

論文 令和 6 年能登半島地震で被災した 7 階建て RC 造建物の被害調査報告と解析的検討

島津 勝^{*1}・黒木 正幸^{*2}・山口 謙太郎^{*3}・西野 広滋^{*4}

要旨：本研究では、令和 6 年能登半島地震で被災した 7 階建て RC 造建物の現地調査の結果を報告し、その中で画像解析による建物サイズ、損傷状況および転倒状況を示した。さらに、建物のプッシュオーバー解析と弾性接触解析、および下部構造の沈下挙動解析から、柱脚固定時と柱脚の浮き上がりを考慮した時の最大層せん断力係数の差、および建物が転倒に至るときの建物沈下量を推定した。また、建物転倒時にフーチングを介して隣地に水平反力が生じること、さらに、基礎沈下時に地盤に円弧上のすべり面が形成されることを明らかにした。

キーワード：令和 6 年能登半島地震, RC 造建物, 被害調査, 転倒, 有限要素法

1. はじめに

令和 6 年 1 月 1 日に石川県能登地方を震源とする Mj7.6 の地震が発生し¹⁾、輪島市内の多くの RC 造建物で傾斜や転倒が確認された。それらは中高層建物であり、支持形式は杭基礎であると推測される。杭基礎は上部構造を点で支持する形式であることから、複数本の杭が損傷すると上部構造の傾きに大きな影響を与える。

本報は令和 6 年能登半島地震で被災した RC 造建物の被害調査の報告と、被災建物を対象に実施した数値シミュレーション結果と調査結果との比較から、建物の転倒挙動と沈下挙動の推定、および沈下によって基礎構造に生じる応力について検討したものである。

2. 調査対象建物の概要と被害状況

2.1 建物の概要

本研究で調査対象とした建物は令和 6 年 1 月 1 日午後の本震で転倒した輪島市の 7 階建て RC 造建物(竣工時)

である。竣工年は 1973 年 4 月、用途は店舗・作業所である。1976 年に 3 階建て鉄骨造建物を増築し、2 棟を連結している。竣工時には地階が設けられていたが、平成 19 年能登半島地震以降埋め戻されている。

図-1 と図-2 にそれぞれ調査対象建物の各階平面図と立面図を示す。建物寸法は被災前の建物写真²⁾の画像解析により測定された値である。また、柱位置は転倒によって露出したフーチング位置と被災前の写真²⁾から推定されたものである。以降、図中に示す通り符号を用いて柱・梁の位置を表すこととする。例えば、1 階 D 通り 3 の柱は 1D3 である。1 階には駐車場と店舗があり、2～7 階は店舗兼作業所である。図に書き入っていないが、階段室は北側に設けられており、各階の A1～A2 間に階段窓がある。

図-3 に柱・梁部材の断面図を示す。断面寸法は画像解析により測定された値である。主筋寸法、位置および本数は同年代に竣工された 7 階建て RC 造建物を参考^{3),4)}

