

車輪／レール間の接触面圧低下を図った ゲージコーナキ裂対策

1. はじめに

在来線の半径 600～800m を中心とする曲線外軌に敷設した熱処理レールにおいて、ゲージコーナキ裂の発生が確認されています。先行研究¹⁾より、車輪／レール間の接触面圧を低下することで、き裂の発生を抑制することが期待できます。本研究では、摩耗進展によって車輪／レール形状がなじむ点に着目し、曲線外軌にレール摩耗形状を適用することで、ゲージコーナキ裂の起点となる微小き裂の発生を抑制する手法について検討しました。

2. き裂発生評価

車輪／レール接触状態から、き裂の発生を評価することは非常に重要です。先行研究¹⁾において、レール頭頂面に発生するシェリングやきしみ割れの発生を評価する指標として、以下の式で与えられる疲労指数 (FI : Fatigue Index) による指標が提案されています (以下、「FI モデル」とします)。

$$FI = \frac{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}}{F_z} \cdot \frac{k_s}{p_0} \tag{1}$$

ここで FI は疲労指数、 F_x ならびに F_y はそれぞれ車輪／レール間の縦クリープ力ならびに横クリープ力、 F_z は車輪／レール間の接触力です。また、 k_s はレール鋼のせん断強度、 p_0 は最大接触面圧です。FI モデルでは、式(1)で与えられる疲労指数の値が高いほど、き裂発生リスクが高いと判定します。本研究では、この FI モデルに基づき、レール表面におけるき裂発生を評価しました。

3. レール摩耗形状予測

ゲージコーナキ裂発生を抑制を図るレール摩耗形状について検討するため、営業線においてゲージコーナキ裂の発生が確認された曲線区間を対象として摩耗進展解析を実施し、レール摩耗形状を予測しました。摩耗進展解析は、マルチボディダイナミクス解析ツールである Simpack と連成したレール摩耗形状予測モデルを活用して実施しました (図 1)。

図 1 に示すように、本モデルでは車両運動解析と連成していることから、さまざまな軌道条件や走行条件におけるレールの摩耗形状を予測することができます。本研究における軌道モデルについては、実際にゲージコーナキ裂の発生が確認された半径 800m の曲線区間に敷設した JIS60kg レールを対象としました。なお、一車両の通過によって算出される摩耗量はごくわずかであるため、図 1 の摩耗計算において算出される摩耗量を 10000 倍²⁾して摩耗形状を生成しました。また、断面形状の更新は 15 回実施しました。

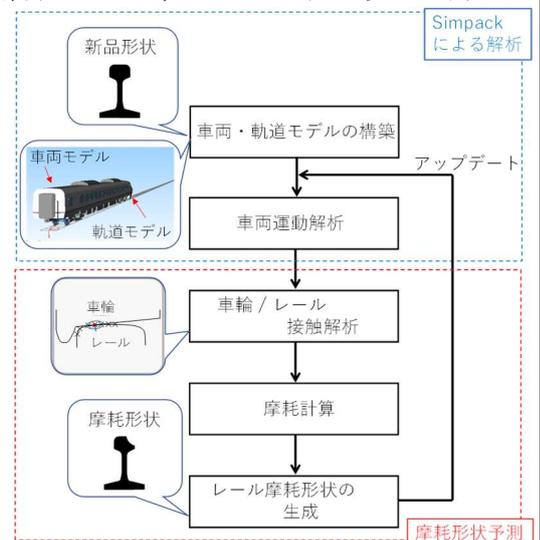


図 1 摩耗進展解析のフロー

摩耗進展解析により算出した、曲線外軌の断面形状変化を **図 2** に示します。ただし、横軸はレール頭頂面中心からゲージコーナ側への距離を示し、また縦軸は拡大して示します。**図 2** に示すように、レール断面形状を更新するにつれて、ゲージコーナ部の形状が変化し、その曲率は減少する傾向が確認できます。

