

滑り・剥離現象を考慮した 直接基礎底面の接地率に関する一考察

山下 典彦¹・甲田 啓太²・宮脇 幸治郎³

¹ 正会員 博士(工学) 大阪産業大学教授 工学部都市創造工学科 (〒574-8530 大阪府大東市中垣内 3-1-1)

E-mail: yamasita@ce.osaka-sandai.ac.jp

² 学生会員 大阪産業大学大学院 工学研究科 (〒574-8530 大阪府大東市中垣内 3-1-1)

E-mail: s17mk01@ge.osaka-sandai.ac.jp

³ 博士(工学) 大阪府立工業高等専門学校名誉教授 (〒572-8572 大阪府寝屋川市幸町 26-12)

E-mail: catfish0@zeus.eonet.ne.jp

直接基礎底面の滑り・剥離現象の把握に関して、基礎底面と地盤との接地率の変化やエネルギー収支について検討されており、ウェーブレット解析を取り入れているものもある。しかし、ウェーブレット解析の観点から接地率とウェーブレット係数の関係性を考察したものは少なく、接地率の変化を分析出来れば、構造物全体の構造健全性の評価に貢献出来ると考えられる。本研究では、解析モデルを剛体基礎と地盤の滑り・剥離現象を考慮したせん断ばねと回転ばねの2自由度系とRC橋脚を回転1自由度系とした、合計3自由度系のSRモデルで表現する。そして、非線形地震応答解析で得られた、慣性力作用位置における絶対応答加速度波形にウェーブレット解析を行い、接地率とウェーブレット係数の関係について考察する。

Key Words: Contact ratio, Slippage and separation, Spread foundation, SR model

1. はじめに

橋梁等構造物において、地震時に直接基礎底面と地盤間には、滑り・剥離現象が生じる可能性が高く、動的相互作用の観点から考察した研究は多い^(例えば 1)2)。これらの研究では、構造物全体のエネルギー収支や基礎底面と地盤の接地率及び、極限支持力を対象に考察している。

しかし、滑り・剥離現象に伴う振動特性の変化をウェーブレット解析の観点から考察した研究は少ない。そうした中で、麻里ら³⁾は、建築物を対象に基礎の浮き上がりを考慮した解析モデルにより、上部構造の鉛直及び水平変位にウェーブレット解析を実施し、浮き上がり大きい場合は上部構造と基礎のロッキング振動が逆位相で振動する、水平2次モードが卓越する事を示している。

既往の研究⁴⁾では、平成7年兵庫県南部地震等で得られた加速度波形を使用して、直接基礎で支持されるRC橋脚を対象に非線形地震応答解析を実施した。そして、慣性力作用位置で得られる絶対応答加速度波形をウェーブレット解析し、基礎底面の滑り・剥離現象の検出について考察した。その結果、ウェーブレット係数の振幅が大きい時刻は、滑り・剥離現象を検出する事が示唆され、

特に長周期成分を多く含む入力地震動では、その影響が顕著に現れる傾向がある事を示した。しかし、基礎底面と地盤間の接地率については検討しておらず、基礎の挙動を把握する上で検討する必要があると考えられる。

そこで、本研究では、参考文献4)と同じ、剛体基礎と地盤の滑り・剥離現象を考慮したせん断ばねと回転ばねの2自由度とRC橋脚を回転1自由度とした合計3自由度系のSRモデルを使用する。そして、既往の研究で得られた結論より、長周期成分を多く含み、接地率が大きく低下する入力地震動を含む合計3波の地震波を用いた非線形地震応答解析から、慣性力作用位置における絶対応答加速度波形にウェーブレット解析⁵⁾を実施する。その結果から、基礎底面の挙動パターンを分析し、接地率とウェーブレット係数の関係について考察する。

2. 解析の概要

本研究における非線形地震応答解析は、増分法($\beta=1/6$)で、時間刻みを0.001秒とし、入力地震動を線形補間して実施した。また、非線形地震応答解析結果に対するデ

