

地盤・杭基礎の地震被害モニタリング技術検証 のための振動台実験速報

1. 研究背景・目的

文部科学省の委託研究「都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクトー都市機能の維持・回復のための調査・研究ー」では、一昨年度に鉄骨造高層建物、昨年度に鉄筋コンクリート造（以下、RCと称す）建物を対象とした大型振動台実験を行い、各種建物が完全崩壊に至るまでの損傷の進み方を詳細に把握するとともに、上部構造の健全度モニタリングシステムを検証しました。本年度は、建物を支える地盤と杭基礎に着目し、「地盤・基礎構造・ライフラインの健全度（注1）評価のためのモニタリングシステム検証」を目的に振動台実験を実施しました。

大地震発生後の地盤・基礎構造・ライフラインの健全度判断は、建物の機能維持・回復のために不可欠です。しかし、これらは地中に埋もれているため健全度を把握するのに多くの時間と費用を要します。そこで、本研究では、地盤・基礎構造・ライフラインの健全度を即時判断するためのモニタリングシステムの開発を進めてきました（図1）。今回の実験では、振動台の加振レベルを段階的に大きくすることにより、建物を支える杭の損傷を徐々に進展させ、その損傷状況をモニタリングしました。さらに、モニタリングシステムによる健全度の判定結果（図2）と実際の損傷状況を照合することにより、システムの妥当性を検証しています。

研究の成果目標は以下のとおりです。

- 地盤・基礎構造・ライフラインの健全度を評価するために開発したモニタリングシステムを検証すること、特に、地震によって杭・基礎に生じる傾斜やひび割れの検知を目標にしています。
- 杭と地盤の間の力の伝達を詳細に把握し、杭の挙動に及ぼす地盤の影響を評価します。

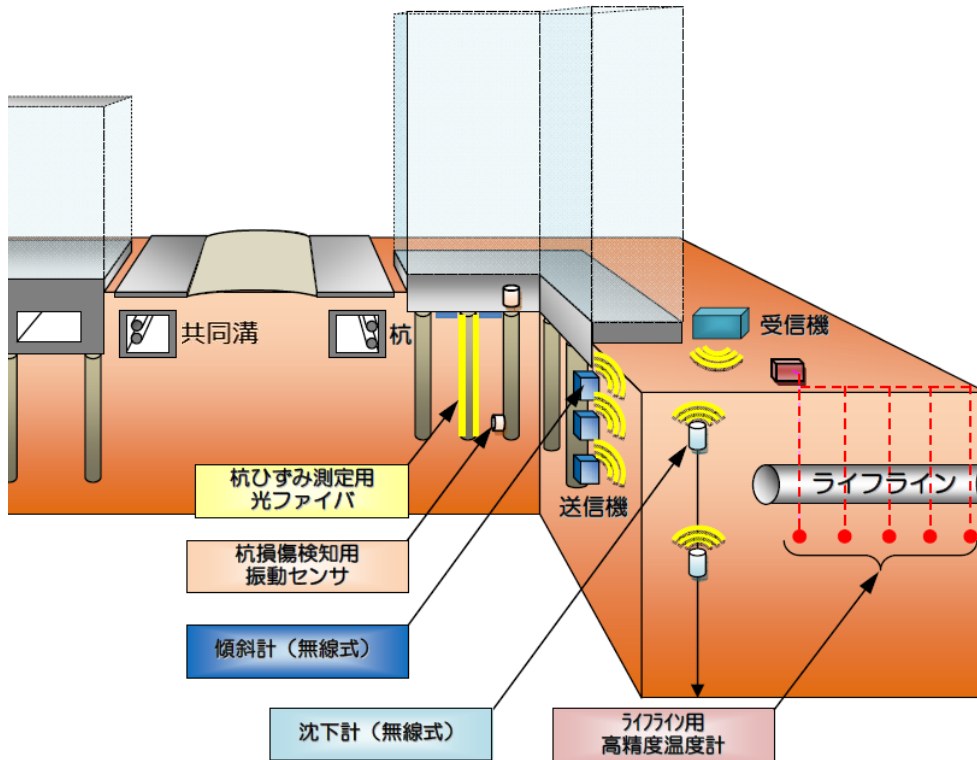
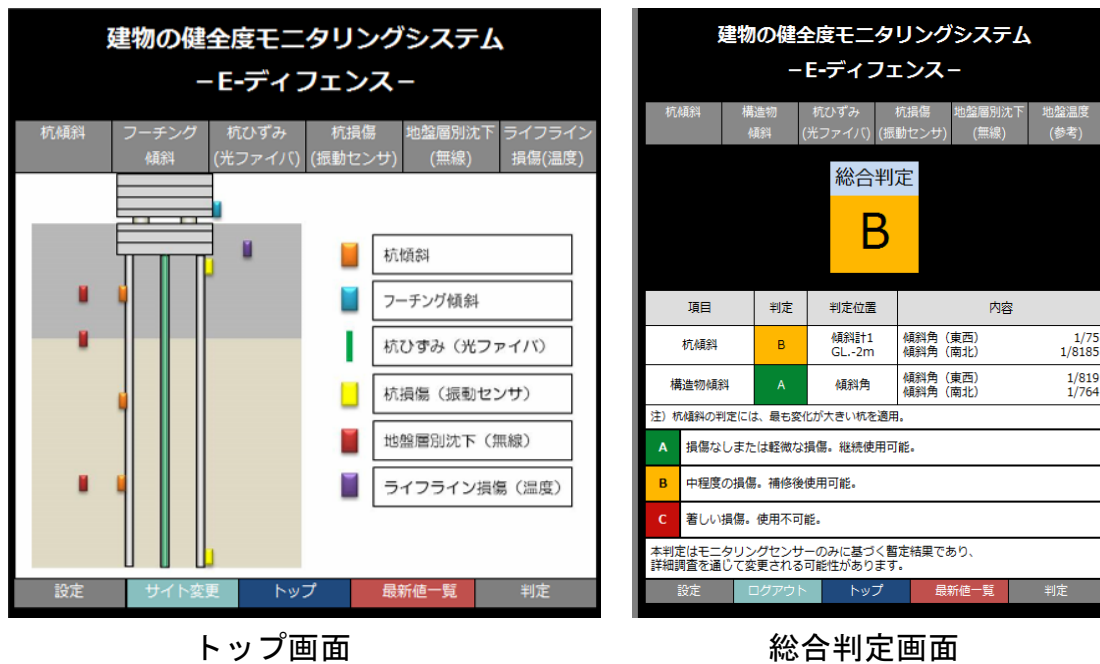


