

滑り・剥離現象を考慮した直接基礎底面の 接地率とウェーブレット係数の関係

山下 典彦¹・甲田 啓太²・宮脇 幸治郎³・大西 祐哉⁴

¹正会員 博(工) 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）

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）

³博(工) 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）

⁴修(工) 前田建設工業株式会社（〒102-8151 東京都千代田区富士見2-10-2）

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、対象とした研究は多い^{例えば 1),2)}。これらの研究では、動的相互作用の観点から検討されており、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、上記の滑り・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、建築構造物を対象に基礎の浮き上がりを考慮した解析モデルを用いて、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、直接基礎で支持される RC 橋脚を対象に実施した非線形地震応答解析より、慣性力作用位置の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箇所では、滑り・剥離現象を検出する事が示唆されたが、接地率については検討していない。

そこで、本研究では、解析モデルを参考文献 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実施し、接地率とウェーブレット係数の関係について検討する。

2. 解析の概要

本章では、数値解析時のモデル及びその諸条件等についてまとめる。また、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。

非線形地震応答解析結果に対するデータ解析は、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ウェーブレット解析を実施する⁴⁾。その際、ウェーブレット関数には Meyer 型の構築法に属する Mallat⁵⁾のものを使用する。

(1) 解析モデル及び入力地震動

解析モデルは参考文献4)と同じ橋脚モデルを使用し、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、3自由度系の SRモデルにおいて、減衰項を省略した振動方程式を式(1)に示す。

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

ここで、 H は基礎重心位置から慣性力作用位置までの高さ、 H_f は基礎の高さ、 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。

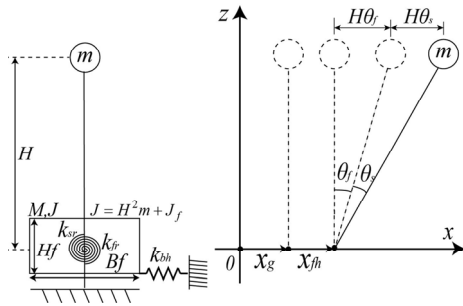


図-1 解析モデル

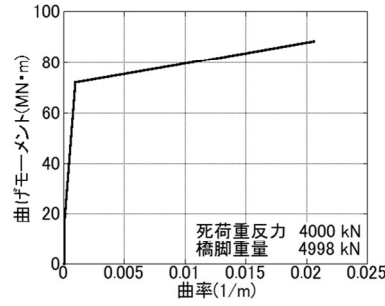


図-2 RC橋脚のM-φ関係

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

また、解析時の減衰マトリクスは、Rayleigh減衰でRC橋脚及び基礎の減衰定数をそれぞれ5%、10%とし、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年熊本地震熊本県益城町宮園EW成分（以下、順に神戸NS、築館NS、宮園EW）を使用した。図-3にそれぞれのフーリエスペクトルと固有値解析の結果を示す。

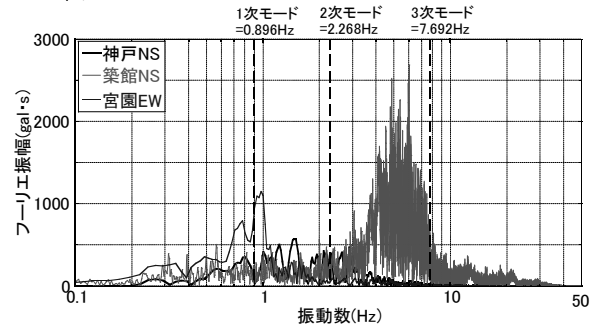


図-3 入力地震動のフーリエスペクトル

(2) 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⁹⁾から導出されるものである。また、本研究における解析モデルでは側面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。

基礎の回転ばねの復元力特性は参考文献6)より、骨格曲線を双曲線型として評価し、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、接地率が減少する。接地率 η は、参考文献6)より剥離が生じた場合に、回転方向に対して接地している距離が変化するため、正方形基礎を想定すると、式(3)で求められる。

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

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

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。

続いて、底面のせん断ばねに関して、そ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始める降伏変位は、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。

式(6)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。

3. ウェーブレット解析による滑り・剥離現象

ここでは、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-4に滑り・剥離現象が絶対応答加速度波形に与える影響を分析するため、線形と滑り・剥離のウェ

