光ファイバセンサによるリバース杭掘削時の周辺地盤影響評価

鹿島建設(株)　正会員　○中島　悠介
鹿島建設(株)　正会員　永谷　英基　辻　良祐
東日本旅客鉄道(株)　正会員　和田　旭弘　鈴木　悠太

1．はじめに

都市部の駅改良工事では，営業線に隣接した極めて狭隘な用地・低空頭箇所で，直径 2.0m を超える杭施工を行う場合に，リバースサーキュレーションドリル（以下，リバース）工法による場所打ち杭が採用される例が多い．その際，掘削による地盤の緩みや孔壁崩壊による列車運行への影響を抑えるため，**図-1** に示すように，地盤条件に応じて最大 GL-10m の範囲に薬液注入などの対策工を実施している[1,2]．しかし，対策工である薬液注入に伴う地盤変位による列車影響も懸念されるとともに，多大な工期・コストを要することから，対策範囲の合理化が課題となっている．

そこで，リバース杭掘削および孔壁崩壊による周辺地盤への影響範囲や，崩壊時の地盤挙動を把握することを目的として，実規模試験を実施した．本論文では，杭孔の 3D 計測により孔壁崩壊形状を把握するとともに，周辺地盤に設置した光ファイバセンサ（以下，光ファイバ）により地中の水平変位計測を試みた結果を報告する．

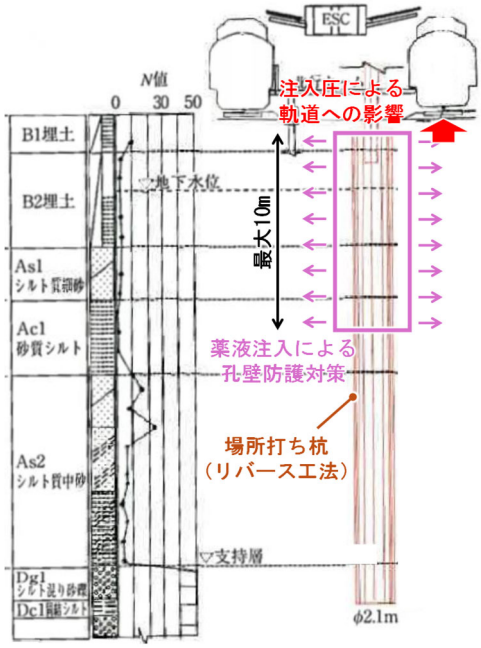


図-1　場所打ち杭施工時の対策工法例

2．実規模実験概要

(1) 地盤条件・土質特性

試験箇所の地盤条件と採取した試料の土質試験結果を**図-2** に示す．同図には，今回実施したボーリング調査で確認した土質分類，CPT 試験結果から換算した N 値および土質分類指数 Ic より推定した土質区分，過去に試験地点近傍で実施した標準貫入試験結果を示す．GL-0.5～-4.5m 付近は N 値 2～3 のローム・粘土層，GL-4.5m～-12m 付近は粘土質細砂で GL-10m 付近以浅が N 値 3～10，同以深が N 値 10 以上となっており，地下水位（ボーリング翌日の孔内水位）は GL-5.8m 付近であった．本実験で孔壁崩壊対象となる粘土質細砂層は平均 N 値が 8，湿潤密度 1.7～1.9g/cm^3 程度で緩く堆積しており，透水係数は 1.0×10^{-9}～10^{-7}m/s 程度である．