4. 車輪／レール接触解析

前章で実施した摩耗進展解析により予測したレール摩耗形状について、Simpack による車輪／レール接触解析を実施し、き裂発生への影響を評価しました。

車輪／レール接触解析は前章と同様、営業線においてゲージコーナき裂の発生が確認された半径 800m の曲線区間を対象に実施しました。ただし、円曲線区間の外軌については、JIS60kg 設計形状（摩耗進展解析の更新回数：0）ならびに前章での摩耗進展解析より得られた 15 ケース（更新回数：1～15）のレール摩耗形状を適用した、合計 16 モデルを構築して実施しました。

はじめに、円曲線外軌に適用したレール断面形状における車輪／レール間の接触面圧について、解析結果を **図 3** に示します。レールの摩耗が進展するにつれて、車輪／レール間の接触面圧は減少する傾向が確認できます。

次に、2 章に記述した FI モデルを適用し、レール摩耗形状がき裂発生に及ぼす影響について評価しました。適用したレール断面形状別に、算出した疲労指数の結果を **図 4** に示します。摩耗進展によりレール断面形状が変化するにつれて、疲労指数の値は減少していることが確認できます。これは、摩耗進展により車輪／レール形状がなじみ、車輪／レール間の接触面圧が低下したことが主な要因です。

これらの結果より、ゲージコーナき裂の発生が確認される曲線外軌において、敷設直後のレールを初期削正し、レール断面形状を人工的に摩耗形状とすることで、車輪／レール間の接触面圧低下が図られます。そしてレール敷設直後における、車輪とのシビアな接触状態を回避することができます。その結果、ゲージコーナ部におけるき裂発生を軽減できることから、ゲージコーナき裂の発生を低減する効果が期待できます。

5. まとめ

本研究では、摩耗進展による車輪／レール接触のなじみに着目し、曲線外軌にレール摩耗形状を適用することで、ゲージコーナき裂の発生を抑制する手法について検討しました。その結果、車輪／レール間の接触状態が緩和し、き裂発生を軽減できる効果を確認しました。

参考文献

- 1) A. Ekberg and E. Kabo : Fatigue of railway wheels and rails under rolling contact and thermal loading -an overview, *Wear*, 258, pp.1288-1300, 2005
- 2) 辻江正裕, 吉岡亜陸, 水谷祐貴, 曄道佳明: マルチボディダイナミクスによるレール摩耗形状予測モデルの構築と妥当性の検証, *日本機械学会論文集*, Vol.83, No.854, 2020