図1 モニタリングシステムの概要



トップ画面

総合判定画面

図2 モニタリングシステムの画面の例

2. 実験内容

防災科学技術研究所が保有する大型せん断土槽（直径 8m、高さ 6.5m、写真 1）を用い、砂地盤中に 2 種類の杭基礎模型（RC 杭、鋼管杭）を設置しました（図 3）。

RC 杭基礎模型には、最終的に振動によって大きな損傷が生じました。この損傷の度合

いをモニタリングシステムで評価することにより、システムの妥当性を検証しました。

鋼管杭基礎模型には、高い強度を有するものを用いましたので、杭と地盤の間の力の伝達を詳細に把握することができます。これにより、RC 杭の挙動に及ぼす地盤の影響を評価します。

RC 杭、鋼管杭ともに直径は約 15 センチメートルであり、RC 杭の本数は 6 本、鋼管杭の本数は 9 本としました。

地盤模型の上部は比較的ゆるい状態の砂で作成し、下部は比較的締まった状態の砂で作成しました。

図 4 にモニタリングシステムの試験体への設置状況を示しています。杭の傾きを測定する傾斜計、杭のひずみを測定する光ファイバ、杭体の損傷を検知する振動発生・受振装置、地盤の地震による沈下量を測定する沈下計、ライフラインの損傷に伴う地中温度の変化を測定する温度計を RC 杭と地盤中に設置しました。これらモニタリングセンサによる計測は、主な加振実験の加振直後に実施しました。

図 5 に加振実験中の試験体各部の動的な挙動を計測するためのセンサ配置を示しています。加速度計、変位計、ひずみゲージなど合計で 800 を超えるセンサを用いて、RC 杭・鋼管杭・建物・地盤の詳細な動的データを取得しました。

入力地震動には、建築物の耐震設計に標準的に用いられている告示波（JMA 神戸 NS 位相）と 1995 年兵庫県南部地震における観測波（JR 鷹取波 EW 成分）を用いました（図 6）。