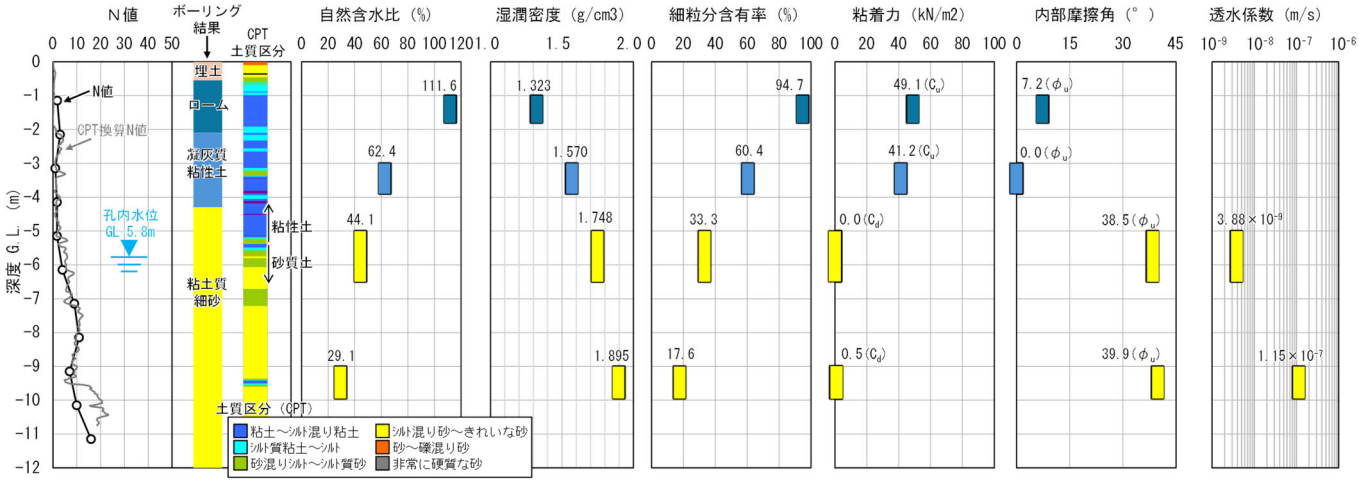


図-2　地盤条件と土質試験結果

キーワード　場所打ち杭，リバース工法，孔壁崩壊，周辺影響，地中変位，光ファイバ
連絡先　〒182-0036　東京都調布市飛田給 2-19-1　鹿島建設（株）技術研究所　ＴＥＬ042-485-1111

透水係数が小さくなっているのは，粘性土と互層状態になっており，コア試料を使用した透水試験における鉛直方向への通水が介在する粘性土により阻害されたためだと考えられる．杭の削孔時には，孔内水位が低下しやすい傾向であったため，水平方向への透水性は比較的大きい地盤条件であった．

(2) 孔壁崩壊実験の概要

リバース工法での掘削状況を**写真-1** に示す．掘削には TBH-8 型機を用い，φ1,200mm×長さ 10m とφ2,000mm×長さ 12m の杭を掘削した．当初は，双方とも長さ 10m とする計画であったが，先行して掘削したφ1,200mm の杭において，孔壁崩壊時に孔底付近に堆積した土砂により孔壁計測が不可能となったことから，後行のφ2,000mm では，掘削深度を大きくした．杭同士の離隔は孔壁の間隔で 5.0m とし，各々の掘削による実験結果への影響を防止した．孔内水位は，地下水位より約 4.3m 高い GL-1.5m 程度に保持して掘削を行った．掘削完了後，孔内水位を 0.5～1.0m 毎に段階的に低下させることで，孔壁崩壊を発生させた．



写真-1　リバース工法による杭掘削状況



写真-2　孔壁 3D 計測

(3) 計測方法

a) 3D 孔壁計測

杭孔内の掘削・崩壊形状は，3 次元的に精緻な計測が可能な T-Pile 3D Monitor[3]で計測した．計測状況を**写真-2** に示す．従来の超音波探査では直交する 2 次元断面のみの表示であったが，本技術は 15 度ずつ回転しながら超音波計測を行うことで，杭全周にわたる掘削・崩壊形状を把握することが可能である．これにより，孔壁崩壊の深度，方向および拡径の偏りを 3 次元的に確認した．

一方で，計測時には孔内を泥水で満たす必要があることから，孔内水位以浅では 360 度カメラによる孔壁の動画撮影も実施し，フォトグラメトリを作成して，孔壁の状態を映像で把握した．これらの実施手順は，①所定深度まで水位低下，②360 度カメラによる撮影，③GL-2.0m 付近まで水を注入，④T-Pile 3D Monitor による測定，とした．

b) 光ファイバ式変位計

杭周囲地盤の水平変位計測には，光ファイバを用いた．**図-3** に計測概略図を示す．本計測では，光ファイバを貼付した内径 40mm の塩化ビニル管（以下，塩ビ管）を使用した．杭周辺地盤に設けたボーリング孔内に塩ビ管を建込み，地盤変位に追従することで生じる塩ビ管表面のひずみを計測した．杭側と背面側の曲げひずみの差から曲率を算出し，曲率を鉛直方向に 2 回積分することで水平変位を算出した．

