

第6章 まとめ

令和6年能登半島地震において転倒被害を生じた建築物（A建物）及び転倒には至らなかったものの大きな沈下被害を生じた建築物（B建物）について、被害の要因分析のための調査を行った。調査によって得られた知見を以下に示す。

- ・ A建物の転倒被害に係る状態について、杭の支持性能の喪失（杭の圧縮軸力下での破壊）、一部の杭への被害の集中による過大な傾斜の発生、建築物の沈下に伴う傾斜の進行があり、これらが連鎖的に生じたことが転倒につながったとして、被災シナリオを示した。また、再発防止については、転倒被害の要因を「基礎が地震時に支持性能が容易に失われるおそれのある杭に支持されたもの」「上部構造が地震時に片側への過大な傾斜を生じやすい構造（計画）であるもの」「杭の支持力が喪失した後、地盤の支持力不足により建築物が著しい沈下を生じるおそれのあるもの」とし、それぞれについて上部構造、基礎、地盤で可能な対策の方向性を現時点における提案として示した。
- ・ A建物の上部構造（パイルキャップ、基礎ばりを含む）について、部材寸法や強度・配筋の実測、3D点群データに基づく形状の分析、転倒に伴い移動した地盤の体積（土量）の算出、掘削により露出した杭頭部との位置関係の把握等により、構造図面の復元及び転倒状況の断面図の作成等を行った。さらに、復元した図面を用いた一貫構造計算プログラムによる解析を行い、作用する水平力に応じた各部材の応力、杭の鉛直力（支点反力）の状況を確認した。

長期荷重時の支点反力の解析結果より、被災後に地表に露出していたX0通りより、その逆のX2通り側の支点反力が相対的に大きい結果となった。層せん断力係数（ベースシア） $C_0=0.04$ のX方向正加力時に北西角X0/Y3の支点反力が最初にゼロとなり、 $C_0=0.10$ 、 0.15 、 0.20 と増加させるに従い、支点反力がゼロとなる支点も増える結果となった。

- ・ A建物の下部構造（基礎ばり、パイルキャップ、杭及び地盤）の調査を行った。杭について部材寸法や強度・配筋の実測を行い、A建物全体で45本、すべて同寸（ $\phi 350\text{mm}$ ）の既製コンクリート杭であることを確認した。被災した杭の中空部を用いた調査により、杭の先端深度、中間部の損傷及び傾斜を確認し、上部構造と基準点を共有した測量結果に基づき、上部構造・基礎・地盤の被害状況を一つの断面図にまとめた。

掘削により露出した杭頭部の詳細な調査を行い、被害状況を確認した。転倒時に引抜き側となるX0通りの杭頭部では、せん断破壊や縦ひび割れの様子が確認された。転倒により地中に押し込まれたX2通り側の杭については、地震時の被害か上部構造の転倒に伴う被害かの区別は困難であったが、同様の被害状況が確認された。

A建物の敷地に関する微動アレイ探査を行い、その分析結果及び周囲の観測点（JMA 輪島）における本震の観測記録を用いてA建物に作用した地震動を推定した。計算された本震地動の応答スペクトルは、周期1秒程度以下では現行規定と概ね同程度であった。一方、建物の上部構造の被害や杭基礎の損傷に影響する地盤変位に影響する周期1秒～3秒程度では、現行規定の値を大きく回っていた。

パイルキャップの調査から、杭頭部が引抜き力を受けた際に離間等を生じて存在応力を伝達できなくなるとし、支点反力がゼロとなったパイルキャップ位置の杭は水平力を分担できない条件で地震時の杭の損傷の検討を行った。解析の結果、 $C_0=0.2$ の状態、杭頭の支持条件（固定またはピン）によらず、建物北側のY3通りにおいて破壊のN-M曲線を大きく超える応力が見られた。

- ・ A建物の上部構造、基礎及び地盤の調査結果に基づき、転倒現象を解析的に再現することを目的として、杭の損傷に着目した杭-地盤-建物系の三次元地震応答解析、杭の破壊による建物の不安定化に着目した3次元FEM地震応答解析、粒子法によるA建物の2次元転倒解析、直接基礎的支持における支持力・沈下の検討、杭破壊後の直接基礎的支持における転倒メカニズムの検討を実施した。いずれも、今回の事例をある程度再現できている部分はあるが、今後より詳細な検討が必要と考えられる。
- ・ B建物について、大きな沈下被害を受けたものの転倒には至らなかったことから、転倒を生じたA建物との差異について検討するため、A建物同様、一部の基礎ばり及びパイルキャップの掘り出し等による実測、敷地内の地盤調査や微動アレイ探査を実施した。調査の結果、杭頭部において大きな傾斜等の被害が確認されたことから、A建物と同様に深度6 m程度までの掘削を想定した調査計画を立案した。
- ・ 転倒や沈下の要因分析のため、A建物及びB建物の敷地及び周辺において標準貫入試験、コーン貫入試験をはじめとする各種の地盤調査を行い、また、採取した試料を用いた土質試験なども実施した。これらの結果は今後転倒に関する詳細な解析を実施する上で貴重な記録となることから、別途付録として取りまとめた。

なお、ここでは現時点での報告として資料をまとめたが、令和6年能登半島地震で見られた建築物の転倒被害については未解明の部分も多く、その分析にあたり多くの仮定や技術的判断を行っている。今後もより詳細な分析や、そのための知見の蓄積を行い、転倒被害の確実な防止に繋げてゆく必要がある。その過程で、本報告に示された事項についても、修正が加わる場合がある。