加振実験は 2015 年 10 月 19 日から 21 日の三日間で実施しました。1 日目に RC 杭に損傷を生じさせない程度の加振を繰り返して、試験体の振動特性を把握したあと、中地震（レベル 1）相当の加振（多方向含む）を繰り返しました。2 日目には、大地震（レベル 2）相当の加振を 2 回行い、RC 杭の杭頭部分を損傷させることを目標としました。3 日目には、RC 杭をより大きく損傷させることを目標とし、加振を繰り返しました。



写真 1 大型せん断土槽外観

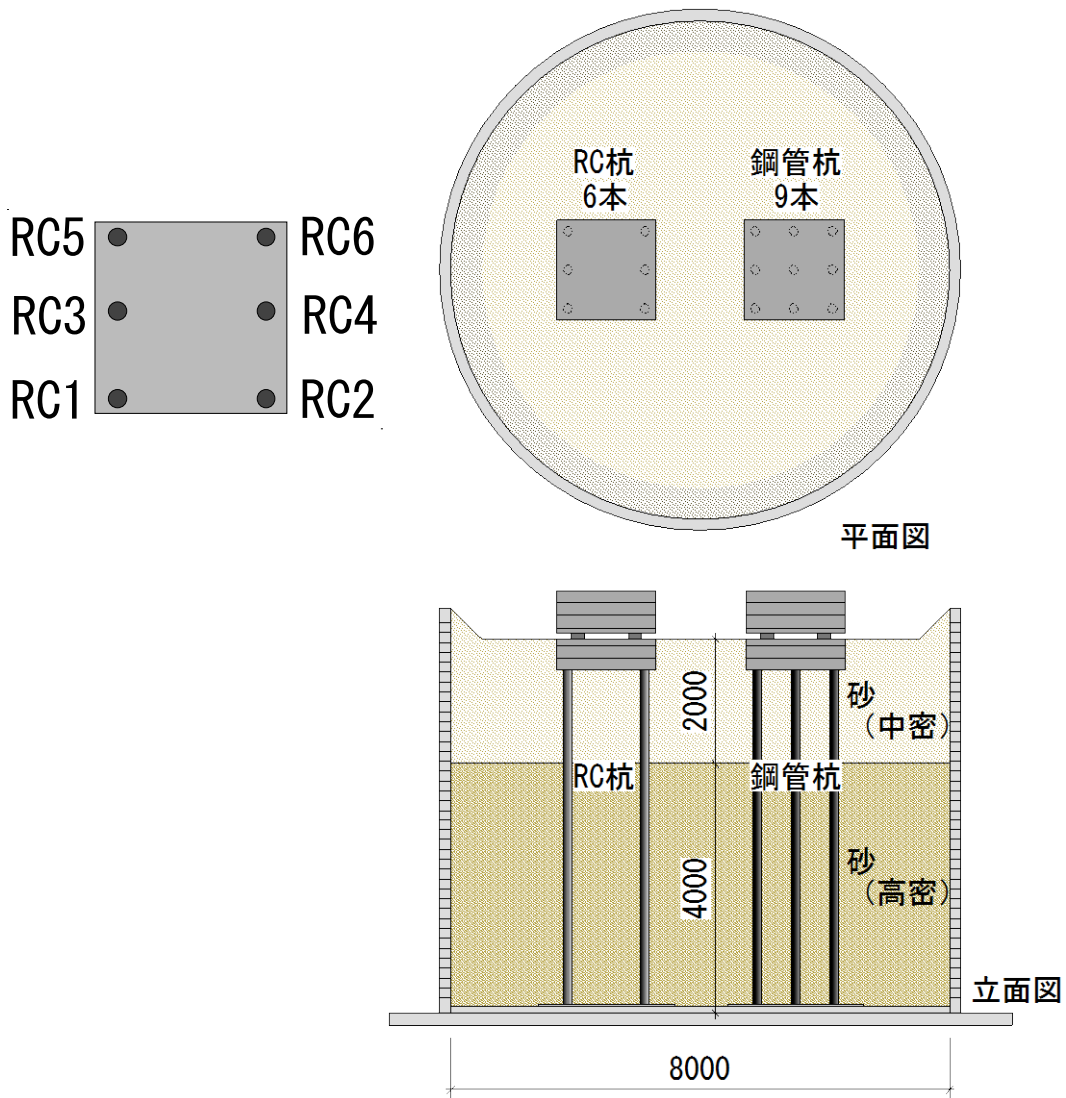


図3 試験体概要

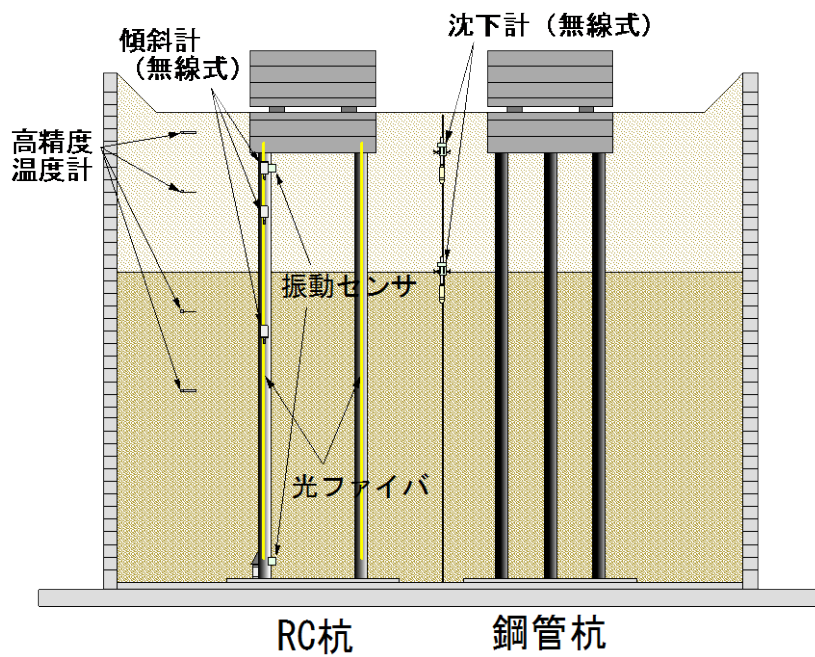


図4 モニタリングセンサの配置イメージ

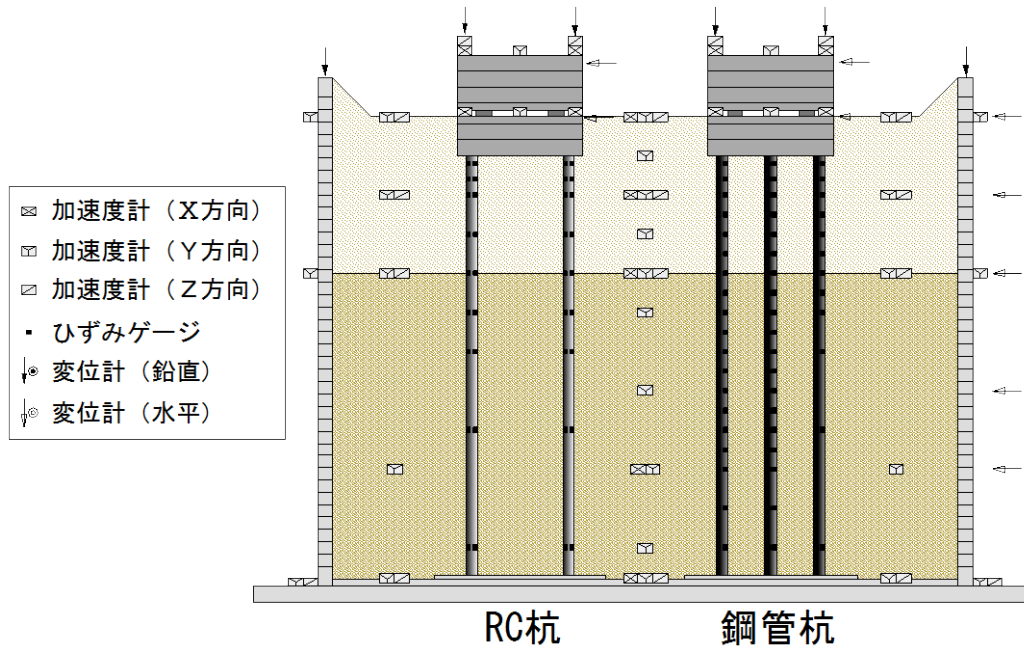
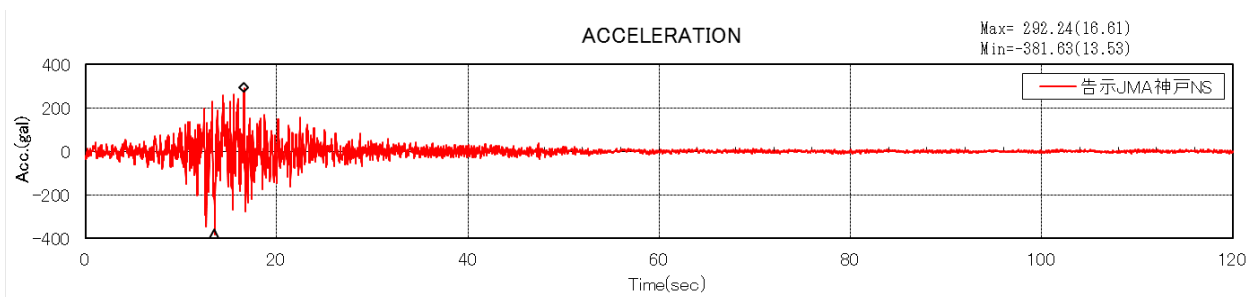
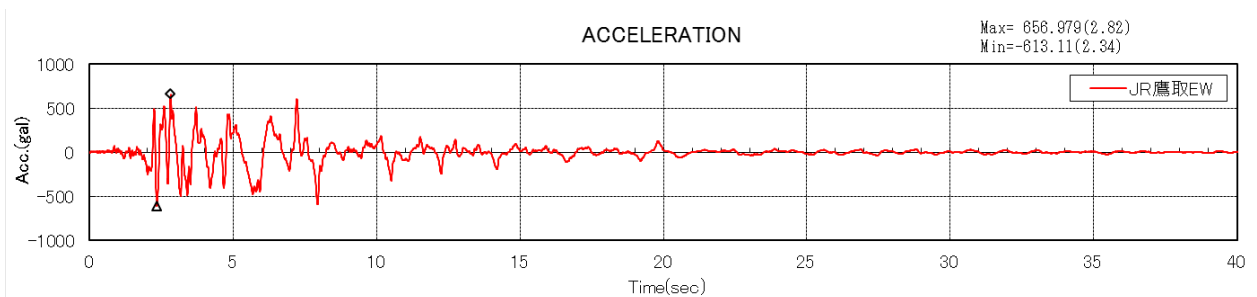