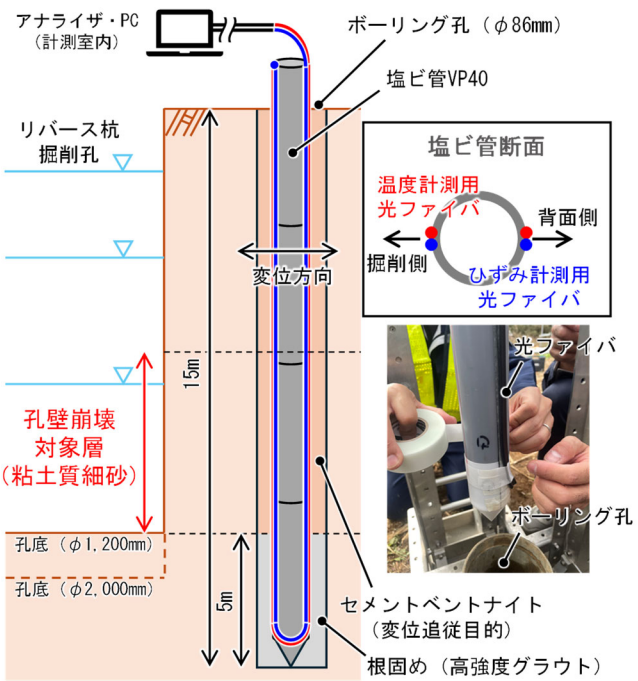


図-3　光ファイバによる地盤変位計測概要

ボーリング孔は孔径 86mm，長さ 15m として下端まで塩ビ管を建て込んだ．下端から 5m までは塩ビ管と孔壁の間に高強度グラウトを充填して根固めを行い，孔壁崩壊対象層以深の変位や傾斜が小さくなるようにした．これより浅い範囲は，地盤変位に追従できるよう，塩ビ管と孔壁の間をセメントベントナイトで充填した．塩ビ管はねじ式継ぎ手とすることで光ファイバの貼付面を平滑にした．光ファイバは両面テープで貼付し，アル