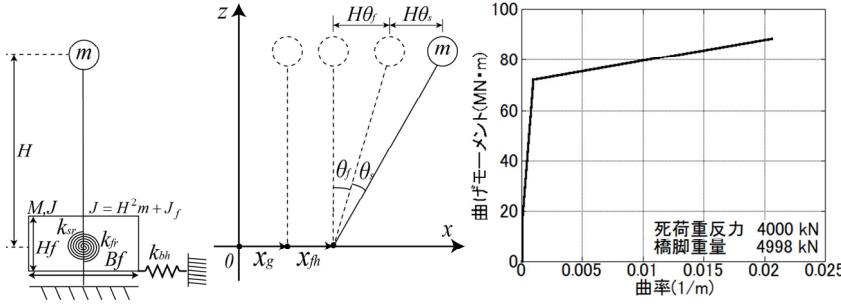


図-1 解析モデル

図-2 RC橋脚のM- ϕ 関係

表-1 解析モデルの諸定数

基礎重心から慣性力作用位置までの高さ H (m)	14.75
基礎高さ H_f (m)	2.5
基礎幅 B_f (m)	8.0
基礎の質量 M (t)	400
基礎の回転慣性 J_f ($t \cdot m^2$)	4,267
土の単位体積重量 (kN/m^3)	20.0
地盤N値	50
ポアソン比	0.3

一タ解析手法はウェーブレット解析を使用し、その際、実橋梁においても容易に観測可能と考えられる、上部質点の絶対応答加速度波形に着目した。ここで、ウェーブレット解析時のウェーブレット関数は、Meyer型の構築法に属するMallat⁶⁾のものを使用する。

本研究では、参考文献4)と同じ橋脚モデルを使用しており、図-1に解析モデル、図-2にRC橋脚の骨格曲線、表-1に橋脚と地盤の諸定数をまとめる。また、式(1)に減衰項を省略した振動方程式を示す。

$$\begin{aligned}
 [M]\{\ddot{q}\} + [K]\{q\} &= -[M]\{\ddot{q}_g\} \\
 [M] &= \begin{bmatrix} mH^2 & mH & mH^2 \\ mH & m+M & mH \\ mH^2 & mH & mH^2 + J \end{bmatrix}, \{q\} = \begin{Bmatrix} \theta_s \\ x_{fh} \\ \theta_f \end{Bmatrix} \\
 [K] &= \begin{bmatrix} k_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & k_{bh} & -k_{bh}H_f/2 \\ 0 & -k_{bh}H_f/2 & k_{fr} + k_{bh}H_f^2/4 \end{bmatrix}, \{\ddot{q}_g\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \ddot{x}_g \\ 0 \end{Bmatrix}
 \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 H は基礎重心位置から慣性力作用位置までの高さ、 H_f は基礎高さ、 B_f は基礎幅、 m は上部質点の質量、 M は基礎の質量、 J は回転慣性であり、 k_{sr} 、 k_{fr} 、 k_{bh} はそれぞれ橋脚の回転ばね、基礎の回転ばね、基礎底面のせん断ばねを意味する。

また、解析時の減衰マトリクスは、Rayleigh型減衰を使用し、入力地震動は、平成7年兵庫県南部地震JMA神戸NS成分、平成23年東北地方太平洋沖地震K-NET築館NS成分、平成28年熊本地震益城町宮園EW成分（以下順に、神戸NS、築館NS、宮園EW）を使用した。図-3に入力地震動のフーリエスペクトルを示す。

3. 滑り・剥離現象を考慮した復元力モデル

基礎-地盤系の復元力モデルは、参考文献4)と同じく、Winklerモデルの考え方⁷⁾から導出されるものである。また、基礎側面の地盤を考慮しないため、鉛直方向に作用する基礎底面の地盤反力を集約した回転ばねと、基礎底面と地盤間に水平方向に作用するせん断ばねから、基礎-地盤系の復元力モデルを構築する。