図5 モニタリングシステム外の一般センサ配置概要



(a) 告示波 (JMA 神戸 NS 位相)



(b)兵庫県南部地震実測波 (JR 鷹取 EW 成分)

図6 入力地震動

3. 実験結果

3.1 主な加振ケース

表1に、主な加振ケースの概要をまとめています。

一日目は中地震（レベル1）相当の加振を実施しましたが、構造物、杭ともに傾斜はほとんど生じませんでした。杭の応答に関しては、杭頭にわずかなひび割れが発生した程度でした。

二日目は大地震（レベル2）相当の加振を実施し、杭にはわずかな傾斜が残りました。これは、杭の鉄筋が降伏点（注2）を超え、塑性化（注3）していることに対応しています。

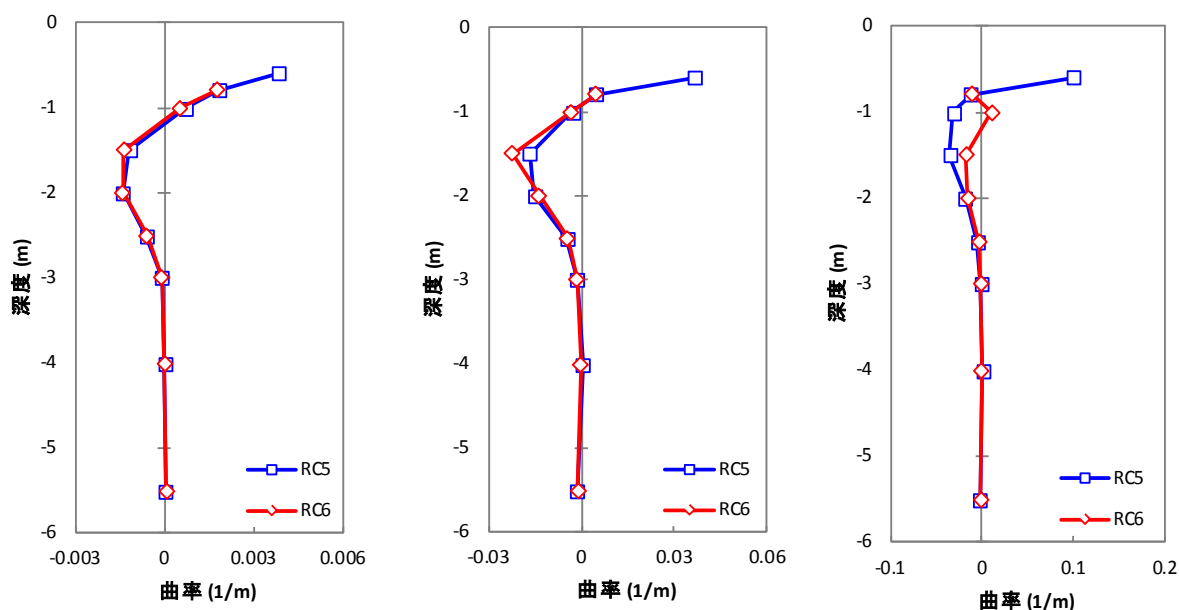
三日目は地震動のレベルをさらに大きくすることにより、杭の傾斜が1/100を超えました。ひずみゲージから推定した杭頭部の曲率（注4）は終局限界（注5）を超えており、表面のコンクリートが剥落するレベルに達していると評価できましたが、これは後日地盤を掘削して杭頭を観察した結果（後述）と整合しています。