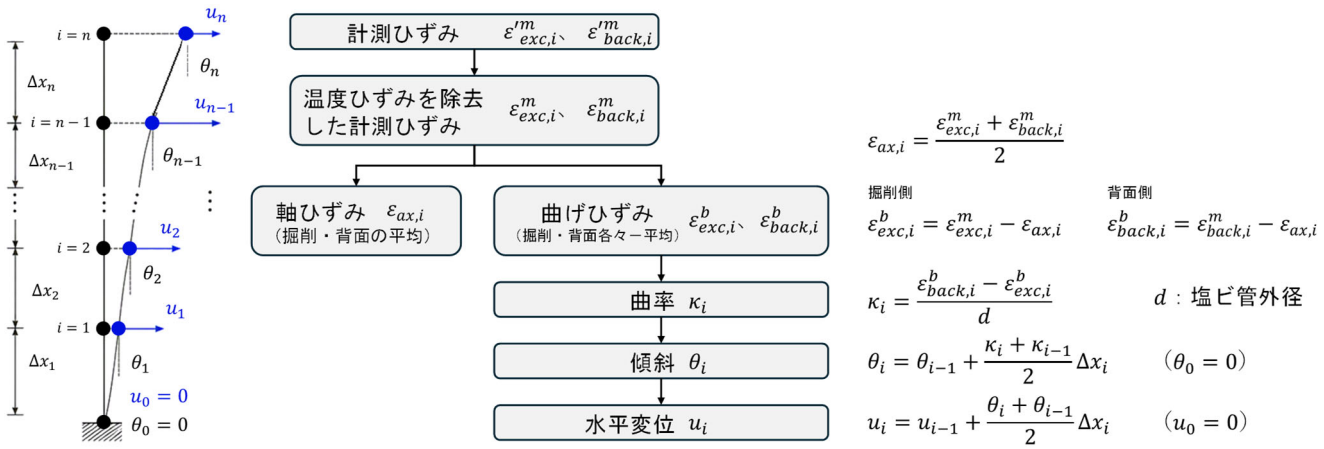


図-4　光ファイバで取得したひずみデータの整理方法

ミテープで養生して切断を防止した．

ひずみの計測にはレイリー散乱光方式[4)]を採用し，計測室内に設置したアナライザにより散乱光を解析してひずみに変換した．深度方向の空間分解能は 50mm，計測精度は 1με である．また，塩ビ管表面の温度変化により生じるひずみの影響を排除するため，ひずみ計測用の光ファイバと平行に温度計測用の光ファイバを貼付した．光ファイバで取得したデータは，**図-4** に示すように，温度補正後のひずみから，掘削側・背面側の平均値を軸ひずみ成分，掘削側・背面側各々のひずみから軸ひずみ成分を差引いた値を曲げひずみ成分，曲げひずみ成分から算出した曲率の 2 回積分を水平変位として整理した．2 回積分では，塩ビ管下端の変位および傾斜角を 0 と仮定した．なお，光ファイバ計測データから算出した水平変位の妥当性を確認するため，塩ビ管上端部をトータルステーションで測量した．



写真-3　CPT 実施状況

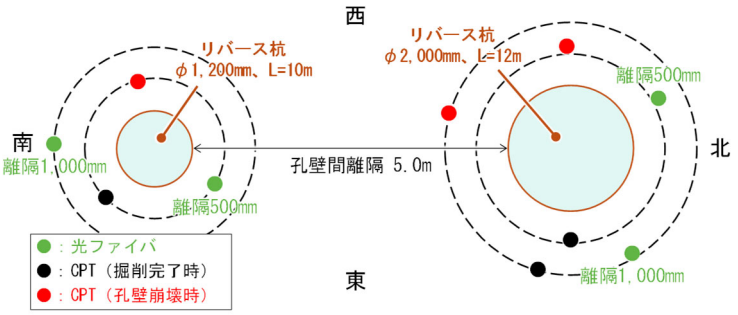


図-5　計測器・試験の配置平面図

c) 電気式コーン貫入試験

杭の掘削後および，水位低下による孔壁崩壊後の周辺地盤の緩み状態の把握のため電気式コーン貫入試験（以下，CPT）を実施した．**写真-3** に実施状況を示す．CPT では，先端抵抗 qt，周面摩擦 fs，間隙水圧 u を深度約 0.2m 毎に計測し，孔壁崩壊前後の計測値の変化から，緩み状態の把握を試みた．

表-1　施工ステップと計測項目

施工ステップ	孔壁状況	周辺地盤	
	3D計測	光ファイバ	CPT
掘削前	-	○	○
掘削中	-	○	-
掘削完了	○	○	○
水位低下	○	○	-
孔壁崩壊	○	○	○

d) 計測器の配置

図-5 に計測器の配置平面を示す．光ファイバによる変位計測は，各杭の孔壁から約 500mm，1,000mm 離れた位置とした．この際，塩ビ管が背面地盤の変位を抑制する可能性があることから，孔壁崩壊が同心円状に発生すると仮定し，杭芯を中心とする同心円上の異なる方位に配置した．

e) 計測ステップ

杭の施工ステップ毎の計測項目を**表-1** に示す．3D 計測は掘削完了後，および水位低下の各段階で実施した．光ファイバは，連続計測を行い，掘削開始前を初期状態として，掘削中，掘削完了時，孔内水位低下の各段階の軸ひずみや水平変位分布を算出した．

