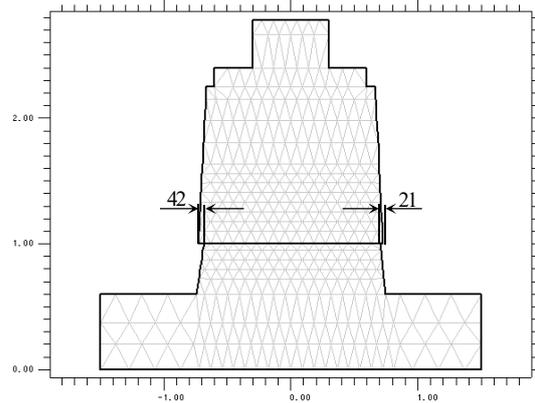


図-11 打継目下部の剥落を考慮したモデル

b) 試番8（最大加速度776gal）

試番8（最大加速度776gal）について再現解析を実施した．まず，モデル底面に計測波形通りの加速度が入力されていることを確認する．モデル底面(ob-1)の加速度時刻歴と計測加速度時刻歴を図-12にて比較した．同図より両者が解析全過程において一致しており，意図した通りに加振できていることが確認された．

水平変位時刻歴を図-13に示す．最大値は，実測の15.6mmに対して解析値は9.4mmで，多少小さいものの2.3秒付近の最初のすべり挙動などはよく再現できている．個々の変位については，実際の供試体の打継目は均一ではなくばらつきがあること，加振直角方向にも若干挙動し応力分布が不均一となることから，完全に一致させることは困難で，それらを考慮すれば概ね挙動は再現できていると考えられる．

回転角時刻歴を図-14に示す．実測の最大回転角0.0036radに対して解析値は0.00095radで，比率で示すと26%と小さい．図-15に水平変位と回転角との関係を図化した．横軸が水平変位，縦軸が回転角である．水平変位4mm，回転角0.001rad程度までは一致しているものの解析ではこれ以降回転角が減少しており，その結果最大変位角が過小に評価されていることが分かる．各図に赤点で試験における打継目下部が剥落したタイミングを示す．剥落以降，回転角が増加し乖離が大きくなっている

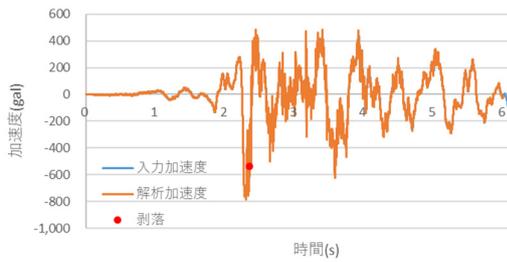


図-12 水平加速度時刻歴(ob-1)

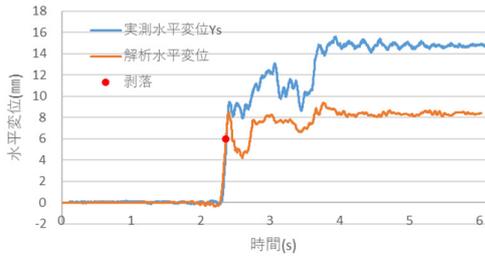


図-13 打継目上部の水平変位時刻歴

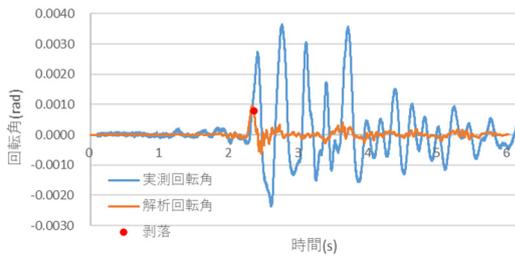


図-14 打継目上部の回転角時刻歴

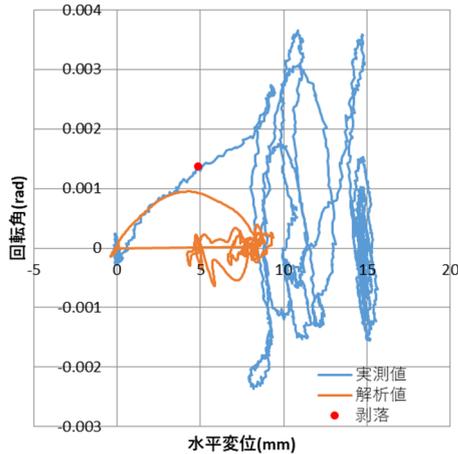


図-15 水平変位と回転角

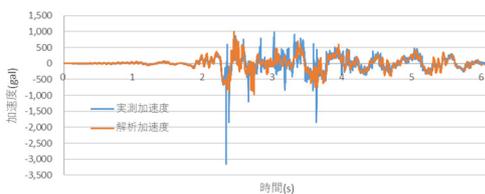


図-16 打継目上部の水平加速度時刻歴(ob-4)