表1 主な加振ケースの結果概要

日付	入力波	振動台		地表面		構造物 傾斜	杭 傾斜	杭応答	
		加速度 cm/s ²	震 度	加速度 cm/s ²	震 度				
一日目	10/19	告示波 20%	82	4	105	4	1/2755	1/2204	ひび割れ発生
		鷹取波 10%	75	4	123	4	1/2449	1/1049	ひび割れ発生
二日目	10/20	告示波 100%	354	6弱	434	6弱	1/7346	1/262	鉄筋降伏
		鷹取波 60%	489	6弱	543	6強	<1/10000	1/175	鉄筋降伏
三日目	10/21	告示波 100%	352	6弱	482	6弱	<1/10000	1/127	鉄筋降伏
		告示波 150%	542	6弱	627	6強	1/711	1/75	終局(コンクリート剥落)

3.2 RC杭の曲げ応答

鉄筋に貼付したひずみゲージから求めたRC杭の曲率の同時刻分布（杭頭曲率最大時）の例を下記に示します。杭頭部と地中部で曲げが大きくなる典型的な曲率分布が得られています。



10/19 告示波 20% 16.88 秒

10/20 鷹取波 60% 3.32 秒

10/21 告示波 150% 16.98 秒

図7 RC杭の曲率分布

3.3 杭の掘り出し状況

実験後、地盤を掘削し、杭を目視観察しました。6本すべての杭において、杭頭部で損傷が見られました。一部の杭ではコンクリートの剥落が顕著にみられました(写真2)。

また、地中部の杭頭から2m程度の範囲内に、数多くの曲げひび割れが観察されました(写真3)。

以上の観察結果は、図7のひずみゲージから求めた曲率分布とも整合しています。

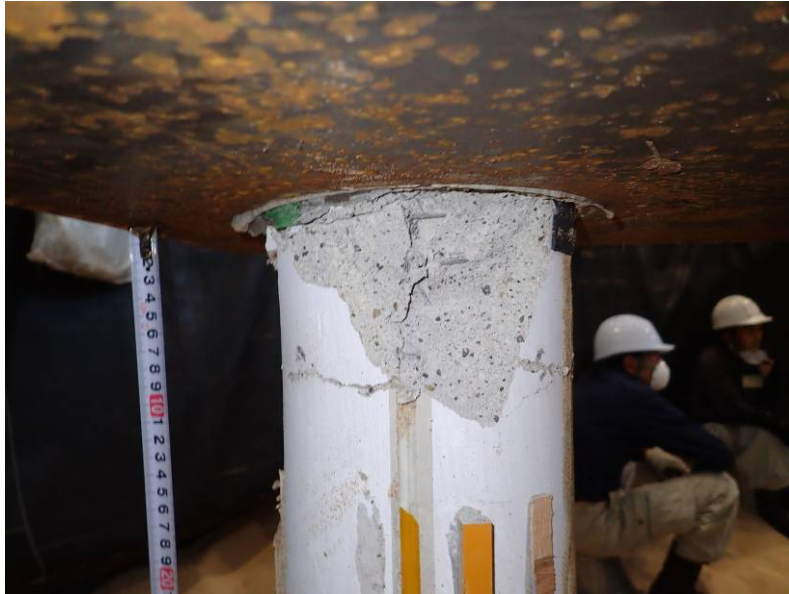


写真2 杭頭部のコンクリート剥落状況



写真3 杭頭部全景

3.4 モニタリング

(1) 傾斜による総合判定結果

今回の実験では、建物の健全度判定に、杭の傾斜と建物そのものの傾斜を用いました。A～Cの3段階の判定区分の閾値を表2のように暫定的に定め、本モニタリングシステムを運用しました。

各実験日の加振終了後にモニタリングし、上記の暫定的な閾値を用いて判定した結果を図8に示します。杭の傾斜は徐々に大きくなり、三日目の最終加振によって杭頭が顕著に損傷した結果、杭の傾斜が1/100を超え、B判定が下りました。

本システムにより、杭の健全度を即時にモニタリングできることが確認できました。

表2 実験で用いた健全度判定の暫定クライテリア

対象	センサ	測定データ	測定データによる評価		
			A	B	C
杭	傾斜計	傾斜角 R_p	$R_p < 1/100$	$1/100 \leq R_p < 1/25$	$1/25 \leq R_p$