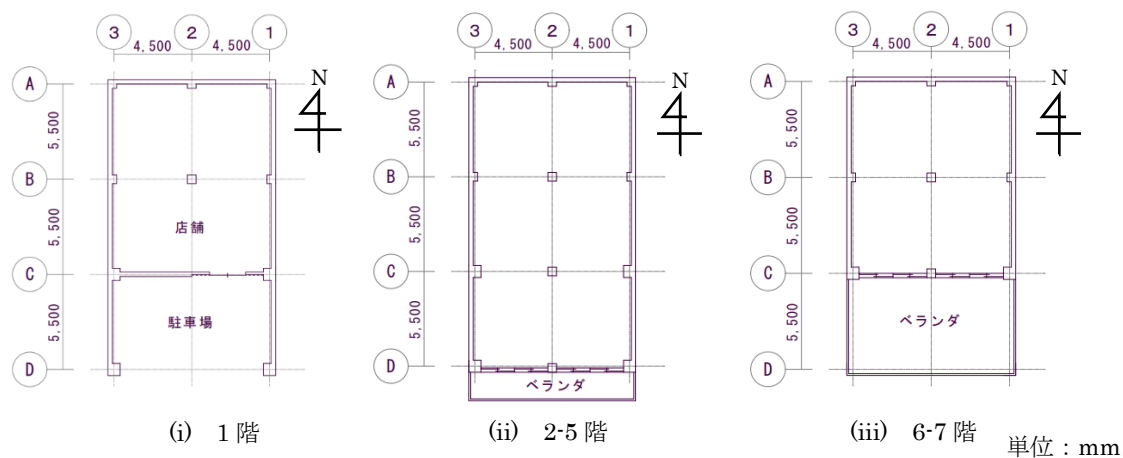


図-1 平面図

*1 大分大学 理工学部理工学科建築学プログラム 准教授 博士(工学) (正会員)

*2 大分大学 理工学部理工学科建築学プログラム 教授 博士(工学) (正会員)

*3 九州大学 人間環境学研究院 教授 博士(工学) (正会員)

*4 株式会社トーホー 顧問

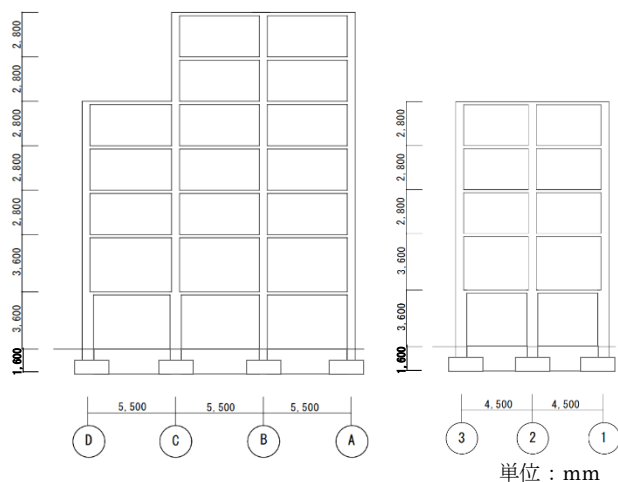


図-2 立面図

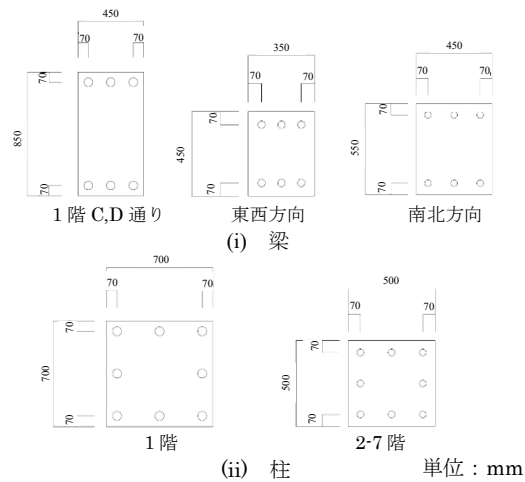


図-3 柱梁部材断面図



(i) 南面



(ii) 北面



写真-2 隣地状況



(iii) 西面



(iv) 東面

写真-1 建物全景

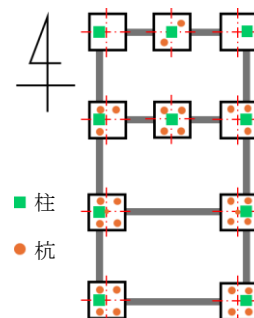


図-4 基礎平面図

にし、柱と梁の主筋寸法を1階 D29、2階以上 D25 としている。

2.2 建物の被害状況

写真-1 は各方位の建物全景である。建物が東方向に転倒し、西面で露出したフーチングを確認できる。(i)南面の写真より、1D3 柱が柱頭で折れ曲がっているのが確認できる。また、柱表面に鋼材が確認できる。(ii)北面の写真より、4～6 階の A1～A2 間の壁に斜めひび割れが、また、3 階の A2～A3 間の壁が剥落し、隣棟との連結部が確認できる。(iii)西面の写真より、基礎の2、3 通りのすべてのフーチングが露出していることがわかる。1 通りのフーチングは土中にあり目視で確認できない。また、C2～C3 間と D2～D3 間の基礎梁の端部が損傷しており、損傷部から下端筋とせん断補強筋が確認できる。基礎梁の高さは1.6m、下端筋の本数は5本である。フーチング