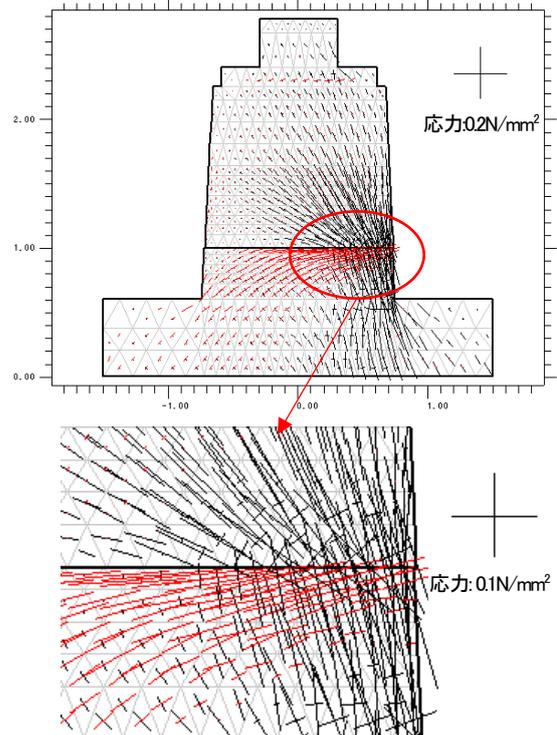


図-17 応力図(2.345秒)

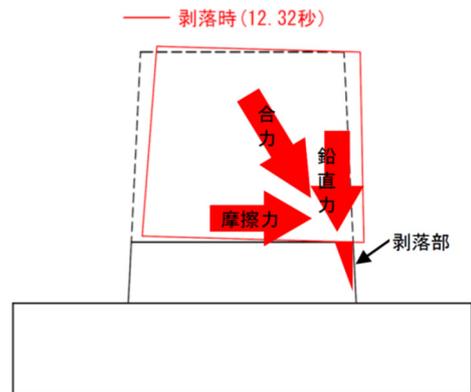


図-18 剥落時の力の伝達²⁾

ことがわかる。NMM では、加振中の打継目下部のコンクリートの剥落を考慮していないことから、この再現方法は今後の課題としたい。

打継目上部の水平加速度時刻歴を図-16 に示す。計測点は、打継目上部の重心位置 ob-4(AUL3)である。実測値と比較すると、解析値は全体的にスパイクが少なく幾分平滑化された波形を示す。測点が打継目から 652mm の高さであり、回転挙動による水平加速度が含まれていることが影響しているものと考えられる。それを除くと概ね一致した応答を示しており、打継目の不連続面を介した加速度の伝達を概ねうまく表現できていると考えられる。

加振中にロッキングに伴う回転挙動が生じることで、打継目端部に応力集中が発生し、その部分で剥落が生じた

と考えられる 2.345 秒（試験時間では 12.345 秒）の応力図を図-17 に示す。ここで、黒線が圧縮応力、赤線が引張応力を示している。筆者らは、既往の研究²⁾で剥落の原因として、摩擦力と鉛直力の合力が斜め方向に作用していることが原因だと推察した（図-18）。この応力図に示す通り、剥落が生じている打継目下部は、斜め方向の圧縮応力が生じている。圧縮応力の最大値は 0.26 N/mm² で、摩擦力に起因すると考えられる引張応力も 0.19 N/mm² 発生している。しかし試験時に実施したコンクリート割裂引張強度試験結果は 2.49 N/mm² でこれに比べると発生している応力は 1/10 程度となっている。この原因は、解析では、回転挙動が小さく評価されていることから、打継目に生じる圧縮応力、引張応力の分布範囲が広がっていることと考える。

c) 試番 9（最大加速度 1034gal）

次に試番 9（最大加速度 1034gal）について再現解析を実施した。

モデル底面の加速度時刻歴（図-19）より意図した通りに加振できていることを確認した。前ケースと同様に水平変位（図-20）は概ね再現できているものの、回転挙動（図-21）は解析値が小さい結果となっている。しかし図-22 に示す水平変位と回転角の関係より、回転角も途中までは整合していることが確認できる。試験では打継目下部が剥落した以降急激に回転角が増加している。これは試番 8 でも見られる傾向であるが、試番 9 では顕著である。解析モデルには、剥落は考慮しているものの、挙動中の剥落とは回転挙動に与える影響は異なると考えられる。打継目上部の水平加速度時刻歴を図-23 に示す。前ケースと同様に実測値と比較すると、解析値は全体的にスパイクが少なく幾分平滑化された波形を示すが、概ね一致した応答を示しており、打継目の不連続面を介した加速度の伝達を概ねうまく表現できていると考えられる。

(3) 供試体 No.2（鋼棒対策：打継目タイプ A）

a) 概要およびモデル化

平滑な打継目タイプ A で、鋼棒対策工を設置している供試体 No.2 を対象として再現解析を実施した。基本的なモデルは、供試体 No.1 と同じであるが、異なる鋼棒周辺の詳細を図-24 に示す。

鋼棒の物性値については奥行き方向の換算を行う。鋼棒は、φ 40 mm を 2 本設置しているため、断面積は 0.0025m² である。これを幅 0.04m、奥行き 0.66m、断面積 0.0264m² としてモデル化するため、面積の比率 $0.0264/0.0025 = 10.56$ で弾性係数を除して入力する。すなわち鋼棒の弾性係数は、 $2.0 \times 10^8 / 10.56 = 1.9 \times 10^7$ kN/m² とした。なお、鋼棒の応力は、算出されたはずみに実際の

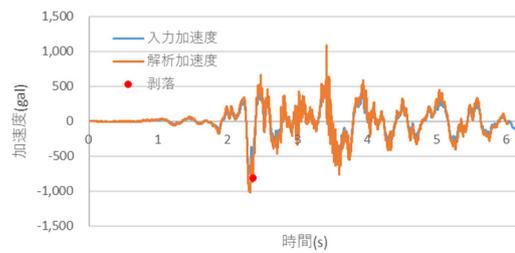


図-19 水平加速度時刻歴(ob-1)