執筆者, 担当者: 鉄道力学研究部 軌道力学研究室 辻江正裕

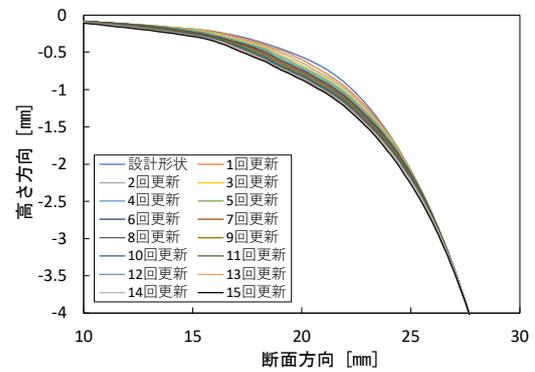


図 2 摩耗進展解析結果

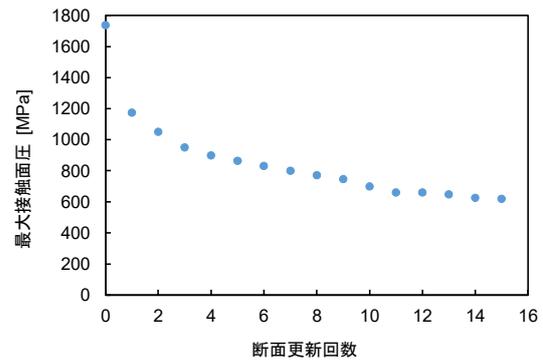


図 3 接触解析結果（接触面圧）

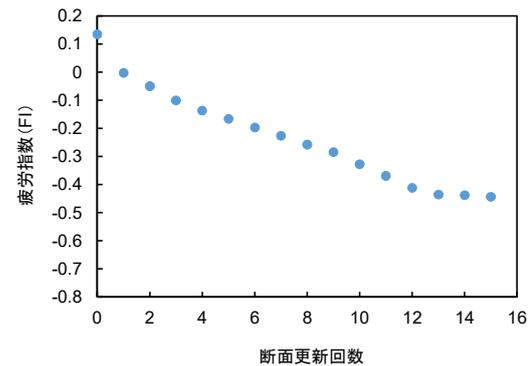


図 4 接触解析結果（疲労指数）

等価せん断スパン法による RC 杭頭部のせん断耐力評価

1. はじめに

鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）の棒部材の設計せん断耐力 V_{yd} は、集中荷重を受ける単純支持下の矩形 RC 梁の実験結果に基づいています。令和 5 年版の改訂では、RC 棒部材にせん断補強鉄筋を多量に配置しても、想定したせん断補強効果が得られないため、 V_{yd} の算定において、 $p_w \cdot f_{wyd} / f'_{cd} \leq 0.1$ (p_w : せん断補強鉄筋比, f_{wyd} : せん断補強鉄筋の設計引張降伏強度, f'_{cd} : コンクリートの設計圧縮強度) として、 V_{yd} の値に上限を設けるように見直しています。一方、従前の杭頭部の配筋では $p_w \cdot f_{wyd} / f'_{cd} > 0.1$ となる事例も多くありました。

また、RC 杭は、図 1 に示すように地盤反力（分布荷重）を受け、杭頭部が固定されることから、上述の棒部材の設計せん断耐力 V_{yd} よりも大きいせん断耐力を示す傾向にあります。そこで、杭頭部のせん断耐力を合理的に算定する方法を検討しましたので、その内容について紹介します。

2. RC 杭の事例調査結果

図 2 に、近年設計された、一般的な条件におけるラーメン高架橋および橋脚における杭径 D と $p_w \cdot f_{wyd} / f'_{cd}$ の関係を示します。杭頭部（ここでは、杭頭 $2D$ 区間）において、 $p_w \cdot f_{wyd} / f'_{cd} > 0.1$ となり、地中部においては、 $p_w \cdot f_{wyd} / f'_{cd} < 0.1$ となる傾向がみられます。 V_{yd} を用いた照査による場合、杭頭部では諸元の変更が必要となります。

3. RC 杭頭部のせん断耐力の評価²⁾

図 3 に、三次元非線形有限要素解析の概要を示します。本解析では杭とスタブをソリッド要素、鉄筋を埋込み鉄筋要素でモデル化し、材料非線形性を考慮しました。杭に作用する地盤反力を含めた外力は、強制荷重でモデル化しました。具体的には、事例の慣性力設計における曲げモーメント分布の形状や、せん断スパン（杭頭から曲げモーメント反曲点までの距離） a と杭径 D の比 a/D を再現できるように、荷重の大きさを決定しました。

図 4 に、解析で得られたせん断力の最大値 V_{ana} と V_{yd} の比較の例を示しますが、 V_{yd} は V_{ana} を過小に算定していることがわかります。図 5 に示す最小主応力分布の例では、杭頭から反曲点位置を結ぶように、圧縮ストラットが形成されています。また、杭頭の圧縮縁のコンクリートの圧縮破壊後に水平荷重の増加が鈍化しており、設計せん断圧縮破壊耐力 V_{ad} で想定されるよう