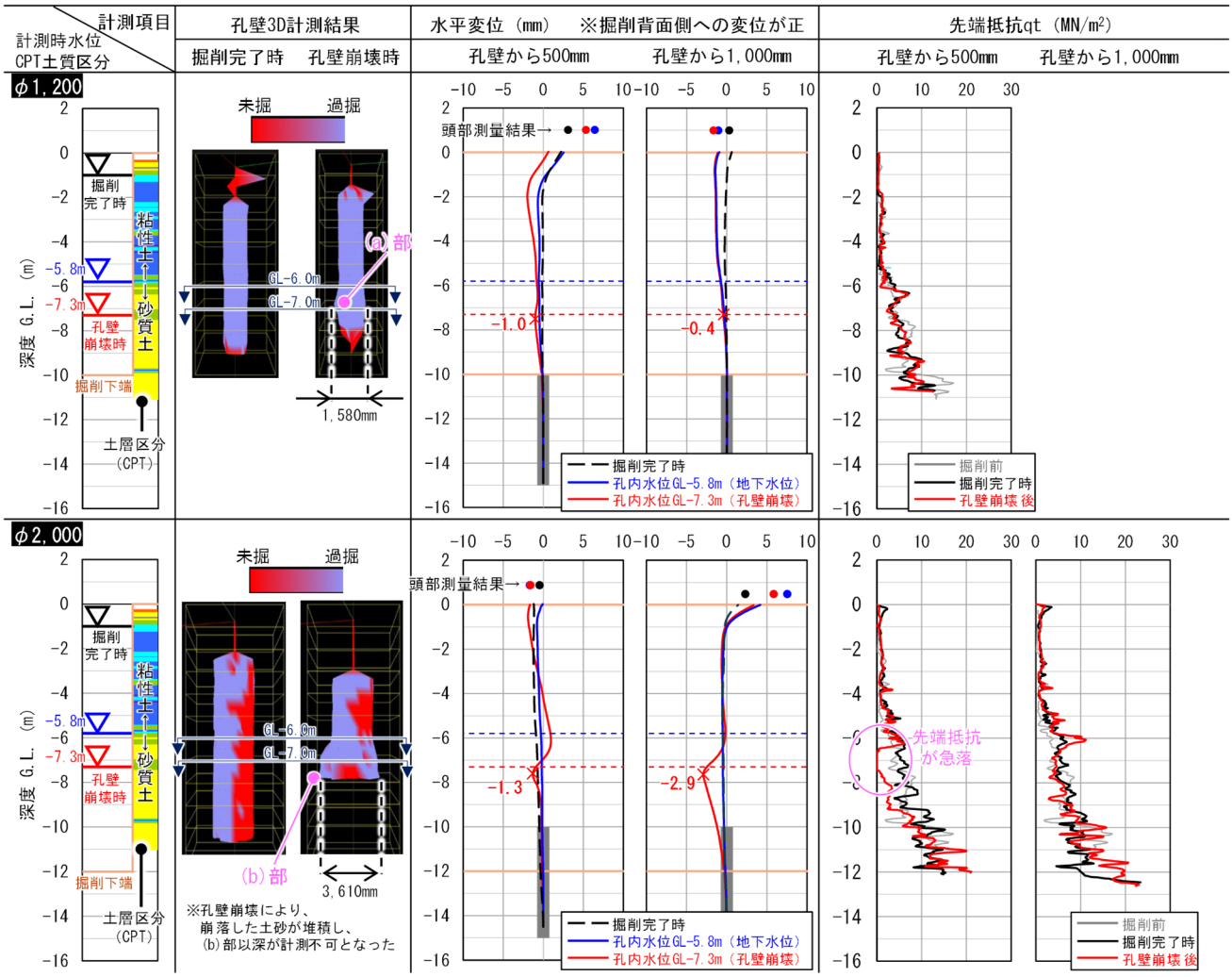


図-6　孔壁崩壊形状，水平変位深度分布，CPT 結果（上段：杭径φ1,200mm，下段：杭径φ2,000mm）

３．実験結果

(1) 孔壁崩壊と周辺地盤への影響

図-6 に T-Pile 3D Monitor による孔壁崩壊形状，光ファイバによる水平変位分布，塩ビ管の頭部測量結果および，CPT 結果を示す．両杭ともに，孔内水位を GL-7.3m（地下水位-1.5m）付近まで低下させた際に GL-7.0m 付近で大きな孔壁崩壊が発生した．孔径はφ1,200mm の杭で最大 1,580mm，φ2,000mm の杭で最大 3,610mm まで拡大し，初期杭径に対し，それぞれ約 1.32 倍，約 1.81 倍となった．**図-7** に 360 度カメラの映像から作成したフォトグラメトリを示す．孔壁崩壊による肌落ちや拡径の状況が捉えられており，T-Pile 3D Monitor による孔壁崩壊形状とも整合が取れた結果となった．