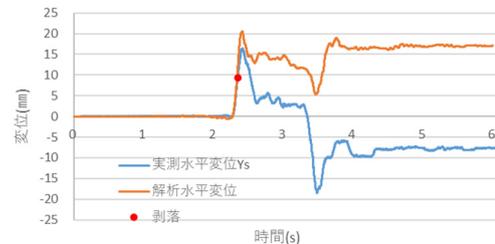


図-20 打継目上部の水平変位時刻歴

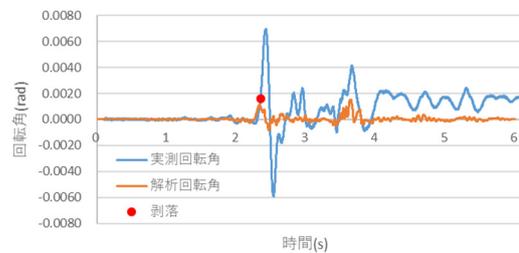


図-21 打継目上部の回転角時刻歴

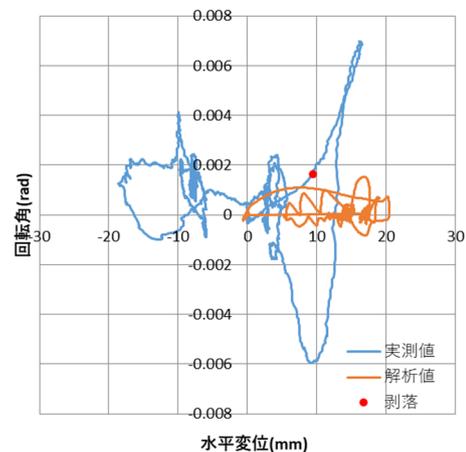


図-22 水平変位と回転角

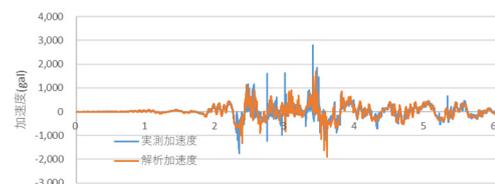


図-23 打継目上部の水平加速度時刻歴(ob-4)

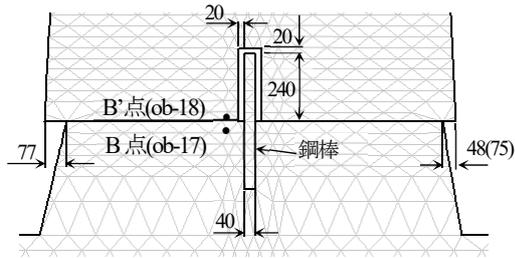


図-24 鋼棒付近のモデル詳細

弾性係数(2.0×10^8 kN/m²)を乗じて算出した。また、前項と同様に打継目下部の剥落を考慮したモデルとした。考慮した寸法は、試番 10 で左側 77mm, 右側 48mm, 試番 11 で左側 77mm, 右側 75mm である。

なお水平変位を算出する点 B,B'が、鋼棒上となり変位しないため、100mm 左に観測点 ob-17,18 を設定し、点 B,B'とした。

b) 試番 10 (最大加速度 1018gal)

試番 10 (最大加速度 1018gal) について再現解析を実施した。モデル底面の加速度時刻歴 (図-25) より意図した通りに加振できていることを確認した。水平変位 (図-26) はよく再現できているものの、試験では、鋼棒周辺の遊間 20mm を超える変位が発生し鋼棒に衝突しているが、解析では、最大変位は遊間をわずかに下回る 19.1mm で、鋼棒に衝突していない。図-28 に水平変位と回転角を図化した。破線で遊間を示している。供試体 No.1 と同様、急激に回転角が増加する 15mm まではよく再現できている。試験での 1 本目の鋼棒への衝突は、水平変位 19.9mm, 回転角 0.0026rad で、以降水平変位は減少し回転角が増加することがわかる。2 本目の鋼棒への衝突は水平変位 21.7mm の時点で、これ以上水平変位は増加せず、回転角のみ増加している。解析では鋼棒に衝突していないためこの挙動は生じておらず、回転挙動 (図-27) は解析値が小さい結果となっている。

打継目上部の水平加速度時刻歴を図-29 に示す。実測値では、鋼棒に衝突した瞬間と考えられる大きな加速度が生じているが、解析値はこれがなく全体的に平滑化された波形を示すが、衝突時付近を除けば概ね一致した応答を示している。

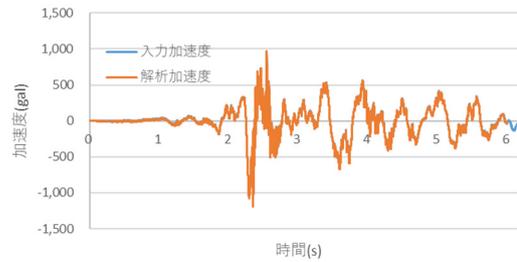


図-25 水平加速度時刻歴(ob-1)