建物	傾斜計	傾斜角 R_f	$R_f < 1/300$	$1/300 \leq R_f < 1/75$	$1/75 \leq R_f$
総合判定			杭とフーチング（構造物）の傾斜角のうち、 厳しい方の評価結果を採用		

A：損傷なしまたは軽微な損傷、継続使用可能

B：中程度の損傷、補修後使用可能

C：著しい損傷、使用不可能



図8 各実験日の最終総合判定結果

(2) 光ファイバによる杭の残留ひずみ（注6）の計測

杭の表面に貼付した光ファイバを用いると、杭表面のひずみを連続的に計測することができます。一方、鉄筋に貼ったひずみゲージというセンサを用いると、鉄筋のひずみを各点で計測することができます。これらの計測データを図9で比較して示しています。実線が光ファイバのデータ、マーカーがひずみゲージのデータを示しています。西側（W, A）は青色、東側（E, D）は赤色で区別しています。

一日目のデータを見ると、杭にはほとんど残留ひずみがないことが分かり、一日目の総合判定結果が「軽微な損傷、そのまま継続使用可能」を意味するA判定であったことと整合しています。

また、二日目のデータを見ると、杭頭部において大きな引張ひずみ（+方向）が残っています。傾斜計のデータのみから定まった総合判定結果は「A」でしたが、「中程度の損傷、補修後継続使用可能」を意味するB判定となる可能性を示唆しています。

さらに、三日目のデータを見ると、杭頭と地中部に大きな曲げ変形（圧縮ひずみと引張ひずみ）が残っていることが分かり、上述した掘り出し後の目視観察結果と整合しています。（杭表面と鉄筋では杭の中心軸からの距離が異なるため、杭の曲げによるひずみは中心軸からより遠い杭表面の方がより大きくなる傾向があります。）三日目の総合判定結果に関しては、写真2のようなコンクリート剥落を伴う損傷状況（終局限界を超えた状態）を考え合わせると、「B」よりも「著しい損傷、使用不可能」を意味するC判定となるべきであった可能性もあり、これについては今後検討を継続いたします。

実験当日は、モニタリングシステムによる健全度判定には即時性の高い傾斜計のデータのみを用い、データ収集に若干の時間を要する光ファイバのデータは用いておりませんでした。しかし、上述したように、光ファイバのデータも判定に用いたほうが、より実現象に即した結果が得られると考えられるため、計測時間の短縮を図って即時性を高めることにより、光ファイバを判定指標に加えられるよう、検討を進める所存です。

また、今回の実験では、地震で杭が損傷したとしても、地震後の杭の傾きに与える影響が小さい場合のあることも明らかになりました。杭や建物の健全性を評価するための適切な判定値の設定は今後の課題です。