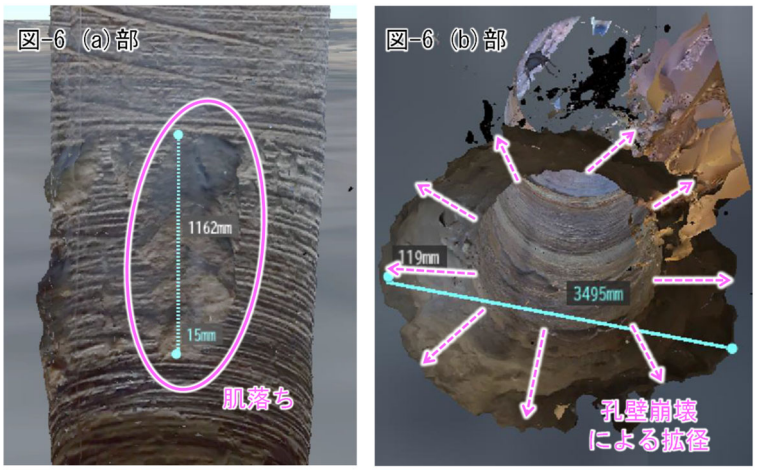


図-7　フォトグラメトリによる孔壁崩壊状況
（上段：杭径φ1,200mm，下段：杭径φ2,000mm）

光ファイバによる水平変位計測結果と塩ビ管頭部の測量結果は概ね整合した結果を示し，光ファイバによる計測手法が妥当であることを確認した．水平変位の深度分布を見ると，掘削完了時および孔内水位を GL-5.8m（地下水位付近）まで低下させた段階では，両杭ともに顕著な水平変位は確認されなかった．一方，孔壁崩壊発生時（孔内水位 GL-7.3m）には，GL-7m～-8m 付近を中心として水平変位が発生した．変位量は，より深い掘削を行ったφ2,000mm の杭で大きくなっており，離隔 500mm で最大 1.3mm，離隔 1,000mm で最大 2.9mm

の変位が確認された．**図-8** に示す，孔壁 3D 計測結果から作成した深度別の孔壁断面と光ファイバ計測点と孔壁位置の関係を見ると，φ2,000mm の杭では，離隔 500mm，1,000mm の計測点とも崩壊領域の境界付近に位置している．そのため，上述した双方の変位量の大小関係は有意なものではなく，同程度の変位が発生したものと評価している．

さらに，CPT 結果では，φ2,000mm 杭の離隔 500mm 地点において孔壁崩壊後に先端抵抗の低下が確認された．これは光ファイバにより検出された変位発生深度と概ね対応している．このことは，孔壁崩壊による土砂移動が周辺地盤の変位も誘発するとともに強度を低下させたためだと考えられる．