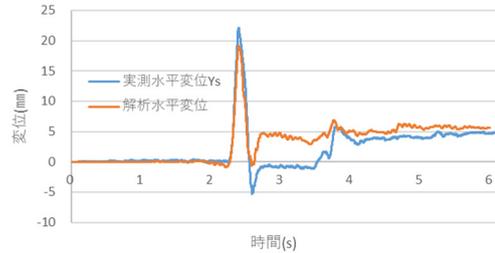


図-26 打継目上部の水平変位時刻歴

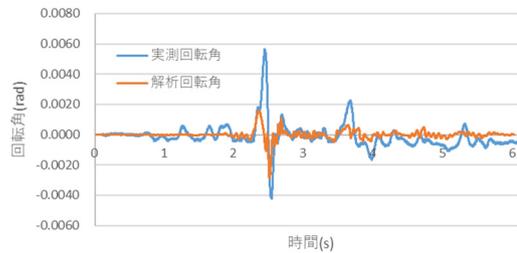


図-27 打継目上部の回転角時刻歴

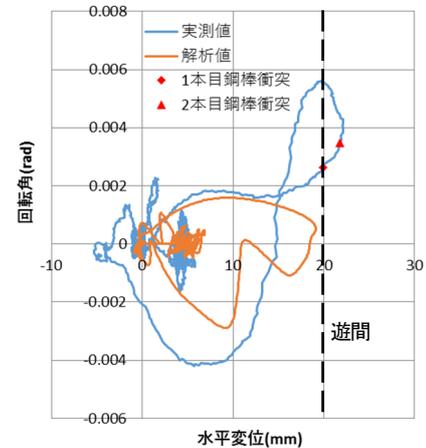


図-28 水平変位と回転角

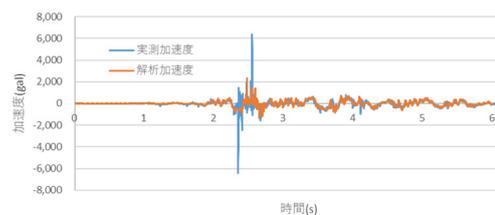


図-29 打継目上部の水平加速度時刻歴(ob-4)

c) 試番 11 (最大加速度 1248gal)

試番 11 (最大加速度 1248gal) について再現解析を実施した。モデル底面の加速度時刻歴 (図-30) より意図した通りに加振できていることを確認した。

鋼棒に衝突している点も含め水平変位 (図-31) はよく再現できており、これに伴う大きな回転 (図-32) も再現されている。水平変位と回転変位との関係 (図-33) より、鋼棒に衝突することにより回転角が 0.005rad から 0.017rad まで 0.012rad 増加しており、鋼棒の設置により水平変位は抑制することができるものの、回転角は増加することがわかった。

打継目上部の水平加速度時刻歴を図-34 に示す。本ケースでは、実測値と同様に解析値にも、鋼棒に衝突した瞬間と考えられる大きな加速度が生じている。実際の試験では、挙動により加振直角方向に回転が生じることで、各鋼棒の遊間がばらつき、複数回の衝突が生じていることからスパイクが多くなっていると考えられる。解析値はこれがないためスパイクが少なくなっている。この影響もあり衝突時を除けば概ね一致した応答を示している。

図-35,36 に鋼棒と衝突した 2.380 秒の応力図と変位図を示す。下部が左に変位するのに対して、上部はすべりが発生して変位差が生じ、変位差が遊間の 20 mm を超えた瞬間に鋼棒に衝突している。これにより鋼棒には左側からの水平力による曲げモーメントが発生し、左側には引張応力、右側には圧縮応力が生じている。鋼棒埋込み部には圧縮応力が生じており、鋼棒からのコンクリートへの応力伝達も的確に表現されている。鋼棒には要素重心で 48N/mm²、表面で 73N/mm² の応力が発生しており、試験では降伏強度(474N/mm²)を超える応力が測定されたこととは異なり小さな値となっている。

図-37 に打継目上部に作用する水平荷重を示す。解析値は、打継目上部の重心位置(ob-4)の水平方向加速度に打継目上部の質量 4.482t を乗じて算出した (試験値の算出方法は参考文献²⁾による)。図-38 に打継目上部に作用する水平荷重と水平変位の関係を示す。これには、試験の実測値と、それにノイズ除去を目的として 15Hz のローパスフィルタ処理を行った値もあわせて示した。解析値は、実測値とフィルタ処理した実測値の中間的な結果となっている。荷重の最大値は解析値とフィルタ処理していない実測値と概ね一致している。全体の荷重は一致していることから、解析で算出されたコンクリートや鋼棒に生じる応力が小さい原因は、摩擦力の分布範囲や、打継目界面と鋼棒との分担の差によると考えられる。

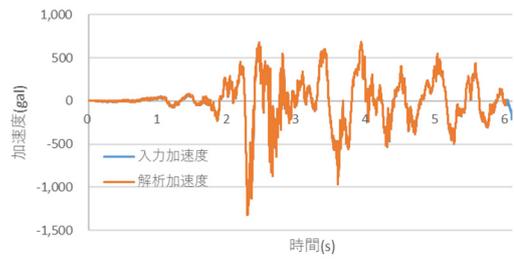


図-30 水平加速度時刻歴(ob-1)