の底には杭頭の跡が確認できる。杭頭には木の板が被せられており、その板がフーチングの底に貼り付いている。1 階床は鉄筋が入った厚さ 15cm 程の土間コンクリートで仕上げられている。また、写真はないが周辺で液状化現象が確認されている。

図-4 に基礎平面図を示す。図中の□は柱の位置、○は杭の位置である。道路側により多くの杭が打ち込まれている。露出した A3 のフーチングには杭跡がない。

写真-2 は調査建物の西側隣地の写真である。隣地建物は2階建ての RC 造建物で、その外階段の中段あたりから折れていることが確認できる。また、階段下の組積造の物置小屋が倒壊している。隣地境界の南側（道路側）のフェンスが根元から倒れ、北側のフェンスは倒れていない。被災前の写真²⁾から、倒壊した建物と写真-2 の建物は密接していた。

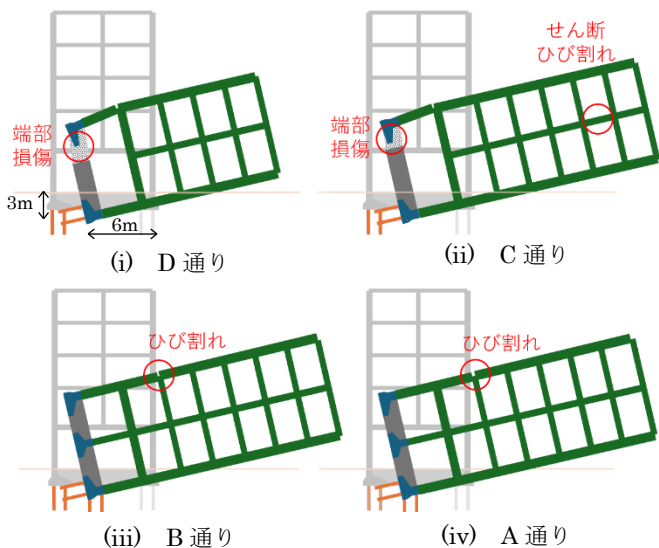


図-5 各部の損傷と建物転倒状況

図-5 に各部の損傷と建物転倒状況を示す。各部の損傷状況は建物外から目視で確認されたものである。転倒状況は、写真-1(i)南面の各階の梁端部と地盤面との距離から推測されたものである。3D1 より下層の柱が埋没しており、3 階梁端部が地盤面位置で確認できる。この図より、1 通りのフーチングが鉛直方向に 3m 程沈下し、西側方向に 6m 程移動したことがわかる。建物の露出していない部分（地中部分）の状況については現段階では未確認であるため、地中の各部が大破してない状態で転倒したと仮定し作図されている。

3. 数値解析

解析に必要な情報が正確ではないため、本研究においては解析値を推測値とする。

3.1 解析方法

本研究では解析に有限要素解析プログラム ABAQUS⁵⁾を用いる。使用する要素は Beam 要素 (B33), Shell 要素 (S4) および Solid 要素 (C3D8) である。

Beam 要素では平面保持の仮定に基づき、コンクリートと鉄筋の間ですべりは生じないものとする。鉄筋は主筋のみで、せん断補強筋はない。柱と梁は 1 部材 1 要素でモデル化される。部材断面の応力の参照点の数はコンクリート部が 25 (5×5)、鉄筋 1 本が 1 である。積分点は Beam 要素の両端および中央の 3 つである。コンクリートにはスミアドひび割れモデルを用い、引張軟化特性を考慮している。鉄筋の構成則はひずみ硬化係数 0.01 のバイリニア型である。せん断破壊は考慮されていない。コンクリートと鉄筋の構成則を図-6 に示す。ここで、 σ_c^u は圧縮強度、 ϵ_c^u は圧縮強度時ひずみ度、 σ_t^u は引張強度、 ϵ_t^u は引張軟化後のひずみ度、 E_{con} はコンクリートのヤング係数、 σ_y は鉄筋の降伏強度、 E_{st} は鉄筋のヤング係数である。Shell 要素と Solid 要素は弾性体あるいは剛体とし