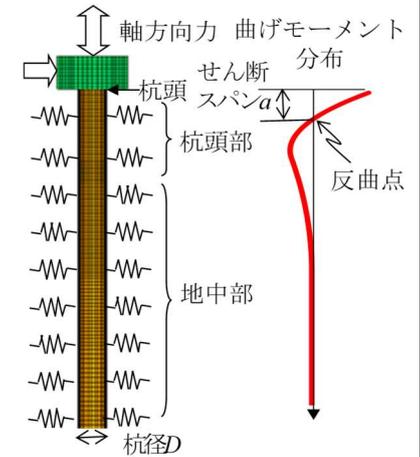


図 1 RC 杭の地盤反力と曲げモーメント分布

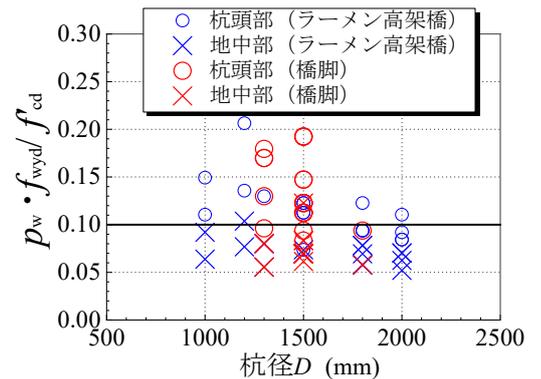


図 2 杭径と $p_w \cdot f_{wyd} / f'_{cd}$ の関係

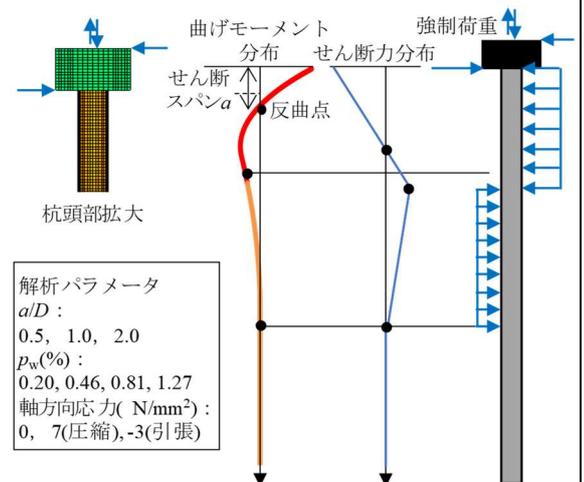


図 3 非線形有限要素解析における杭のモデル化

な破壊形態であると推定されます。

原子力指針³⁾では土圧を受ける床版や側壁に対し、等価せん断スパンを用いた V_{dd} による照査法（等価せん断スパン法）が示されています。以上の解析で得られた耐荷機構や破壊形態から、杭頭部のせん断耐力の評価に、等価せん断スパン法が適用できるとしました。

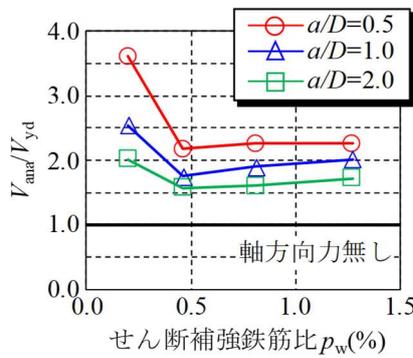


図4 V_{yd} の算定精度

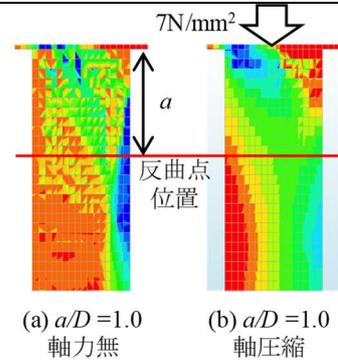


図5 杭頭部の最小主応力分布の例

4. 等価せん断スパン法によるRC杭頭部のせん断耐力

図6に、提案する等価せん断スパン法の概要を示します。杭頭から反曲点までの杭頭部のせん断耐力は、この距離を等価せん断スパン a_1 とし、 a_1 を用いた V_{dd} によって算定します。また、照査に用いるせん断力は、深さ $a_1/2$ の位置での値とします。なお、反曲点以深では V_{yd} を適用します。

図7に、深さ $a_1/2$ の位置での V_{ana} と等価せん断スパン法(V_{dd})との比較の例を示します。図4と比較すると、等価せん断スパン法を適用することで、せん断耐力の算定精度を向上できることがわかります。図8に、せん断力に関する照査の試算例を示します。 $p_w \cdot f_{wyd} / f'_{cd} > 0.1$ となる杭部材を対象としました。 $p_w \cdot f_{wyd} / f'_{cd} = 0.1$ 上限を考慮した V_{yd} を適用した場合、照査値が1.0より大きくなるものがありますが、等価せん断スパン法の適用により、せん断耐力や考慮すべきせん断力を合理的に評価できたことで、1.0より小さくなりました。