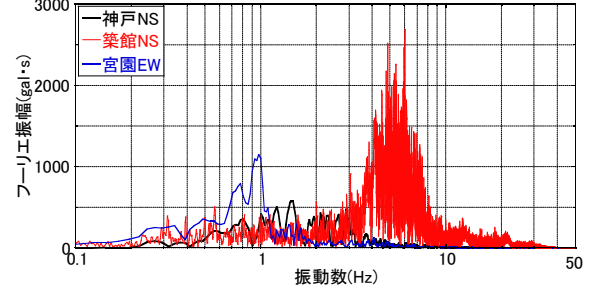


図-3 入力地震動のフーリエスペクトル

基礎の回転ばねの復元力特性は参考文献7)より、骨格曲線を双曲線型とし、履歴法則はMasing則に従わせる。また、基礎の回転振動は式(2)で算出される回転角 θ_{fy} を超えることで、基礎底面と地盤間に剥離が生じ、接地率 η が減少する。接地率は、参考文献7)より剥離により接地距離が変化し、正方形基礎では式(3)で求められる。

$$\theta_{fy} = 0.37 \frac{W}{4k_{fr(1)}/\pi a} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{A'_f}{A_f} = \frac{B_f B'_f}{A_f} = \frac{B_f B_f}{A_f} \frac{\sqrt{\theta_{fy}}}{\sqrt{|\theta_f|}} = \sqrt{\frac{\theta_{fy}}{|\theta_f|}} \quad (3)$$

ここに、 W は構造物全体の重量、 a は基礎の等価半径、 $k_{fr(1)}$ は基礎回転ばねの初期剛性、 B'_f 及び A'_f は剥離後の基礎底面と地盤間の回転方向の接地距離及び接地面積、 A_f は剥離前の接地面積を意味する。

底面のせん断ばねの復元力特性は完全弾塑性型の骨格曲線を持つ非線形弾性モデルを基本とし、式(4)で初期剛性 $k_{bh(1)}$ を算出する。ここで、基礎底面に滑り現象が生じる降伏変位は、接地面積の影響を受けるため、基礎の回転角が θ_{fy} 以下では式(5)から降伏変位 $x_{by(1)}$ が求まり、 θ_{fy} を超えると式(6)から降伏変位 $x_{by(2)}$ が求まる。

$$k_{bh(1)} = G_b a \frac{8}{2 - \nu_b} \quad (4)$$

$$x_{by(1)} = \frac{c + \frac{W}{3a^2} \tan \phi}{k_{bh(1)}/\pi a^2} \quad (|\theta_f| \leq \theta_{fy}) \quad (5)$$

$$x_{by(2)} = \frac{c + \frac{W}{3a^2} \tan \phi}{k_{bh(1)}/\pi a^2} \cdot \eta \quad (|\theta_f| > \theta_{fy}) \quad (6)$$