てのみ使用する。

3.2 B33 要素の解析精度

解析精度の検証のために、宮川ら⁶⁾の RC 骨組の実験結果と解析結果との比較を示す。図-7 に解析対象試験体の形状を示す。載荷実験は、一定鉛直荷重が 2 本の柱の柱頭部に作用するように載荷し、この荷重を一定に保持した状態で、上部梁両端に取り付けた 2 つのオイルジャッキを用いて繰返し水平力を載荷している。コンクリートの圧縮強度は 26.8MPa、ヤング係数は 23.2GPa である⁶⁾。鉄筋の降伏強度、ヤング係数は、D16 と D10 で、それぞれ 397MPa、200GPa と 410MPa、199GPa である⁶⁾。

図-8 に解析モデルを示す。柱梁接合部に節点を設け、1 部材 1 要素とし、材料定数に上記の値を使用する。解析は複合非線形解析で、左側柱頭に一方向の水平力をかけている。図-9 に水平力-部材角関係を示す。最大耐力を比較すると実験値 106kN に対し解析値 112kN である。履歴に差異はあるものの最大耐力を概ね評価できている。

3.3 7 階建て RC 造建物の解析モデル

図-10 に解析モデルを示す。解析モデルはモデル A～C の 3 種類である。全モデルとも柱梁接合部に節点を設

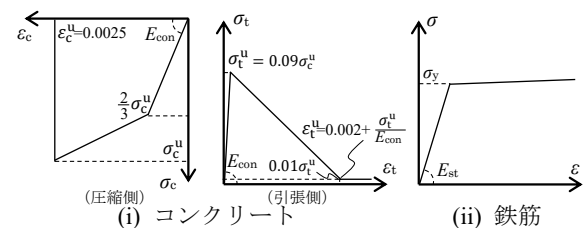


図-6 構成則

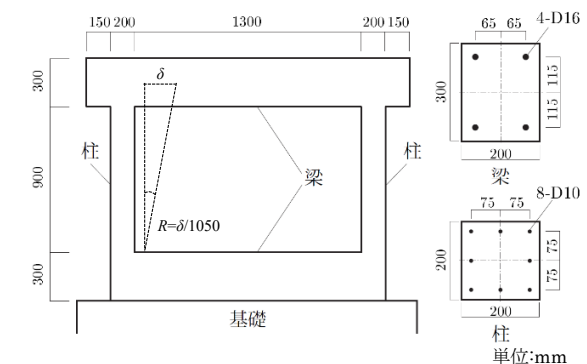


図-7 No.1(B)試験体の形状⁶⁾

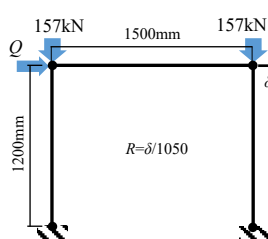


図-8 解析モデル

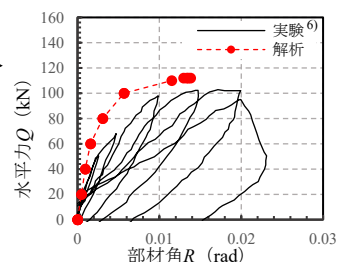


図-9 水平力-部材角関係

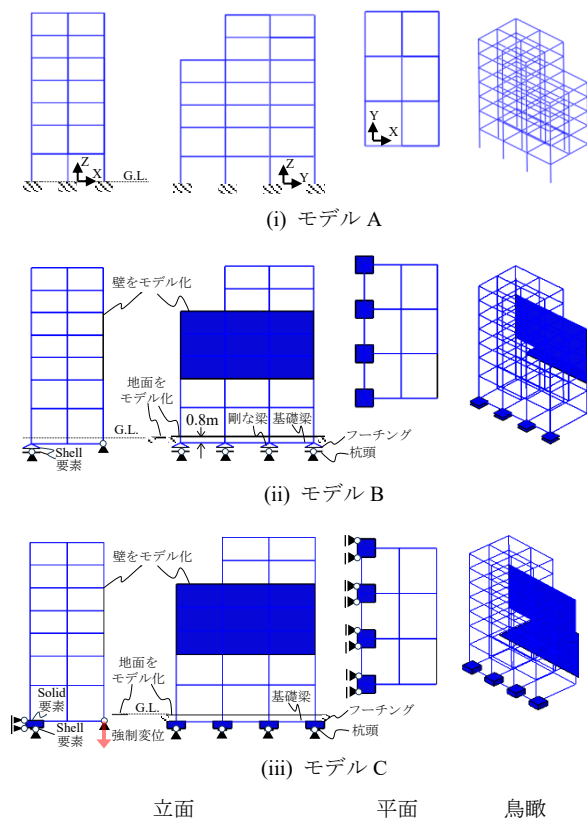


図-10 解析モデル

け、柱と梁を1部材1要素でモデル化している。支配面積に応じて1階柱頭以上の柱梁接合部に固定荷重と積載荷重の和を鉛直載荷している。下部構造に作用する土圧は考慮されていない。図-3に各部材の断面を、表-1に材料の力学的特性を示す。

(i)のモデルAは上部構造のみをモデル化し、1階柱脚を完全固定としている。