5. まとめ

近年設計された、一般的な条件におけるラーメン高架橋および橋脚のRC杭頭部に対し、非線形有限要素解析に基づき、耐荷機構やせん断耐力を明らかにしました。そして、等価せん断スパン法の適用によって、RC杭頭部のせん断耐力の算定精度が向上することを示しました。様々な地盤条件に対し引き続き試算を行い、本手法の適用範囲を検討したいと思います。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所 編：鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物） 第Ⅲ編 コンクリート構造，丸善，2023。
- 2) 北川晴之，中田裕喜，渡辺健，田所敏弥：分布荷重を考慮したRC杭頭部における耐力の解析的評価，コンクリート工学会年次論文集，Vol.43，No.2，pp.409-414，2021。
- 3) 土木学会原子力委員会：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル・照査例（2018年版），原子力土木シリーズ3，2018。

執筆者：鉄道力学研究部 構造力学研究室 北川晴之
 担当者：構造物技術研究部 コンクリート構造研究室 中田裕喜，渡辺健
 基礎・土構造研究室 佐名川太亮

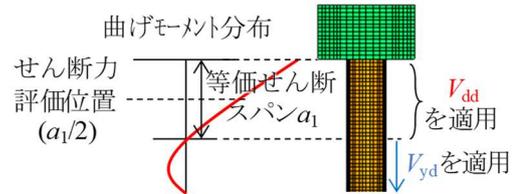


図6 等価せん断スパン法の概要

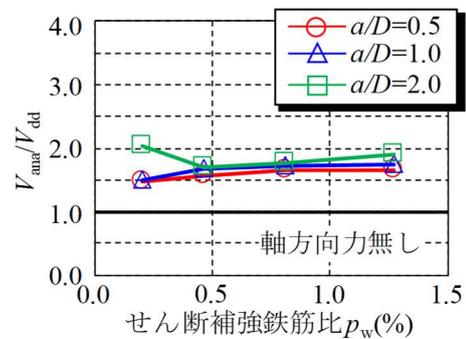


図7 等価せん断スパン法の算定精度

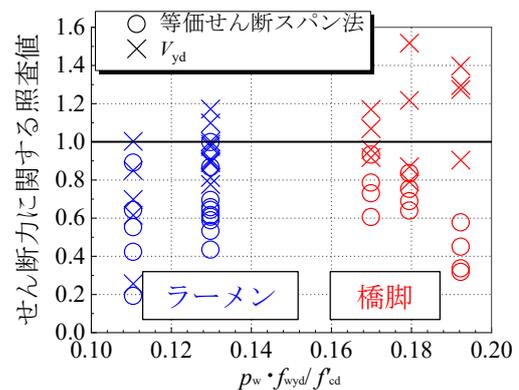


図8 せん断力に関する照査の試算例

常時微動計測を用いた洗掘の進行に伴う

固有振動数の変化の把握

1. はじめに

近年、降雨量の増加や降雨時間の長期化により、鉄道の河川橋梁での洗掘災害が頻発化しています。洗掘が進行すると橋脚基礎が不安定化し、傾斜や沈下、転倒等の被害に至る場合があります。安全輸送に甚大な影響を及ぼします。そこで、実物縮尺 1/3 の橋脚模型を用いて、橋脚基礎の洗掘が進行していく過程を模擬した大型模型試験を実施しました。洗掘状況は、地盤の側面流失を模擬した側面掘削実験～底面にまで侵食が進行した底面掘削実験および増水後の再堆積を模擬した再埋め戻し実験により再現しました。また、橋脚の健全度を評価する指標には鉄道の維持管理で用いられる固有振動数を用いて、固有振動数の変化から洗掘の進行過程と安定性との関係を検討しました。