ここに、 G_b はせん断弾性係数、 c は粘着力、 ϕ は内部摩擦角を意味する。

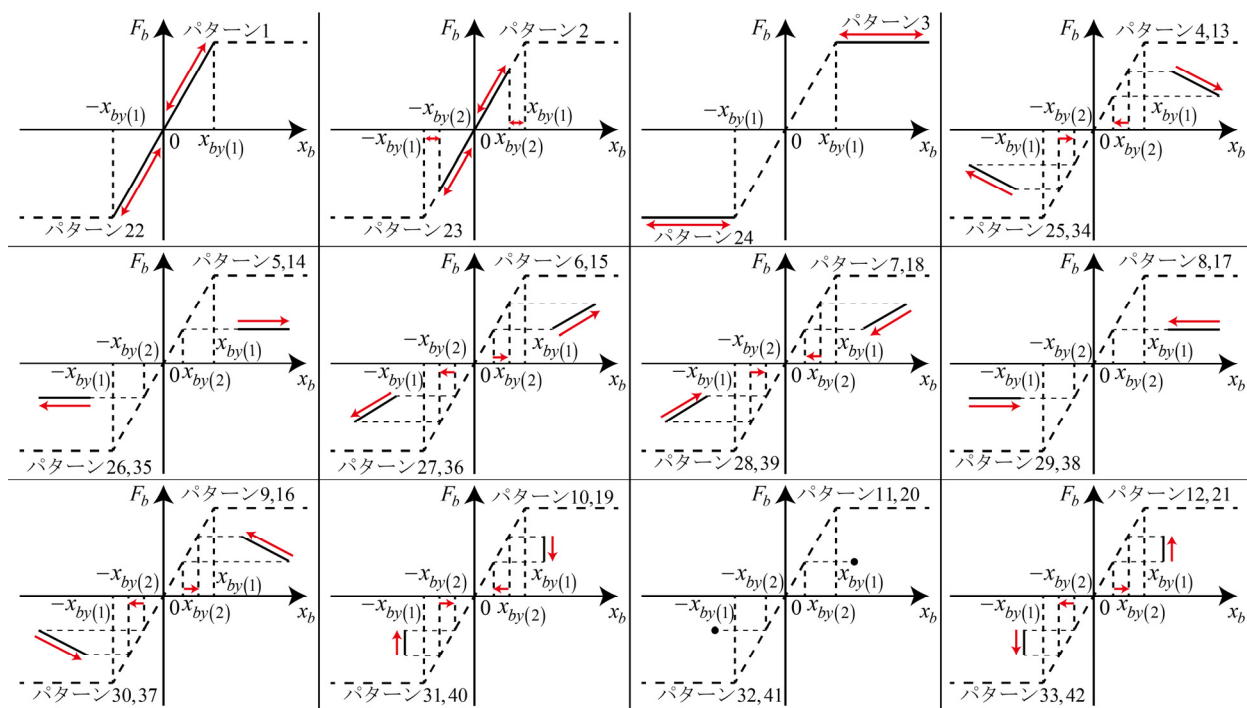


図-4 基礎底面のせん断ばねにおける挙動パターン

式(6)より、基礎底面のせん断ばねにおける降伏変位は、接地率の影響を受けて動的に変化するため、複雑な挙動を示す。そのため、基礎底面の変位や基礎の回転角の関係により全 42 種の挙動パターンに分類する事が出来る。

そこで、図-4 に基礎底面の復元力-変位関係の挙動図とその挙動パターンの番号を示し、表-2 に基礎底面の変位が正側に生じている場合において、滑り・剥離共に生じるパターン 4-21 の分類をまとめる。

以上より、基礎底面のせん断ばねが接地率の影響を受け、構造物全体の応答に変化をおよぼす。そのため、滑り・剥離現象をウェーブレット解析により分析する事で、接地率とウェーブレット係数の関係を見出せる可能性がある。したがって、本研究では、基礎底面のせん断ばねを線形とした場合と、上記の滑り・剥離現象を考慮した復元力特性を用いた場合の結果を比較して、接地率とウェーブレット係数の関係を検討する。

4. ウェーブレット解析による滑り・剥離現象

本章では、滑り・剥離現象の影響を非線形地震応答解析結果とそのウェーブレット解析により分析し、接地率とウェーブレット係数の関係を検討する。

図-5 に滑り・剥離現象の影響をウェーブレット解析の観点から分析するために、基礎底面のせん断ばねを線形とした場合と滑り・剥離現象を考慮した場合において、それぞれの絶対応答加速度波形におけるウェーブレットスペクトル W_{sp} ⁵⁾を示す。全地震動で分解係数 $j=6$ にウェーブレットスペクトルの最大値が現れている。また、神

表-2 基礎底面の変位が正側における挙動パターンの分類

状態	増減		挙動パターン
	底面変位	基礎回転	
正	+	+	4
		-	6
		0	5
	-	+	7
		-	9
		0	8
	0	+	10
		-	12
		0	11
負	+	+	15
		-	13
		0	14
	-	+	16
		-	18
		0	17
	0	+	21
		-	19
		0	20

戸 NS 及び宮園 EW では、築館 NS と比較して滑り・剥離現象の影響が顕著に現れており、線形のウェーブレットスペクトルとの変化を確認する事が出来る。したがって、以降の検討では主に神戸 NS 及び宮園 EW の結果を対象に考察を進める。

続いて、神戸 NS 及び宮園 EW において、滑り・剥離現象の影響を時間領域から分析するために、図-6 にそれぞれの絶対応答加速度波形を線形と滑り・剥離で重ねて示す。図より、両地震動共に 5 秒以降に滑り・剥離現象による影響が確認出来る。そのため、ウェーブレット解析で分析する対象時間は、神戸 NS では 5.2~6.2 秒、宮園 EW では 5.8~6.8 秒とし、分解係数 $j=0$ のウェーブレット係数に着目⁴⁾して分析する。