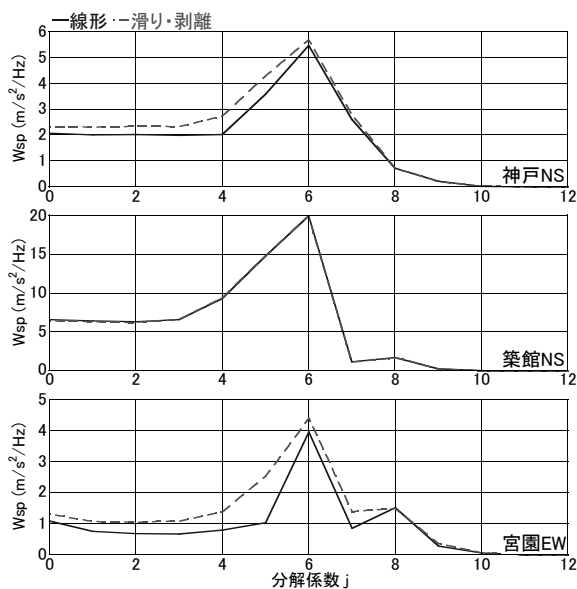


図-4 地震動ごとのウェーブレットスペクトル W_{sp}

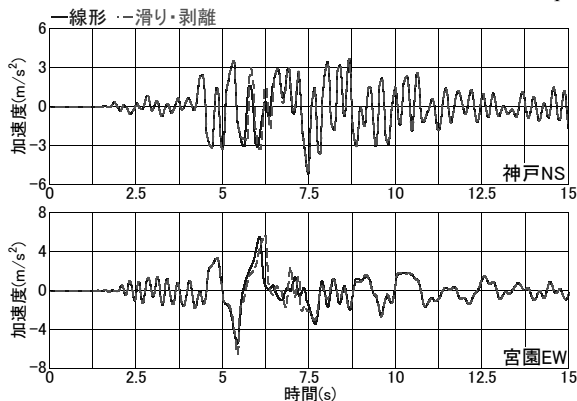


図-5 絶対応答加速度波形

ウェーブレットスペクトル W_{sp} を地震動ごとに示す。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存在している。また、神戸NS及び宮園EWでは滑り・剥離現象の影響を受け、線形のウェーブレットスペクトルとの変化が確認出来る。

続いて、図-4で線形と滑り・剥離に変化が確認出来る神戸NS及び宮園EWを例として、図-5に地震動ごと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、両地震動とも5秒以降に滑り・剥離現象による変化が確認出来る。したがって、ウェーブレット解析で分析する時刻は、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して検討する。

図-6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、対象区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

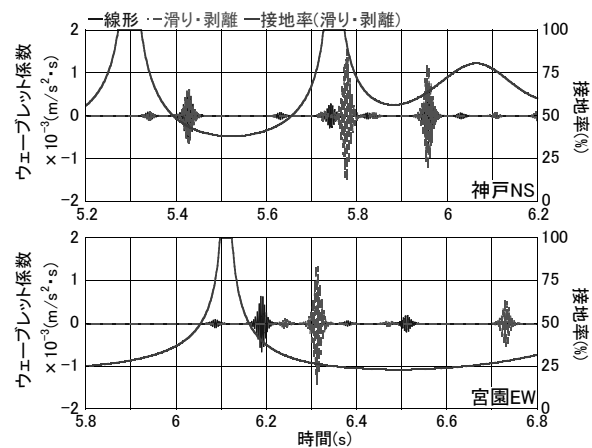


図-6 接地率とウェーブレット係数($j=0$)

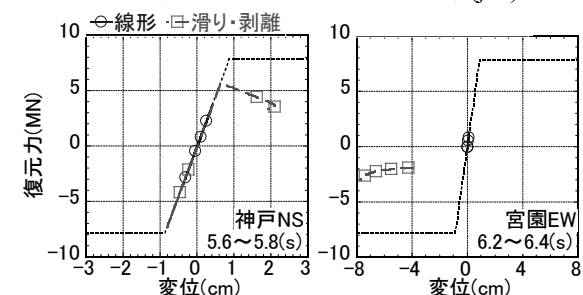


図-7 基礎底面のせん断力に関する復元力-変位関係

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。

上記のウェーブレット係数が大きく現れた時刻に対する基礎底面のせん断ばねの復元力特性は図-7となる。ここで、図-7には式(5)で算出する剥離前の降伏変位を用いた骨格曲線を点線で示している。図-6及び図-7より、滑り・剥離に着目すると、神戸NS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の急変を検出していると示唆される。しかし、宮園EWは塑性化した応答のみであり、神戸NSのような復元力が急変する箇所を含んでいない。