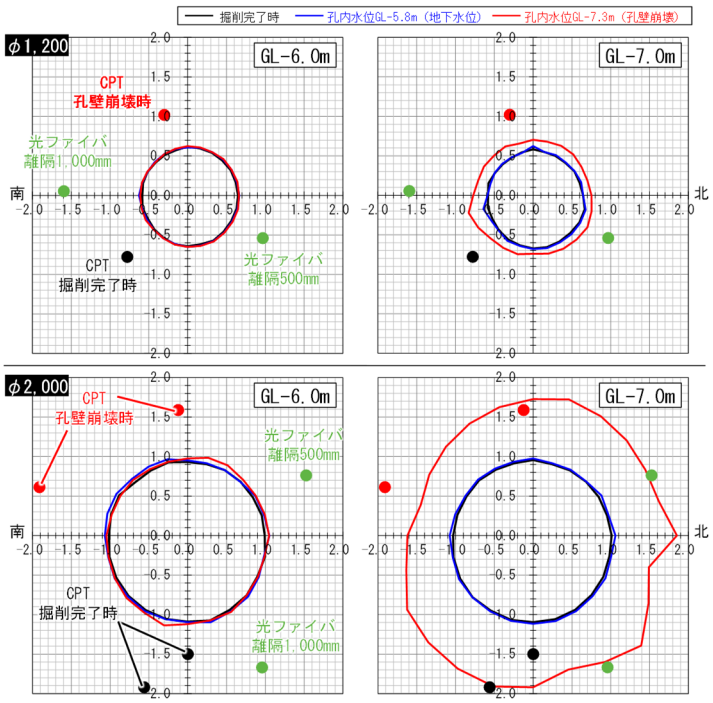


図-8　孔壁崩壊進展状況断面図
（上段：杭径φ1,200mm，下段：杭径φ2,000mm）

(2) 光ファイバ計測から推定される地盤挙動

図-9 に，光ファイバから得られた軸ひずみおよび曲げひずみの深度分布を示す．掘削完了時点には，φ1,200mm の杭で GL-4m～-6m 付近に軸引張ひずみ，φ2,000mm の杭で GL-6m～-8m 付近に軸圧縮ひずみが確認された．一方で，曲げひずみはほとんど発生していない．このことから，杭の掘削に伴う周辺地盤の