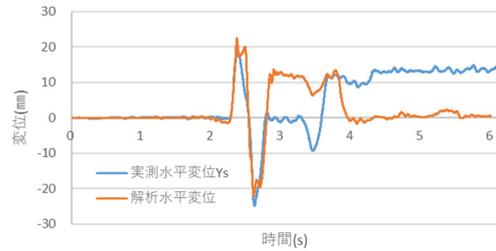


図-31 打継目上部の水平変位時刻歴

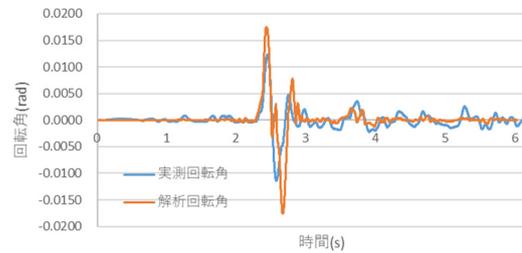


図-32 打継目上部の回転角時刻歴

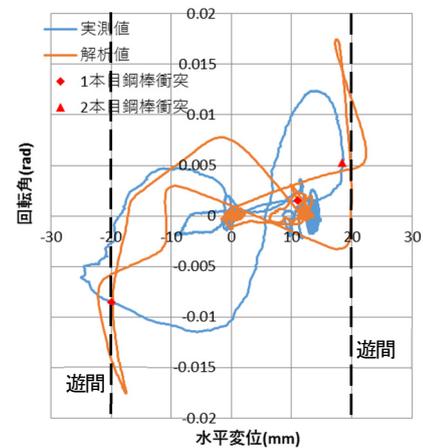


図-33 水平変位と回転角

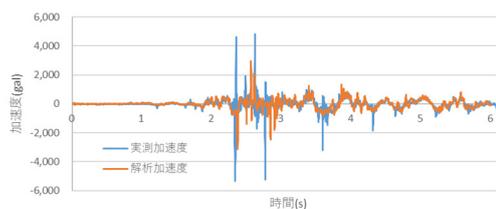


図-34 打継目上部の水平加速度時刻歴(ob-4)

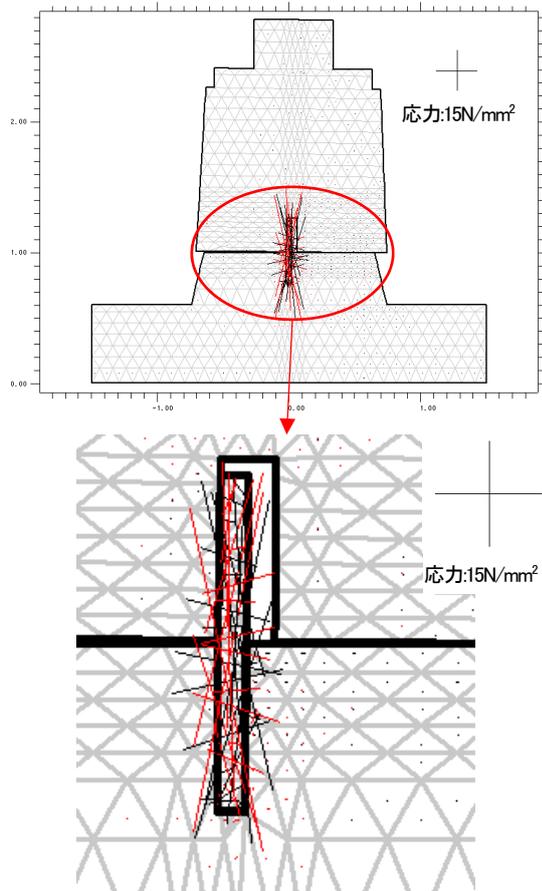


図-35 応力図(2.380秒)

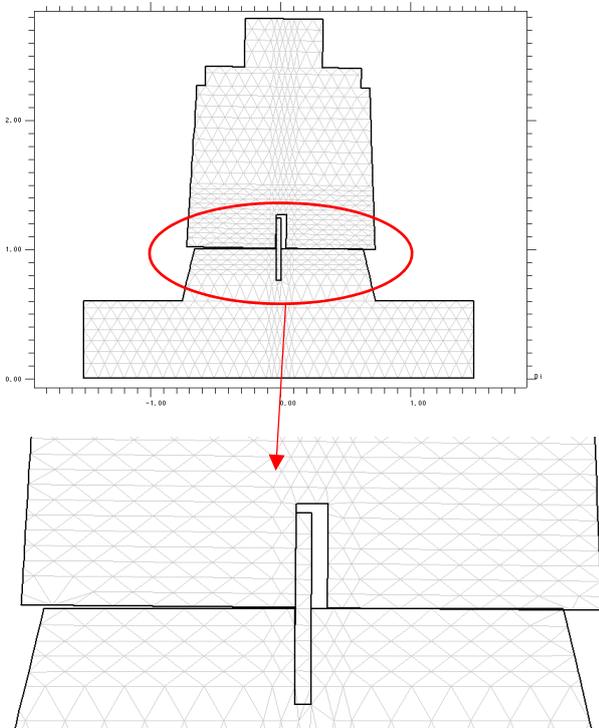


図-36 変位図(2.380秒)

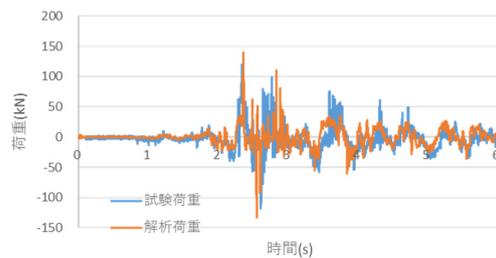


図-37 打継目上部に作用する水平荷重

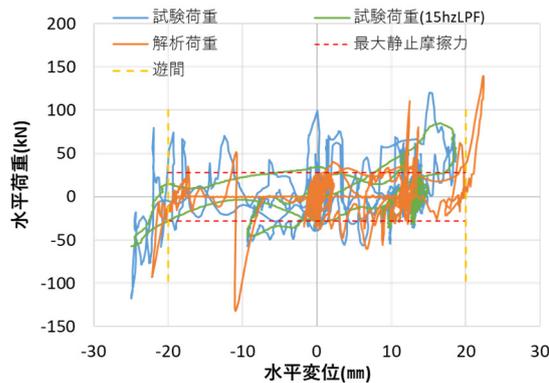


図-38 水平荷重と水平変位の関係

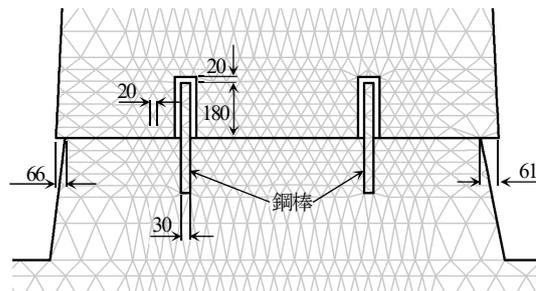


図-39 鋼棒付近のモデル詳細

(4) 供試体 No.3 (鋼棒対策：打継目タイプ B)