2. 使用した固有振動数の推定手法

固有振動数の変化を連続的に捉える手法として、常時微動を活用した手法を用います¹⁾。本手法は、橋脚天端両端部の2か所で計測された常時微動から地盤振動を推定し、入力(推定地盤振動)と応答(計測値)のフーリエ振幅比に対して、理論解をフィッティングすることで、固有振動数を推定します(図1)。最も大きなメリットは、推定した地盤振動から得られる伝達関数を共振曲線(理論解)でフィッティングすることで、作業員の経験の有無によることなく自動的かつ連続的に固有振動数を推定できる点にあります。連続計測可能な手法は、増水前後の固有振動数の変化を把握できるため、洗掘進行度合いの推定が期待できます。

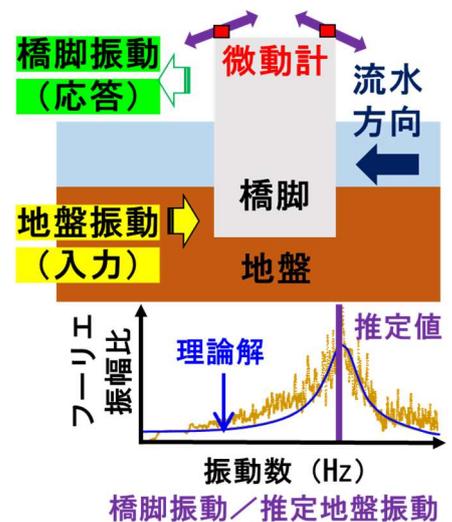


図1 推定イメージ

3. 実験概要

図2に実験模式図を示します。洗掘が懸念されることが多い直接基礎形式を模擬した1/3模型であり、橋脚模型の上部には、上部工の荷重を模擬したプレート(約3100kg)を設置しています。

橋脚基礎の地盤材料は稲城砂(平均粒径 $D_{50}=0.32$, 最大乾燥密度 $\rho_{dmax}=1.764$)を使用します。一層あたり層厚200mm, 締固め度 $D_c=90\%$ で密度管理しました。初期根入れは1000mmとします。また、掘削後の再埋め戻し実験の場合は、掘削した稲城砂を再利用し、締固め度 $D_c=85\%$ としました。

掘削条件は、側面掘削実験では1段階あたり200mm掘削します(図3)。底面掘削実験では根入れ長が0mmの状態から上流側を1段階あたり50mm, 底面掘削率(掘削量/橋脚幅)で約4%, 最大450mm, 底面掘削率で約35%まで掘削します(図4)。再埋め戻し実験では、底面掘削最終時から掘削深700mm, 400mm, 0mmの3段階に埋め戻します。

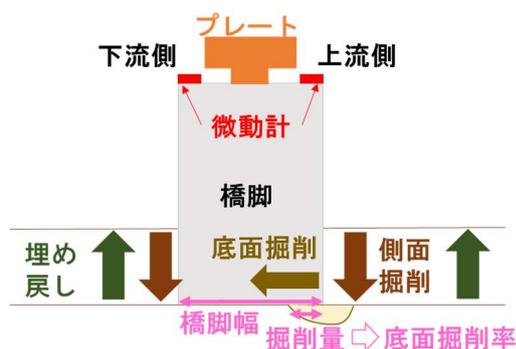


図2 実験模式図



図3 側面掘削状況



図4 底面掘削状況

4. 実験結果

掘削状況ごとの固有振動数の変化と変化率（固有振動数の変化量／根入れの変化量）を図5に示します²⁾。支持力が期待できる側面掘削実験では、根入れが200mm減少するのに伴い、固有振動数は約1Hz低下します。固有振動数の変化率は約0.4～0.5%の範囲で掘削深度によらず概ね線形に近い低下傾向になります。

一方で、底面掘削実験では、底面掘削深が増加すると固有振動数は徐々に低下しますが、側面掘削時のような一定の変化率で低下していく傾向とは異なり、ばらつきのある変化率で起伏が激しい変化を示し、底面掘削率20%以降で連続して固有振動数の変化率が大きくなります。