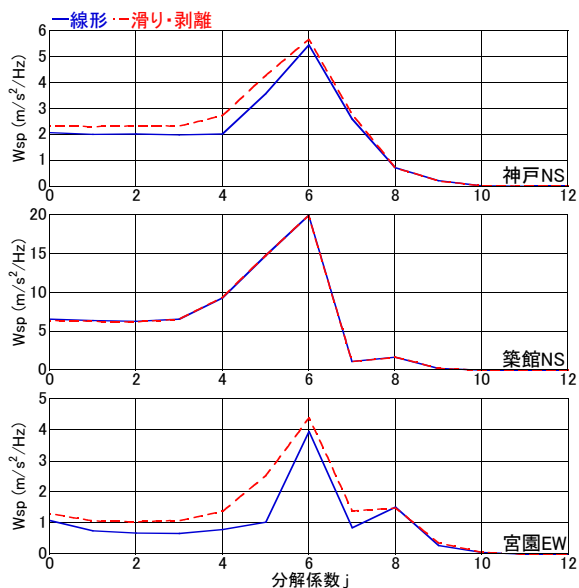


図-5 地震動ごとのウェーブレットスペクトル Wsp

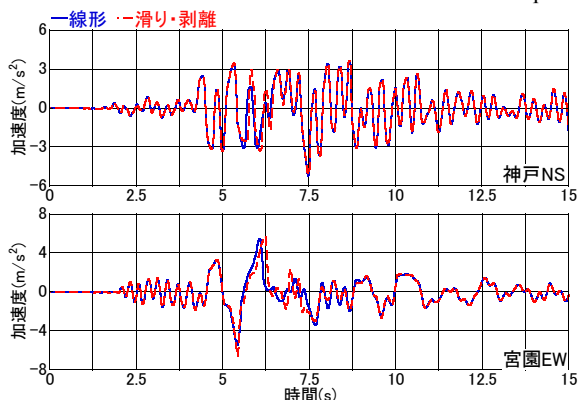


図-6 絶対応答加速度波形

図-7に神戸NSと宮園EWの線形及び滑り・剥離のウェーブレット係数に接地率を重ねて示す。図より、対象時間のウェーブレット係数は滑り・剥離が線形と比較して大きく、それぞれの地震動で0.2秒ごとに区切ると、神戸NSは5.6~5.8秒、宮園EWは6.2~6.4秒に大きなウェーブレット係数が生じている。また、接地率と合わせて分析すると、神戸NSでは、接地率が低下し始める5.8秒付近でウェーブレット係数が大きくなっている。宮園EWでは、6.2~6.4秒の接地率が約25%と非常に低下している区間にウェーブレット係数が大きく現れ、滑り・剥離現象の影響を検出している事が示唆される。

そのため、図-7でウェーブレット係数が大きく現れた原因を分析するために、図-8にそれぞれの地震動において、ウェーブレット係数が特に大きく現れた時間における、基礎底面のせん断ばねの復元力-変位関係を示す。ここで、図-8には式(5)で算出される剥離前の降伏変位による骨格曲線を点線で示している。図-8より、滑り・剥離に着目すると、神戸NSでは弾性応答と塑性化した応答が含まれ、ウェーブレット係数はこの復元力-変位関係における勾配の急変を検出している事が示唆される。しかし、宮園EWでは、塑性化した応答のみであり、神

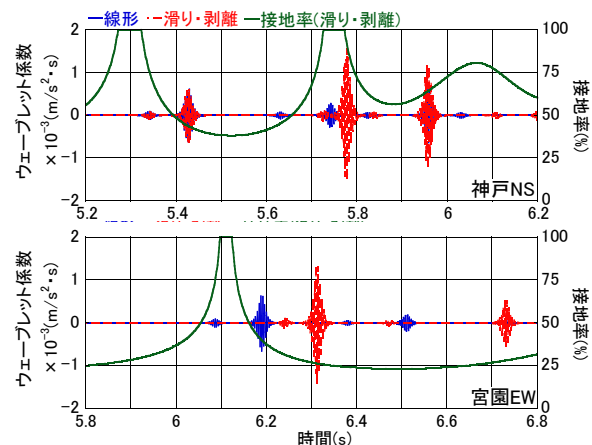


図-7 接地率とウェーブレット係数(j=0)