そこで、宮園EWにおいて復元力の変化を分析するため、図-8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-6の宮園EWのウェーブレット係数が大きく増大する時刻に近い事が分かる。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。しかし、6.2秒過ぎは接地率の低下が大きく、図-8の橋脚に関する復元力増分が線形と比較して滑り・剥離で大きい事を踏まえると、ウェーブレット係数が大きく増大したのは、麻里らの研究³⁾と同様に、接地率の低下から、橋脚と基礎が逆位相で振動する2次モードの応答が卓越した事も影響を与えていると考えられる。

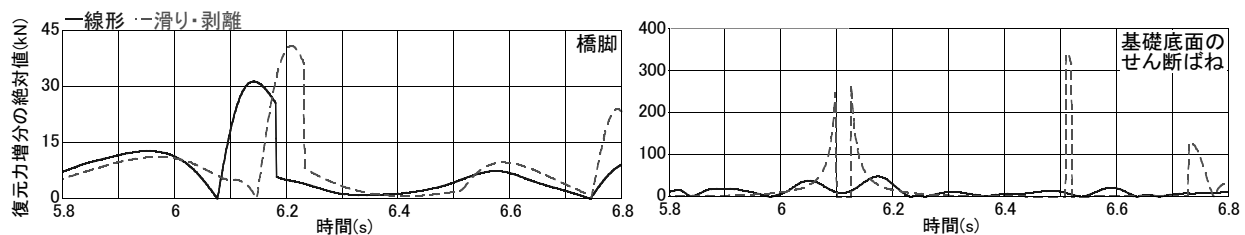


図-8 宮園 EW における復元力増分の絶対値

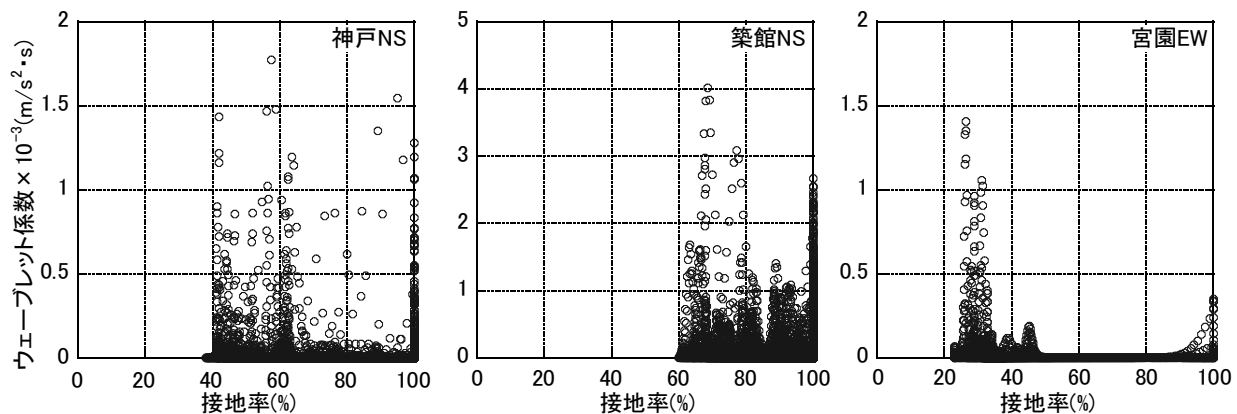


図-9 接地率とウェーブレット係数の関係

ここで、図-8の基礎底面のせん断ばねに着目すると、6.1秒付近で復元力増分が急激に0に減少している。このような変化が現れたのは、基礎底面のせん断ばねの骨格曲線が完全弾塑性型であり、さらに、同じ時刻で図-6の接地率が100%となっているため、塑性域の復元力が一定値となる事が理由である。

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-9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る。特に、宮園EWではその傾向が顕著である。しかし、接地率100%の場合にも比較的大きなウェーブレット係数が現れている事も確認でき、橋脚の応答による影響が示唆される。

4. 結論

基礎底面のせん断ばねに滑り・剥離現象を考慮した非線形地震応答解析を行い、慣性力作用位置の絶対応答加速度波形にウェーブレット解析を実施する事で、接地率とウェーブレット係数の関係について検討した。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を生じさせる事が示唆される。
- 2) 接地率が低い帯域で、比較的大きなウェーブレット係数が現れる結果が得られた。しかし、橋

脚の応答も含むため、接地率100%の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) 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。
- 6) 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。