(ii)のモデルBは上部構造と基礎梁をBeam要素で、3通りのフーチング、杭頭、壁および地面をそれぞれ1つのShell要素でモデル化している。フーチングのShell要素は四隅の4節点を剛なBeam要素で柱基礎梁接合部の節点と連結している。杭頭は要素中心で回転フリーとなるようピン支持されている。また、1通りの柱基礎梁接合部もピン支持されている。壁のShell要素は四隅の4節点を柱梁接合部と共有し、地面のShell要素は四隅の4節点を完全固定としている。

(iii)のモデルCは上部構造と基礎梁をBeam要素で、3通りのフーチングをSolid要素で、杭頭、壁および地面をそれぞれ1つのShell要素でモデル化している。フーチングは、頂点を8本の剛なBeam要素で柱基礎梁接合部の節点と連結している。フーチングはX方向変位拘束、杭頭は要素中心で回転フリーとなるようピン支持されている。1通りの柱基礎梁接合部もピン支持されている。壁のShell要素は四隅の4節点を柱梁接合部と共有し、地面のShell要素は四隅の4節点を完全固定としている。

モデルB、Cともフーチングが杭頭と接触するように設定され、骨組重量を杭頭と1通りの柱基礎梁接合部で支える。また、壁と地面のShell要素も接触するように設定されている。フーチングと壁にはコンクリートのヤング係数を用い、杭頭と地面は剛とする。フーチングと杭頭間の摩擦係数は0.3である。

3.4 保有水平耐力の推定

本節では、モデルAとモデルBを用いてプッシュオーバー解析を行う。水平力の割合は、 A_i 分布に従って高さ方向の割合を、各構面が負担する重量の割合に従って水平方向の割合を決定している。 A_i 分布の算定には1次固有周期を用い、モデルAでは0.53sec、モデルBで0.87secである。水平力はX方向正向きに加力し、解析は最大耐力に達した時点で終了する。

図-11にモデルAとモデルBの層せん断力係数-層間変形角関係を示す。層間変形角はA3柱のX方向変位を階高で除したものである。図より、1階柱脚の固定度が低くなると最大耐力と初期剛性が低下することがわかる。モデルBの境界条件では3通りのフーチングが浮き上がるよう設定しているが、水平力を加えても転倒するほどの浮き上がりはなく、D3のフーチングで最大1.8cm浮き上がる。