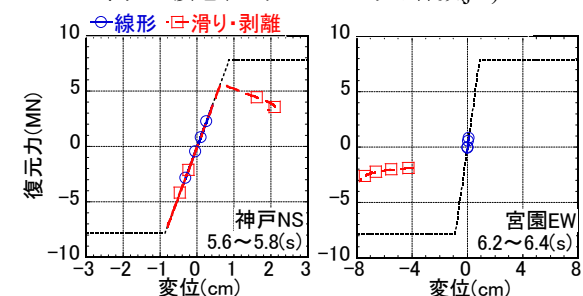


図-8 基礎底面のせん断力に関する復元力-変位関係

戸NSのような勾配が急変する箇所を確認出来ない。

そこで、宮園EWにおいて復元力の変化を分析するため、図-9に橋脚と基礎底面の復元力増分の絶対値を示す。図より、橋脚の復元力増分が6.2秒過ぎで急変しており、図-7の宮園EWのウェーブレット係数が大きく増大する時間に近い事が分かる。そのため、橋脚に生じる復元力の変化を検出している事が示唆される。

ここで、図-9において、基礎底面のせん断ばねの復元力増分が6.1秒付近で急激に0に低下している。このことから、基礎底面の挙動パターンを把握するため、図-7の対象時間において、図-10に神戸NS及び宮園EWにおける、基礎底面のせん断ばねに生じる復元力と図-4で説明した挙動パターンの時刻歴の変化を示す。図-10より、宮園EWで6.1秒付近に復元力の変化が存在しない時間が確認でき、同じ時間でパターン24に分類されている。この事より、この時間では剥離は生じておらず、滑りのみが発生していた事が分かる。

さらに、図-10から、滑り・剥離は基礎の回転振動と相互の作用を及ぼすため、基礎底面のせん断ばねは線形と非線形の領域を複雑に変化している事が復元力及びその挙動パターンの番号で確認出来る。また、両地震動ともに、復元力と図-4で定めた挙動パターンの番号に逆転した関係性が存在している結果が得られた。

以上より、接地率とウェーブレット係数の関係を見出すために、図-11に接地率とウェーブレット係数の散布図を全地震動で示す。図より、全地震動で接地率が低い帯域で大きなウェーブレット係数が現れる傾向にあり、