再埋め戻し実験では、掘削前と比較すると、固有振動数は完全に回復することなく、初期値に対して約70%の値に留まりました。そのため、洗掘により一度橋脚周囲の地盤が流失すると、減水期に上流からの砂の供給により再堆積して根入れが回復し見かけ上は安定した状態だとしても、地盤の剛性は低いままであり橋脚の安定性が大きく低下している可能性があります。

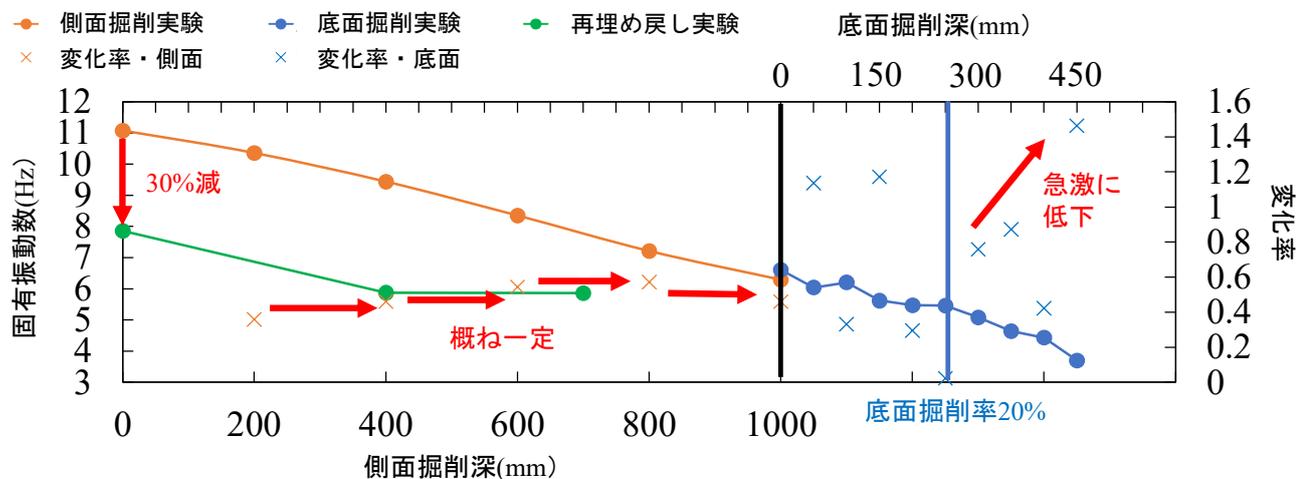


図5 掘削状況ごとの固有振動数の変化

5. おわりに

支持力が期待でき、構造物には変状が生じない側面掘削時にはその掘削高さに応じて不安定性を示す固有振動数が線形的に低下しますが、底面まで掘削が進行した場合、急激に固有振動数が低下、すなわち不安定化が急激に進行する可能性があります。固有振動数の常時モニタリング手法を用いることで、洗掘の進行過程を捉えることが可能となり、適切な列車運行や増水時の現地確認を実施できます。なお、本技術開発は「国土交通省 交通運輸技術開発推進制度 (JPJ002223)」の助成を受け、実施しました。

参考文献

- 1) 樗健典・湯浅友輝・内藤直人・渡邊諭 (2018)：橋脚天端両端部の微動計測による橋脚基礎地盤の洗掘に対する健全度評価手法，地盤工学ジャーナル，Vol.13，No.4，pp.319-327
- 2) 入栄貴，藤原将真，渡邊諭 (2022)：橋脚基礎の洗掘に伴う連続的な固有振動数の変化に関する実験的検討，第63回地盤工学シンポジウム，1-3.1

執筆者：防災技術研究部 地盤防災研究室 入栄貴

担当者：防災技術研究部 地盤防災研究室 渡邊諭

編集委員会からのお知らせ：2014年度より施設研究ニュースのpdfデータを鉄道総研HPに掲載しています。詳しくは、鉄道総研HPのトップページから【研究開発】⇒【研究ニュース】⇒【施設研究ニュース】(http://www.rtri.or.jp/rd/rd_news.html)にアクセスしてください。

発行者：中村 貴久 【(公財) 鉄道総合技術研究所 施設研究ニュース編集委員会 委員長】

編集者：小西 亮太 【(公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造】