図-12に解析終了時のモデルAとモデルBの変形図と積分点での降伏状況を示す。参照点の一部が降伏する積分点を●印で示している。降伏の判断は、圧縮側ではコ

表-1 材料の力学的特性

	コンクリート	主筋
降伏強度	-	360 N/mm ²
圧縮強度	27.4 N/mm ²	-
引張強度	2.5 N/mm ²	-
ヤング係数	24 kN/mm ²	206 kN/mm ²

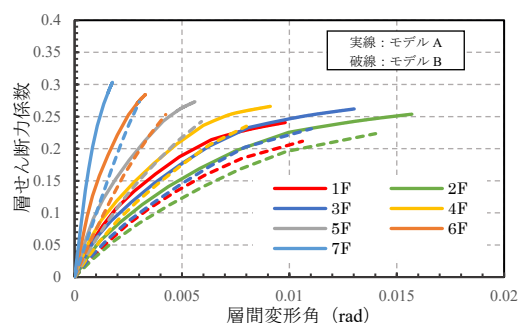


図-11 層せん断力係数-層間変形角関係

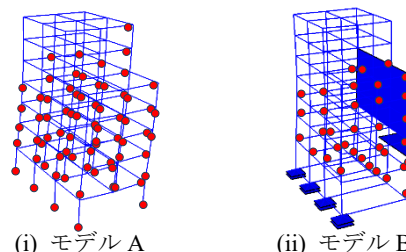


図-12 変形図と降伏状況（変形倍率10倍）

ンクリートが圧縮強度に達したか、引張側では鉄筋が降伏強度に達したかで判断している。モデル A では下層から上層に向かって柱材と梁材が降伏していき、7 階まで降伏している。一方、モデル B でも下層から上層に向かって降伏していくが、3 通りの柱材は降伏せず、5 階まで降伏している。モデル A、B とも解析結果は実建物の損傷状況と一致していない。

3.3 建物転倒時の沈下量の推定

本節では、モデル B を用いた変位制御型の静的弾性解析を行う。解析では 1 通りの基礎梁端部に Z 方向の強制変位を与えている。図-13(i)に境界条件を、(ii)に解析終了時の変形図を示す。Z 方向の強制変位が 3.5m に達したときに 3 通りのフーチングが浮き上がり、建物は自重で転倒する。この値は調査結果の沈下量と同程度である。

3.4 フーチングに生じる水平反力の推定

本建物は西側隣地の建物と密接し、隣地の構造物の一部が損傷している（写真-2 参照）。本節では、3 通りの X 方向変位の拘束が本建物の下部構造に与える影響について検討する。解析はモデル C を用いた変位制御型の静的弾性解析である。解析では 1 通りの基礎梁端部に Z 方向強制変位 3.5m を与えている。