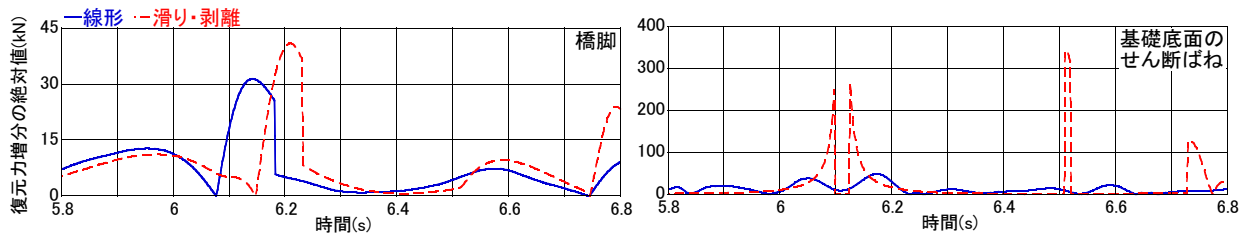


図-9 宮園EWにおける復元力増分の絶対値

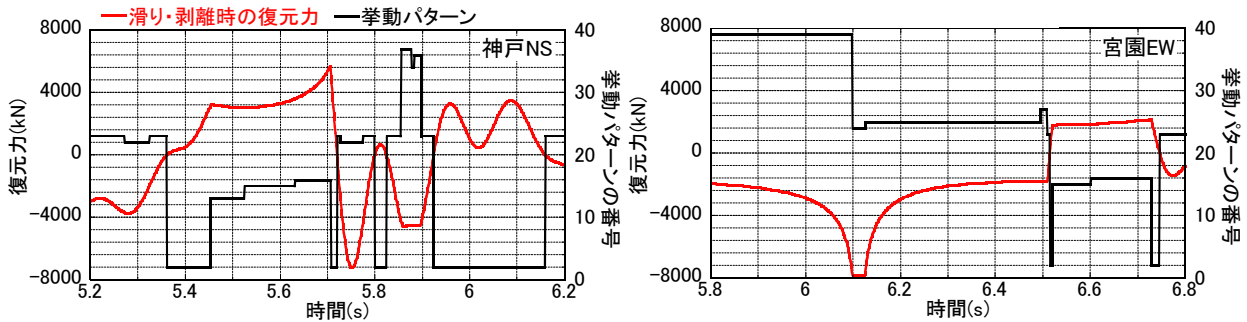


図-10 基礎底面の復元力と挙動パターン

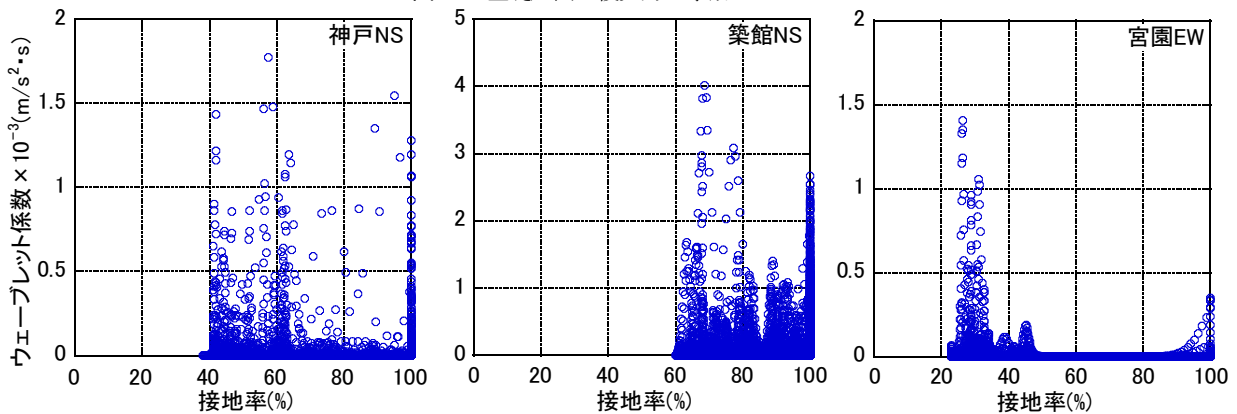


図-11 接地率とウェーブレット係数の関係

宮園EWではその傾向が顕著である。そこで、各地震動で上部質点に生じる振動の違いを分析するために、図-12に、式(7)で算出される⁸⁾上部質点の変位 x_u に対して、橋脚の相対変位 $H\theta_s$ 、基礎の相対変位 x_{fh} 、基礎の回転によって生じる上部質点の水平変位 $H\theta_f$ を示す。

$$x_u = H\theta_s + x_{fh} + H\theta_f \quad (7)$$

図-12より、図-11において、宮園EWのみが明確な傾向を有しているのは、橋脚や基礎の相対変位と比較して、基礎の回転振動が大きく励起されており、上部質点の変位に対して、基礎の回転振動が支配的なためであると考えられる。対照的に、神戸NSや築館NSでは、基礎の振動以外に橋脚の応答が上部質点に大きな影響を及している事が確認でき、さらに、築館NSに関しては、70秒付近で基礎の回転によって生じる水平変位よりも橋脚の相対変位が大きく上回る瞬間も存在している。