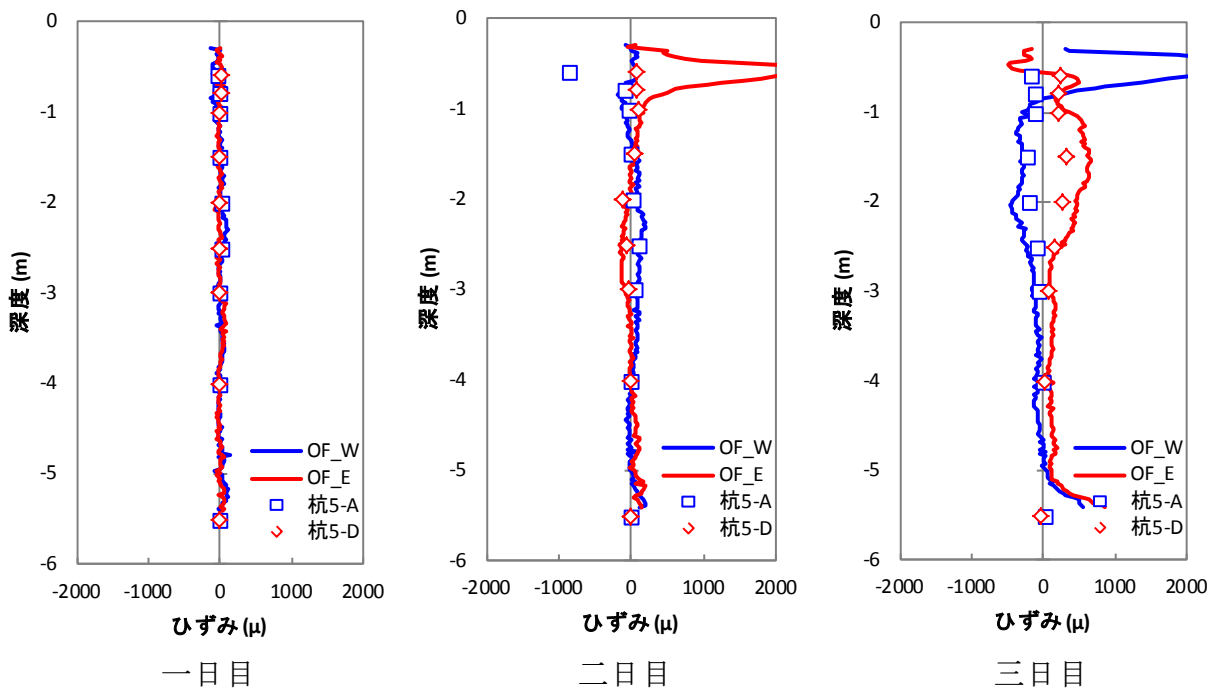


図9 光ファイバと鉄筋ゲージの残留ひずみの比較（実線：光ファイバ）

4. まとめ

今回の E-ディフェンス実験において、地盤・杭の健全性モニタリングシステムを適用することにより、地震後の杭の傾きを即時に検知することができました。また、杭の残留ひずみを光ファイバにより比較的短時間で評価することも可能となりました。

目視できない杭の状態を地震後即時にモニタリングし、その健全度を判定する本システムの必要性は今後より高まると考えられます。実用化に向け、地震後の建物や杭の傾きの検知に加えて、光ファイバによるひずみの計測値も考慮して、更にシステムの信頼性を向上させる所存です。

用語解説

注1：健全度

地震によって杭が受けた損傷の程度に応じ、その後の継続使用可能性を示す指標です。補修せずにそのまま継続使用可能であるか、補修すれば継続使用可能であるか、あるいは、使用不可能であるか、などの判断に用います。

注2：降伏点

鉄筋を引っ張ると伸びますが、引っ張る力をゼロにすると元の状態に縮んで戻る性質を弾性と呼びます。引っ張る力がある大きさを超えると、力をゼロにしても元の状態に戻らず、変形が残ります。この性質を塑性と呼びます。弾性範囲を超えて、塑性領域に入る境界を降伏点と呼びます。

注3：塑性化

注1にも記したとおり、力をゼロにしても元の状態に戻らず、変形が残る状態になることを塑性化と呼びます。

注4：曲率

杭など柱状のものが曲げる力を受けて曲がったときの、曲がり具合を表す値です。

注5：終局限界

耐震設計で用いる概念のひとつであり、杭の終局限界とは、建物を支持できなくなる限界、あるいは、補修・補強して再使用できなくなる限界を意味しています。本実験では、表面コンクリートの圧縮ひずみ（変形の程度）が0.3%になる状態を想定しています。

注6：残留ひずみ

地震後に残った変形の程度を表しています。