

研究助成実施報告書

助成実施年度	2021 年度
研究課題（タイトル）	活断層による地盤断層変位に対する都市・建物の被害メカニズムの解明
研究者名※	柏 尚稔
所属組織※	大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 准教授 (大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 教授)
研究種別	研究助成
研究分野	建築技術
助成金額	150 万円
発表論文等	

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

() は、報告書提出時所属先。

大林財団 2021 年度研究助成実施報告書

所属機関名 大阪大学大学院工学研究科
 申請者氏名 柏 尚稔

研究課題	活断層による地盤断層変位に対する都市・建物の被害メカニズムの解明
<p>(概要) ※最大 10 行まで</p> <p>直下に活断層を有する都市に対して国土強靱化を目指して、断層変位に対して安全な建物を設計する技術とともに災害レジリエンスを有する都市計画を実現するために、助成応募課題では、断層変位を受ける地盤・建物の重力場模型実験を実施して、断層変位が盤内を伝播して建物に影響を及ぼすメカニズムを明らかにする。</p> <p>活断層を有する大都市において建物の安全・安心を確保するためには、活断層による地震時の揺れだけではなく、地盤に生じる断層変位が建物に及ぼす影響についても建物の構造設計時に十分に考慮する必要がある。また、断層変位は想定活断層付近の特定の地域に集中して生じると考えられるため、都市計画上では、対象地域の断層変位のリスクを正確に把握しておくことが重要となる。すなわち、個々の建物に対する対策と地域単位のリスク評価の両輪で断層変位の問題に取り組む必要がある。</p>	

1. 研究の目的	(注) 必要なページ数をご使用ください。
<p>内陸地殻内を震源とする巨大地震が発生した場合、強い揺れに加えて、地表地震断層の出現に伴う大きな地盤変位により構造物は被害を受ける。例えば、1999 年の台湾集集大地震では、車籠埔断層の断層変位により地表に大きな上下のズレ (3~5m) が認められ、このズレに伴って建物被害が多発したことが報告されている¹⁾。また、同年のトルコ・コジャエリ地震においても建物や公共土木施設に被害が及んでおり、特に公共土木施設の被害の多くが断層変位によりもたらされたことがクローズアップされた²⁾。地表地震断層による被害は国内においても報告されており、兵庫県南部地震では 1m 前後のズレが生じた野島断層上の構造物に断層のズレによる被害が生じたことが確認されている³⁾。今後発生が懸念される上町断層帯地震をはじめとする大規模な内陸地殻内地震においても、地表地震断層の出現に伴う地盤変位により、建物が被害を受けることが予想され、耐震対策や被害予測の観点から、構造物が断層変位を受ける場合の現象や変形状況を把握することが必要であり、実被害の分析とともに、実験や解析によるデータの蓄積が重要となっている。</p> <p>断層変位が建物応答に及ぼす影響を検討するためには、断層近傍の地盤の変形状態を明らかにする必要がある。谷山他⁴⁾は砂質地盤を対象とした逆断層変位の模型実験および有限要素解析を行い、逆断層変位ではせん断帯が地盤の下部から上部にむかって生じ、地盤下部では集中していた変形が地盤上部では緩やかに広がることを明らかにした。加えて有限要素法解析により、せん断帯をジョイント要素でモデル化することで地盤の変形パターンを再現できることを示した。建物基礎構造に与える</p>	

影響に関する実験・解析的検討は、Anastasopoulou⁵⁾により行われており、box タイプの極めて剛性の高い基礎であれば断層変位に対する損傷を小さくできることや、構造物の荷重が大きい場合には、せん断帯が建物を避けるように発達する可能性があることについて検討している。文献5に示されるように、直接基礎では被害が軽微になる可能性も考えられるが、一方で、杭基礎の場合は被害が拡大する恐れがあることも指摘されている。川添他⁶⁾は断層変位を受ける壁杭-地盤系の二次元地盤を用いた模型実験を行い、すべり面が壁杭位置まで達した場合、すべり面上下の水平変位差により杭が変形することを確認している。また、白石他⁷⁾、断層変位が杭基礎に及ぼす影響について三次元 FEM 解析を用いて検討しており、すべり面が杭と交差していない場合でも、地盤変位が不均一であることから使用限界に達する杭応力が生じることを示している。

以上に述べたように地表地震断層が構造物に及ぼす影響を検討した例はいくつかあるものの、杭基礎に対する影響を検討した既往研究は多くはなく、特に3次元的地盤を用いての実験、解析はほとんどない。また、断層変位に対する杭基礎の抵抗メカニズム等についても不明瞭であるため、その把握が必要である。

以上の背景から、本研究では3次元的地盤を用いて、逆断層変位が円筒杭を跨ぐことを想定した模型実験を行い、杭が逆断層変位を受けた場合に生じる現象や応力について検討を行う。次に有限要素解析を用いた実験のシミュレーション解析を行い、杭基礎-断層変位系に関する有限要素法の有効性を示す。また有用性が示された解析モデルから、杭の抵抗メカニズムを明らかにする。