a) 概要およびモデル化

付着のある打継目を破断した粗な打継目タイプ B で、鋼棒対策工を設置している供試体 No.3 を対象として再現解析を実施した。

解析モデルの鋼棒周辺を図-39 に示す。鋼棒の物性値は、前項と同様に換算を行う。鋼棒は、 $\phi 30$ mm を 2 本を 2 列設置しているため、1 列当りの断面積は 0.0014m^2 である。これを幅 0.03m 、奥行き 0.66m 、断面積 0.0198m^2 としてモデル化するため、面積の比率 $0.0198/0.0014 = 14.14$ で弾性係数を除して入力する。すなわち鋼棒の弾性係数は、 $2.0 \times 10^8 / 14.14 = 1.4 \times 10^7 \text{kN/m}^2$ とした。なお、鋼棒の応力については、算出されたひずみに実際の弾性係数 ($2.0 \times 10^8 \text{kN/m}^2$) を乗じて算出した。また、前項と同様に打継目下部の剥落を考慮している。考慮した寸法は、左側 66mm 、右側 61mm である。

b) 試番 14 (最大加速度 1436gal)

試番 14 (最大加速度 1436gal) について再現解析を実施した。

モデル底面の加速度時刻歴 (図-40) より意図した通りに加振できていることを確認した。

図-41 に水平変位を示す。付着のある打継目を破壊した粗な打継目で、摩擦角のバラつきも大きいと考えられるため、変位の生じるタイミングや向きは一致するものの、変位量は整合しない結果となった。2.4 秒付近の挙動では、試験では鋼棒に衝突しているのに対して、解析では衝突していない。また 2.6 秒付近ではその逆となっている。しかし回転挙動 (図-42) は比較的よく再現されている。4 秒以降の比較的小さな加速度では、試験では水平変位や回転角に大きな挙動が生じているが、解析ではほとんど挙動は生じていない。これは、図-43 に示すように試験では、挙動により加振直角方向に回転が生じることで、各鋼棒の遊間がばらつき、比較的小さな変位で 1 本目の鋼棒に衝突していることが要因の一つと考えられる。なおその際には回転により各鋼棒には衝突する時間が異なるのに対して、解析では全ての鋼棒が同時に衝突していることから、挙動が再現困難になっているものと考えられる。

打継目上部の水平加速度時刻歴を図-44 に示す。鋼棒に衝突した時刻が、実測と解析で異なるため、スパイクの時刻は異なっているものの、スパイクの大きさにも大差はなく、打継目の不連続面や鋼棒を介した加速度の伝達を概ねうまく表現できていると考えられる。

図-45,46 に応力図を示す。なお算出時刻は図-40~42 の図中にも示している。2.331 秒では、鋼棒には衝突していないため、コンクリートに応力が生じている。コンクリートに生じる圧縮応力の最大値は 1.49 N/mm^2 、引張応力の最大値も 0.95 N/mm^2 で、割裂引張強度試験結果 2.49 N/mm^2 に比べると小さい。鋼棒の下端付近のコンクリートに応力集中がみられるが、これは 2 次元解析のため、コンクリートに切欠きを設けているようにモデル化されていることから生じているもので、実際にはコンクリート中に鋼棒が埋め込まれているため問題はない。鋼棒に衝突した 2.590 秒では、鋼棒に大きな応力が生じて、コンクリートにはあまり応力が生じていないことがわかる。鋼棒に発生している応力は、要素重心で 118 N/mm^2 、表面で 177 N/mm^2 で、試験では降伏強度 (474 N/mm^2) を超える応力が測定されたこととは異なり小さな値である。

図-47,48 に打継目上部に作用する水平荷重、水平荷重と水平変位の関係を示す。供試体 No.2 と同様、荷重の最大値は解析値とフィルタ処理していない実測値と概ね一致している。全体の荷重は一致していることから、解析で算出された応力が小さい原因は、摩擦力の分布範囲や、打継目界面と鋼棒との分担の差によると考えられる。

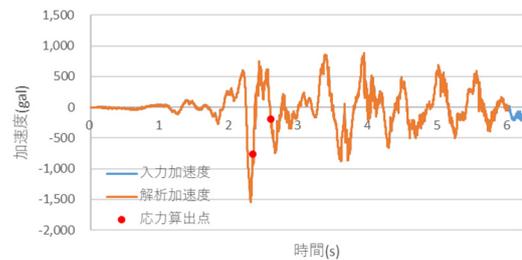


図-40 水平加速度時刻歴(ob-1)