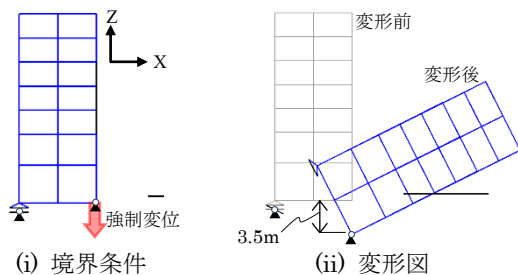


図-13 建物転倒時の沈下量

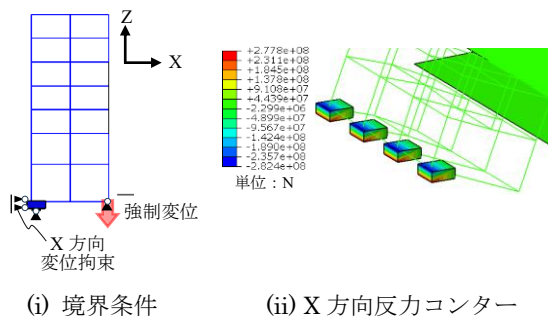


図-14 フーチングに生じる水平反力

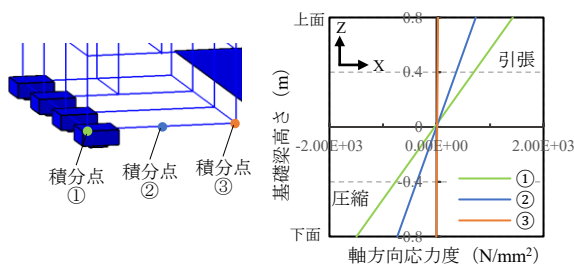


図-15 基礎梁コンクリート部に生じる軸方向応力度

図-14(i)に境界条件を、(ii)に X 方向反力コンターを示す。図より、フーチングの X 方向変位を拘束した面の upper 側に引張力が、下側に圧縮力が作用することがわかる。

図-15 に D 通りの基礎梁要素断面に生じる軸方向応力度の分布を積分点ごとに、コンクリート部のみ示している。図より、基礎梁上面に引張力、基礎梁下面に圧縮力が作用することがわかる。

3.5 軟弱地盤での基礎の挙動

対象建物の基礎は杭基礎であるが、建物の沈下程度から、杭が支持能力を失っていたものと推測される。そこで、本節では杭のない基礎形式でモデル化したときの、軟弱地盤上での基礎の挙動について検討する。

解析方法はモールクーロン塑性を用いた弾塑性接触解析である。図-16 に解析モデルを示す (i) は全景、(ii) は (i) 中の A 部分を拡大したものである。幅 240m、深さ 40m の地盤に高さ 1.6m の基礎を埋め込み、転倒時の地盤との接触を考慮するために、壁を取り付けている。地盤と基礎の力学的性質を表-2 と表-3 に示す。地盤は弾塑性要素、基礎は弾性要素、壁は剛体要素でモデル化している。要素はいずれも 4 節点平面ひずみ要素である。地盤の力学的性質は軟弱地盤を想定している。地盤の深さ方向の性質の違いはなく、均質であると仮定されている。地盤と基礎に重力加速度 9.81m/s² を作用させている。

図-16 (ii) に基礎の各要素の重量 w_n を示す。解析では基礎を構成する各要素の重量を変化させ、重心を基礎中心から基礎右端に移動させる。重心を移動させることで転倒挙動を再現している。図-17 に各要素の重量の変化を示す。縦軸は step1 の重量を基準にしたときの各ステップの重量比である。ステップ数は 14 である。

図-18 と図-19 に step1 と step14 の解析結果を示す。図より、基礎中心に重心がある場合は一様に沈下し、重心が右側に移動すると回転しながら沈下することがわかる。また、重心位置の移動により最大主ひずみが右側に集中し、すべり面が円弧状になることがわかる。