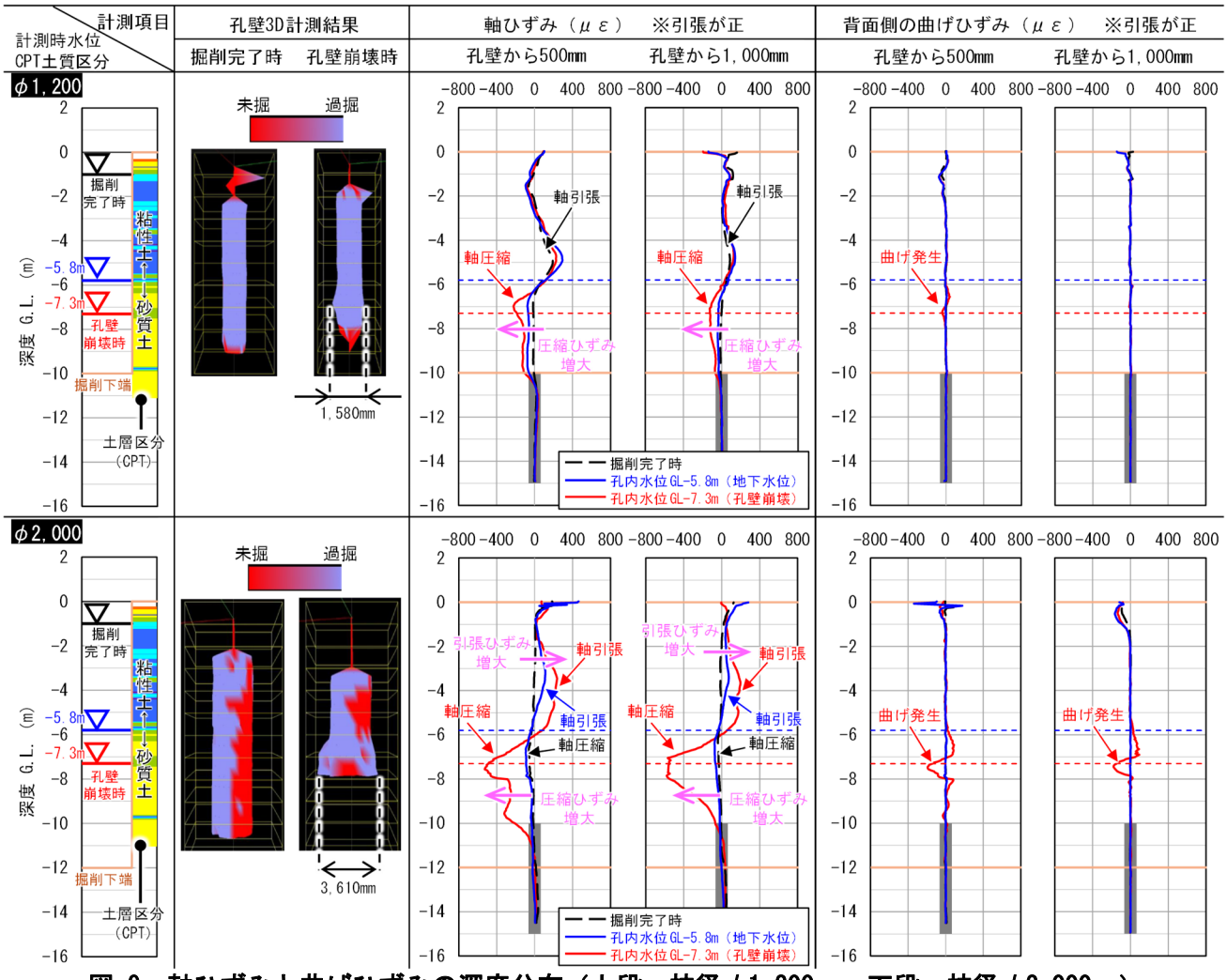


図-9　軸ひずみと曲げひずみの深度分布（上段：杭径φ1,200mm，下段：杭径φ2,000mm）

緩みによって，地盤はわずかに沈下したが，水平方向の土砂移動はほとんど生じていなかったと考えられる．その後，孔内水位を-5.8m まで低下させた際には，軸ひずみの発生範囲が深度方向に拡大するとともに最大値も増加したが，曲げひずみの増加は確認されておらず，孔壁近傍の緩み領域が徐々に拡大していることが示唆される．

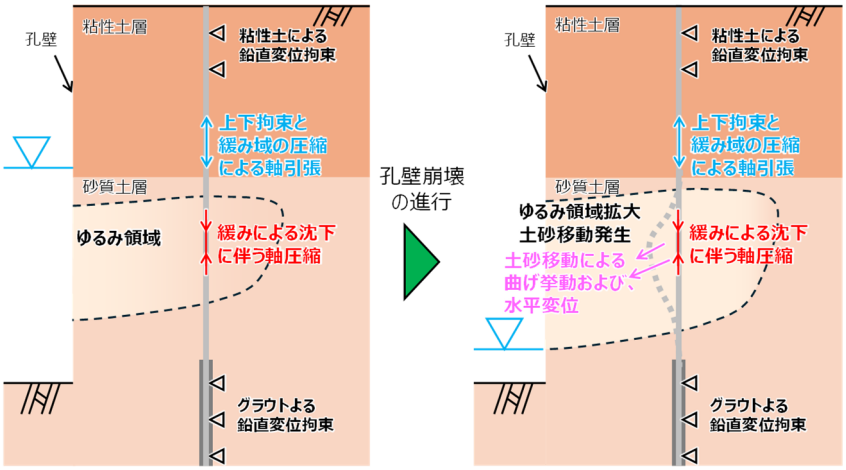


図-10　孔壁崩壊時の周辺地盤の挙動

一方，孔内水位を-7.3m まで低下させて孔壁崩壊が発生すると，軸ひずみも大きく増大するが，それまで顕著な挙動が見られなかった曲げひずみにも増大が確認された．また，その挙動は孔壁が崩壊した深度と概ね一致しており，**図-6** に示した水平変位の最大値が発生した深度とも一致した．

以上の計測結果から，杭の孔壁崩壊に伴う周辺地盤の挙動について，**図-10** に模式的に示した．すなわち，軸ひずみによって地盤の沈下挙動を検知し，水平変位と曲げひずみは，杭の孔壁崩壊に伴う水平方向の土砂移動を検知できたものと考えられる．このように，本計測手法は杭の孔壁崩壊などによる，周辺地盤の挙動を連続的かつ高精度に把握できる可能性が確認された．

４．まとめ

リバース杭施工時の掘削や孔壁崩壊による周辺地盤の挙動を把握することを目的として，杭周辺地盤の挙動を光ファイバセンサによって計測する試験を行った．その結果，杭の掘削に伴う微小な沈下や孔壁崩壊に伴う土砂の水平方向への移動など，周辺地盤の挙動を精緻に評価できる可能性を確認することができた．

５．参考文献

1)　東日本旅客鉄道(株)：列車運行時間帯の近接工事設計施工マニュアル，2009.

2)　水野弘二，大塚隆人，間瀬起一，永井辰樹：浜松町駅北口改良工事におけるホーム下かつ線路近接箇所での人工地盤基礎杭の施工，基礎工，Vol52，No.2，pp45-48，2024.

3)　大成建設：https://www.taisei.co.jp/about_us/wn/2024/240318_9946.html

4)　吉村雄一，青鹿弘行，今井道男，川端淳一，三宅大樹，谷村大輝，張超，伊藤文彦：PNC-OFDR 方式を用いた分布型光ファイバセンサによる静・動ひずみ計測，令和 4 年度土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会，CS9-41，2022.