5. まとめ

基礎底面のせん断ばねに滑り・剥離現象を考慮したSRモデルを用いて非線形地震応答解析を実施した。そ

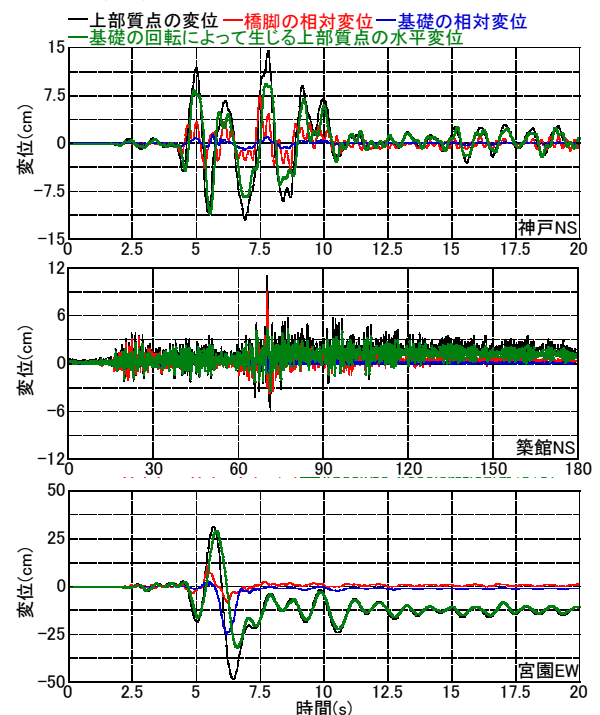


図-12 上部質点に生じる各変位

の際、基礎の挙動を分析するために、基礎底面の復元力-変位関係に現れる挙動パターンを整理した上で、慣性

力作用位置から得られる絶対応答加速度波形にウェーブレット解析を行い、接地率とウェーブレット係数の関係について考察した。得られた結論を以下にまとめる。

- 1) 接地率が変化し、基礎底面のせん断ばねが影響を受ける場合、橋脚にもその影響が現れ、ウェーブレット係数に大きな振幅が生じる事が示唆される。
- 2) 基礎底面のせん断ばねの変化を挙動パターンごとに分類する事で、滑り・剥離現象の影響により基礎底面に復元力は複雑に変化し、その影響が構造物全体に現れている事を確認した。
- 3) 接地率が低い帯域で、ウェーブレット係数が大きく現れる傾向が現れ、それが地震動の周波数特性によって変化する結果が得られた。しかし、橋脚の非線形性の影響も存在しているため、地震動に関係無く、接地率が大きい場合にもウェーブレット係数に有意な値が発生している。

謝辞：本研究の入力地震動データは気象庁、国立研究開発法人防災科学技術研究所及び熊本県の観測波形を使用致しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 井上貴文，三神厚：非線形動的相互作用による橋脚の断面力低減効果のエネルギー収支に基づく検討，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol.70，No.4，pp.I_1132-I_1143，2014。
- 2) 田村修次，林和宏，時松孝次：極大地震動における直接基礎建物の応答と極限支持力，日本地震工学論文集，Vol.16，No.8(特集号)，pp.82-87，2016。
- 3) 麻里哲広，氏家大介，緑川光正，岡崎太一郎：上部構造の鉛直剛性を考慮した構造物の基礎浮き上がり地震応答，日本建築学会構造系論文集，Vol.79，No.705，pp.1569-1578，2014。
- 4) 山下典彦，高田光，甲田啓太，宮脇幸治郎，大西祐哉：ウェーブレット変換による直接基礎を有するRC橋脚の滑り・剥離現象の特異抽出，Kansai Geo-Symposium 2017 論文集，pp.120-125，2017。
- 5) 宮脇幸治郎，土岐憲三：ウェーブレット解析による地震波特性に関する一考察，土木学会論文集，No.525/I-33，pp.261-274，1995。
- 6) Mallat,S.G.：A Theory for Multiresolution Signal Decomposition:The Wavelet Representation，IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence，Vol.11，No.7，pp.674-693，1989。
- 7) 原田隆典，広瀬利光，山田清朗：基礎の動的非線形復元力評価におけるウィンクラーモデルの適用，宮崎大学工学部研究報告，Vol.34，pp.17-25，1988。
- 8) 川島一彦，細入圭介：直接基礎のロッキング振動が橋脚の非線形地震応答に及ぼす影響，土木学会論文集，No.703/I-59，pp.97-111，2002。

A STUDY ON CONTACT RATIO FOR BOTTOM OF SPREAD FOUNDATION CONSIDERING SLIPPAGE AND SEPARATION PHENOMENON

Norihiko YAMASHITA, Keita KODA and Kojiro MIYAWAKI

Regarding slippage and separation phenomenon for bottom of spread foundation, contact ratio between the foundation bottom and ground as well as the energy balance is studied, besides some incorporate the wavelet transform. However, there are few studies to relationship between contact ratio and wavelet coefficient from the viewpoint of wavelet analysis. If we can analyze the change of contact ratio, there is a possibility that it can contribute to the evaluation of the structural integrity of the structure. In this study, RC bridge pier with spread foundation is expressed as the SR model of three degree of freedom system, besides consider slippage and separation phenomenon in the shear spring on foundation bottom. Then, wavelet analysis is performed on absolute response acceleration waveform of the inertial force action position obtained by nonlinear seismic response analysis, and relationship between contact ratio and the wavelet coefficient is considered.