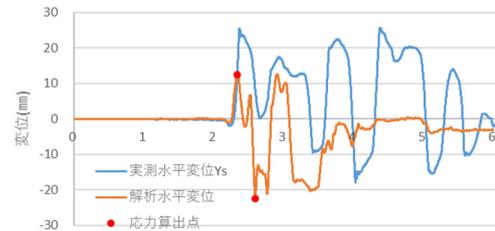


図-41 打継目上部の水平変位時刻歴

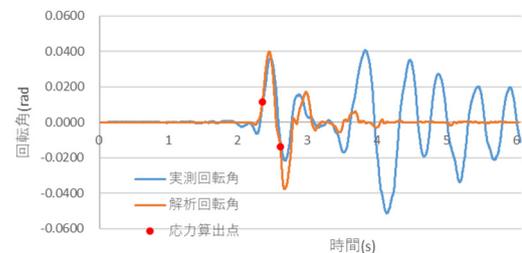


図-42 打継目上部の回転角時刻歴(ob-4)

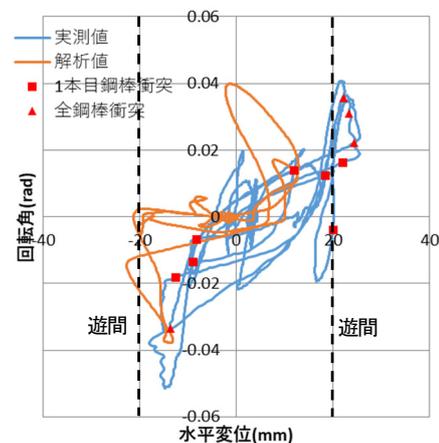


図-43 水平変位と回転変位

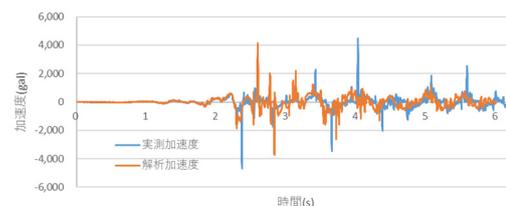


図-44 打継目上部の水平加速度時刻歴

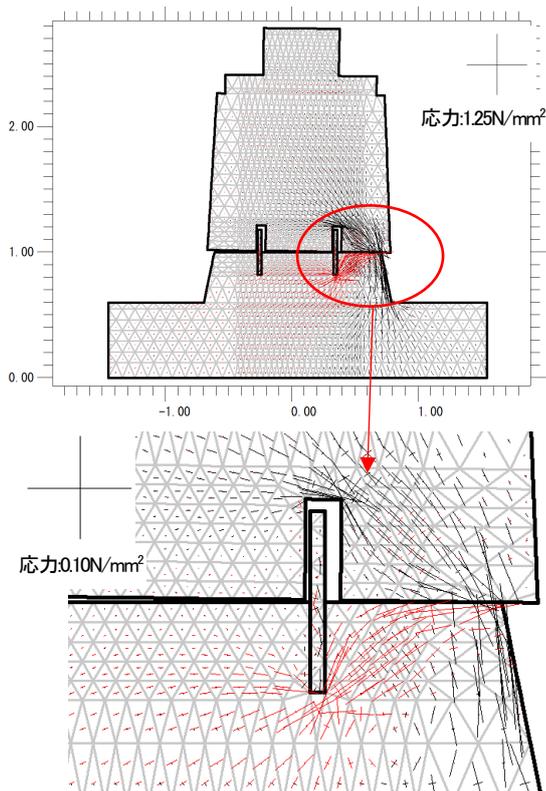


図-45 応力図(2.331秒)

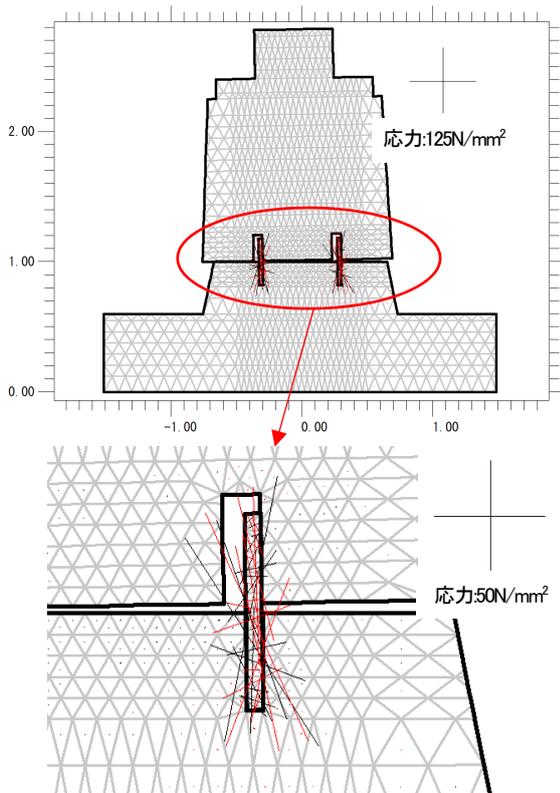


図-46 応力図(2.590秒)