調査結果では右側フーチングが 3m 沈下し、6m 水平移

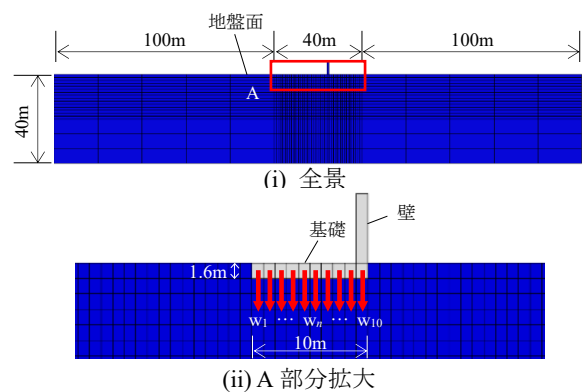


図-16 解析モデル

表-2 地盤の力学的特性

弾性係数	ポアソン比	単位体積質量
10000 kN/m ²	0.35	2 t/m ³
クーロン摩擦角	膨張角	粘着降伏応力
10°	0°	1 kN/m ²

表-3 基礎の力学的特性

弾性係数	ポアソン比
24000 MN/m ²	0.23

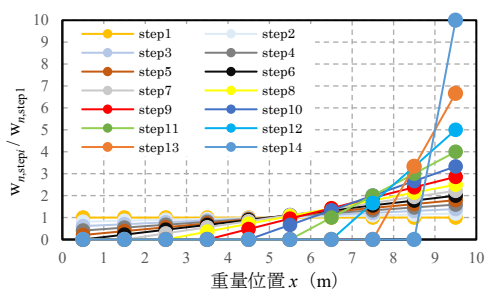
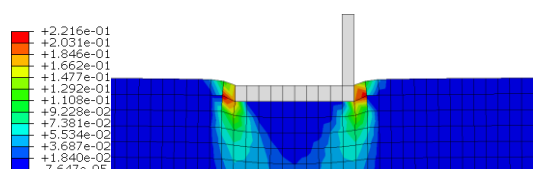
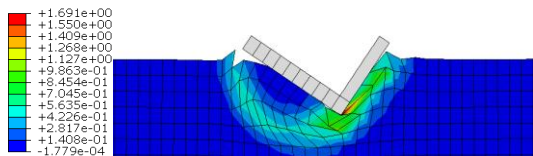


図-17 各基礎要素の重量の推移



面内最大主ひずみコンター

図-18 沈下挙動 (step1)



面内最大主ひずみコンター

図-19 沈下挙動 (step14)

動していることから、解析結果と実挙動に差異がある。差異の原因としては、実際の建物高さ方向の重心位置と解析での重心位置の違いによって、解析の転倒モーメントが小さくなるためである。

4. まとめ

本報では令和6年能登半島地震で被災したRC造建物の被害調査を報告し、被災建物を対象に実施した数値シミュレーション結果と調査結果との比較から、建物の転倒挙動と沈下挙動の推定、および基礎梁の損傷原因について検討した。本建物に関する実測データが少なく、実際とは異なる解析パラメーターを用いており、限られた範囲での解析結果になるが、その中で得られた結論を以下に示す。

- (1) 現地調査の結果より、1通りフーチングが鉛直方向に3m程沈下し、西側方向に6m程移動している。
- (2) 実建物の損傷程度と解析結果との比較から、建物転倒の原因は、東側基礎の沈下によって転倒モーメントが大きくなったためであると推測される。ただし、現状の調査結果のみでは沈下原因は特定できない。
- (3) 本研究の仮定を用いて解析すると、3通りのフーチングの水平方向変位が拘束されることにより、転倒時にフーチングに水平反力が作用する。また、D通り基礎梁の上面に引張力、下面に圧縮力が作用する。
- (4) 本研究の仮定を用いて解析すると、基礎の沈下によって地盤に円弧状のすべり面が形成される。

謝辞

解析データ作成にあたり、大分大学4年の伊藤蒼氏、太田健斗氏にご協力頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 気象庁：令和6年能登半島地震等の関連情報，https://www.jma.go.jp/jma/menu/20240101_noto_jishin.html（閲覧日：2024年12月7日）
- 2) Google Map：<https://www.google.co.jp/maps>（閲覧日：2024年12月7日）
- 3) 田中礼治，大芳賀義喜，熊谷元行，小澤昌広：1995年兵庫県南部地震における鉄筋のガス圧接継手の継手破断の被害原因に関する調査研究，日本建築学会構造系論文集，No.521，pp.95-102，1999.7
- 4) 島津勝，田中佑季，林美貴：平成28年熊本地震によるピロティ形式RC造建物の被害調査と解析的検討，日本コンクリート工学年次論文集，Vol.40，pp.1033-1038，2018.7
- 5) ABAQUS：<https://www.3ds.com>（閲覧日：2024年12月7日）
- 6) 宮川和明，木下陵二，藤永隆，大谷恭弘，三谷勲：ピン接合鋼管ブレースによるRC造骨組の外付け耐震補強法に関する実験的研究，日本建築学構造系論文集，No.572，pp.147-154，2003.10
- 7) 田村修次，新田怜利：輪島の7階建てRCビルはなぜ転倒したか？-パイルキャップと基礎梁の2次的支持力の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.397-398，2024.7
- 8) Björn Schümann：Modeling of soils as multiphase-materials with Abaqus，2010 SIMULIA Customer Conference，pp.1-15，2010