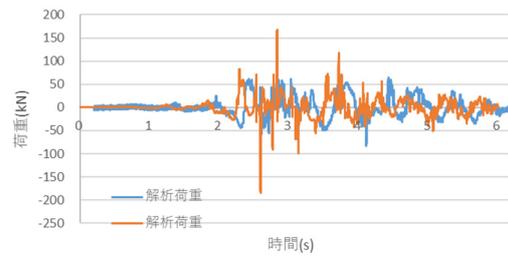


図-47 打継目上部に作用する水平荷重

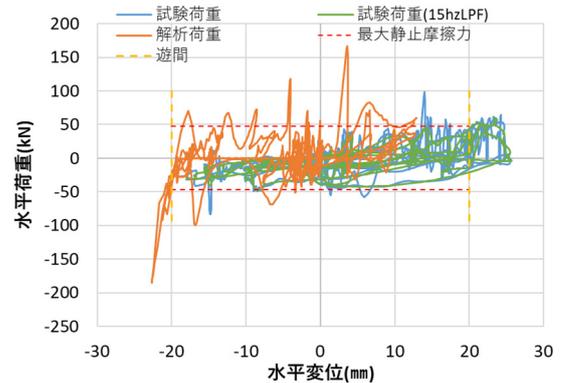


図-48 水平荷重と水平変位の関係

4. まとめ

NMM を用いて動的試験の再現解析を行うことで、地震時の挙動や破壊形態および対策工の効果を検証した。本研究より得られた知見は以下の通りである。

- NMM を用いて水平変位（すべり）を対象とした理論値解析を実施し、解析の妥当性が確認できた。
- 動的試験の再現解析では、水平変位や打継目の不連続面を介した加速度の伝達は概ね再現できた。
- 回転挙動は、打継目が平滑で最大静止摩擦角 32.65° の供試体 No.1 や供試体 No.2 の鋼棒に衝突しない場合、回転角 0.001rad 程度までは一致しているものの、これ以降回転角が減少し、最大変位角が過小に評価されている。この原因には、試験中の打継目下部コンクリートの剥落が考慮できていないことと考えられる。これに対して、供試体 No.2 で鋼棒に衝突した場合や、打継目が粗で最大静止摩擦角 46.99° の供試体 No.3 では、回転挙動をよく再現することができた。
- 鋼棒に衝突することにより回転が生じるため、鋼棒を設置することにより、水平変位は抑制することができるものの、回転角は増加する。
- 剥落時の応力状態、鋼棒への衝突により鋼棒に生じる曲げモーメントや、鋼棒からコンクリートへの応力伝達も表現できたが、応力の値は小さい。
- 打継目上部に作用する水平荷重は、概ね試験値と

一致した。全体の荷重は一致していることから、解析で算出されたコンクリートや鋼棒に生じる応力が小さい原因は、摩擦力の分布範囲や、打継目界面と鋼棒との分担の差によると考えられる。

本研究における再現解析では、動的試験自体がばらつきのある大きな試験ということもあり、実測値を完全に再現できたわけではないが、挙動や荷重、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。

残された今後の課題は次のとおりである。

- 移動制限装置に衝撃を吸収する緩衝工を設置することで、鋼棒に作用する力が減少することが考えられることから、緩衝工の効果と、鋼棒を含めた移動制限装置のスリム化について検討を行う。
- 基礎をモデル化し、移動制限装置による基礎の応答の変化について検討する。

謝辞：本検討を進めるに当たり、（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）の委員各位より多数の貴重なご助言を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 新潟大学工学部建設学科地盤工学研究室：新潟県中越地震調査第6報(11.1), <http://geotech.eng.niigata-u.ac.jp/chuetsu/report-1101/report-1101.html> (2018年8月8日閲覧)
- 2) 坂岡和寛, 大坪正行, 和田一範, 小山倫史：無筋橋脚の打継目移動制限装置による地震対策工法の実験的研究, 土木学会第37回地震工学研究発表会, A21-1102, 2017.10
- 3) 坂岡和寛, 橋本涼太, 小山倫史：離散体の地震応答解析におけるマニフォールド法(NMM)の適用に関する基礎的研究, 岩の力学連合会第14回岩の力学国内シンポジウム, 2017.1
- 4) 古川愛子, 矢野翔大, 清野純史：鉄道無筋コンクリート橋脚の地震時破壊挙動の数値解析に関する研究, 土木学会第37回地震工学研究発表会, A21-1231, 2017.10
- 5) 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.
- 6) 大西有三, 田中誠, 伊藤崇博：マニホールド法による斜面上岩石ブロックの挙動解析, 土質工学研究発表会発表講演集, Vol.30, No.3-2, pp.1233-1236, 1995.5
- 7) 橋本涼太, 小山倫史, 菊本統, 三村衛：節点ベース要素で拡張した弾塑性 NMM-DDA の開発と検証, 地盤工学ジャーナル, Vol.11, No.2, pp.163-177, 2016.5
- 8) 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
- 9) 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, 2018 (掲載決定).
- 10) (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物, 丸善, 2004.4
- 11) 小山倫史, 赤尾悟史, 大西有三, 西山哲：岩盤斜面の地震応答解析における不連続変形法 (DDA) の適用に関する研究, 土木学会論文集 C, 2009; 65(3): 644-662.

(????? 受付)

ANALYTICAL STUDY ON THE SEISMIC RETROFIT OF PLAIN CONCRETE PIERS USING THE MOVEMENT RESTRAINING DEVICES FOR THE CONSTRUCTION JOINT

Kazuhiro SAKAOKA, Tomofumi KOYAMA, and Ryota HASHIMOTO

Many plain concrete piers have been used as railway structures at present. At the time of a large earthquake, the horizontal perforated crack or slide along the construction joint and spalls under the construction joint are frequently occurred due to their earthquake-resistant lowness.

The authors carried out a series of dynamic loading tests using a large shaking table against the 1/2.5 scale specimen simulating plain concrete piers having a construction joint and with and without a joint movement restricting device installed, and the dynamic response such as sliding and rotation are investigated. From this study, it was confirmed that the similar misalignment as the damaged case and peeling of the lower joint concrete were observed. Also, a series of dynamic loading tests was reproduced and analyzed by using the Manifold method (NMM). The horizontal displacement and the rotation of upper concrete block can be reproduced mostly by the numerical simulations, and the stress of the concrete and the steel rod during the excitation can be also evaluated properly.