【参考文献】

- 1) 栗山利男, 荏本孝久, 望月利男: 1999年台湾集集大地震における建物被害に関する一考察, 総合都市研究, 第72号, 2000.
- 2) 能島暢呂: 1999年トルコ・コジャエリ地震の被害調査報告 Investigation of Damage Caused by the 1999Kocaeli Earthquake, Turkey 土木計画学シンポジウム「災害リスク研究の最前線と社会への提言」土木学会土木計画学研究委員会災害リスク研究小委員会, 2000. 7.
- 3) 辻本勝彦, 八尾眞太郎, 西田一彦, 楠見春重, 西形達明, 渡辺太郎, 杉井一繁, 松浦秀樹, 菅 将憲: 兵庫県南部地震 活断層周辺の構造物被害と今後の対策 (その2), 日本建築学会 隊解学術講演会梗概集, pp.89-90, 1995. 8.
- 4) 谷山尚, 渡辺啓行: 逆断層に伴う砂質表層地盤の変形に関する研究, 土木学会論文集 No.591/ I -43, 313-325, 1998, 4.
- 5) Ioannis Anastasopoulos, George Gazetas : Foundation-structure systems over a rupturing normal, Bull Earthquake Eng, 2007.
- 6) 川添千華, 山村彩華, 杉野未奈, 柏尚稔, 林康裕: 杭基礎に対する断層変位の影響評価に関する模型実験, 日本地震工学会論文集, 第18巻, 第一号, 2018.1
- 7) 白石彩華, 弾健太郎, 中嶋拓, 福本義之, 大住和正, 鈴木直子, 宮本裕司: 地震副断層による地盤変位を考慮した杭基礎設計法の提案と試設計, 日本建築学会技術報告集, 27(67), pp.1207-1212, 2021.10

2. 研究の経過

(注) 必要なページ数をご使用ください。

本研究の最終目的は、断層変位に対する都市防災対策の整備であり、断層変位の影響を受ける可能性の高い地域を抽出し、その地域に立地する個々の建物の設計的配慮の方法を確立することである。この目的を踏まえて、図 1 に、助成応募課題を含めた研究テーマ全体の具体的な検討手順を示す。なお、本研究では、大都市の事例として大阪市を取り上げ、対象の活断層として極大地震の発生が度々指摘されている大阪市直下の上町断層帯を設定する。

まず、重力場での模型実験およびそのシミュレーション解析を実施することにより、地震による断層変位に伴って生じる現象を把握するとともに、実験で見られたその現象を再現することができる解析手法を確立する(課題①)。次に、ボーリングデータに基づいて大阪市の表層地盤の特徴を整理するとともに、当該地盤と実物大の建物に対する数値解析(パラメトリックスタディを含む)を実施することにより、模型実験・解析の検討から得られた知見を実物大の問題に昇華する(課題②)。得られた知見に基づいて、断層変位に対する実用的な都市防災対策を検討する(課題③)。助成研究課題では課題①と課題②を実施する。

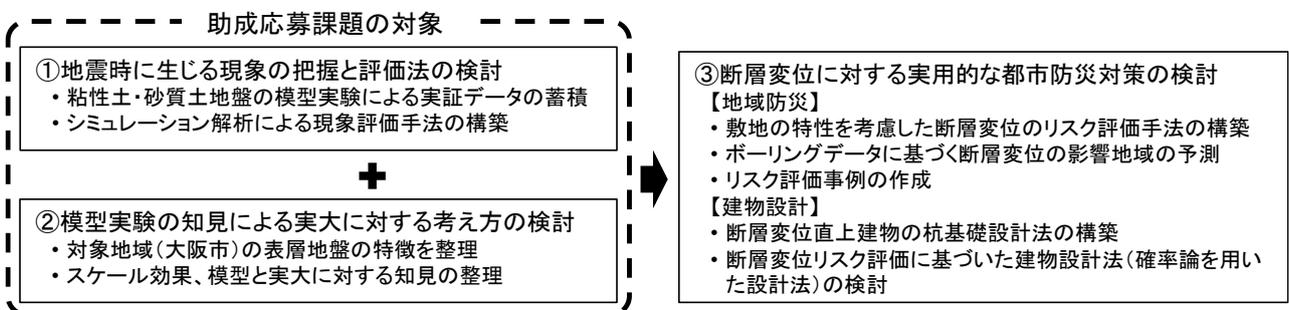


図1 地震による断層変位の影響を考慮した都市開発・建物設計手法構築のための具体的な検討手順

課題①の模型実験については、砂質土地盤と粘性土地盤の2種類の地盤に対して実施を試みた。ただし、断層変位発生装置(断層変位用ジャッキ)を設置した状態における粘性土の圧密を実現することができなかったため、粘性土地盤の実験は今後の課題として、本検討では、砂質土地盤のみの実験を実施した。模型実験のシミュレーション解析と課題②の実大スケールの解析的検討は模型実験と並行して実施した。

3. 研究の成果

(注) 必要なページ数をご使用ください。

【課題①の成果】

実験装置の概要を図 2 に示す。実験に用いた土槽は固定土槽であり、その寸法は、幅 900mm、奥行 200mm、高さ 500mm である。土槽側面には幅 900mm、高さ 370mm のアクリル製の窓があり、地盤変形の様子を観察できる。断層変位発生装置は、下部に幅 380mm、奥行 200mm、高さ 200mm の可動部分があり、その上に設置された厚さ 3mm、幅 300mm、高さ 350mm のステンレス製の L 型板が中央部と背面部の二カ所のアクチュエーターで持ち上げられることで断層変位を再現する。L 型板には水平力に対する板のたわみを防ぐため、三角形リブを二つ取り付けている。断層変位発生装置の最大変位量は 45° 方向に 30mm であり、変位速度は鉛直方向に 1mm/min である。実験ケースは、自由地盤の実験、杭頭を基礎梁で連結しない杭基礎の実験(杭基礎-梁なし)と連結した杭基礎の実験

験（杭基礎—梁あり）の計3ケースを行い、それぞれで地盤状態の変化と、杭応答を確認した。

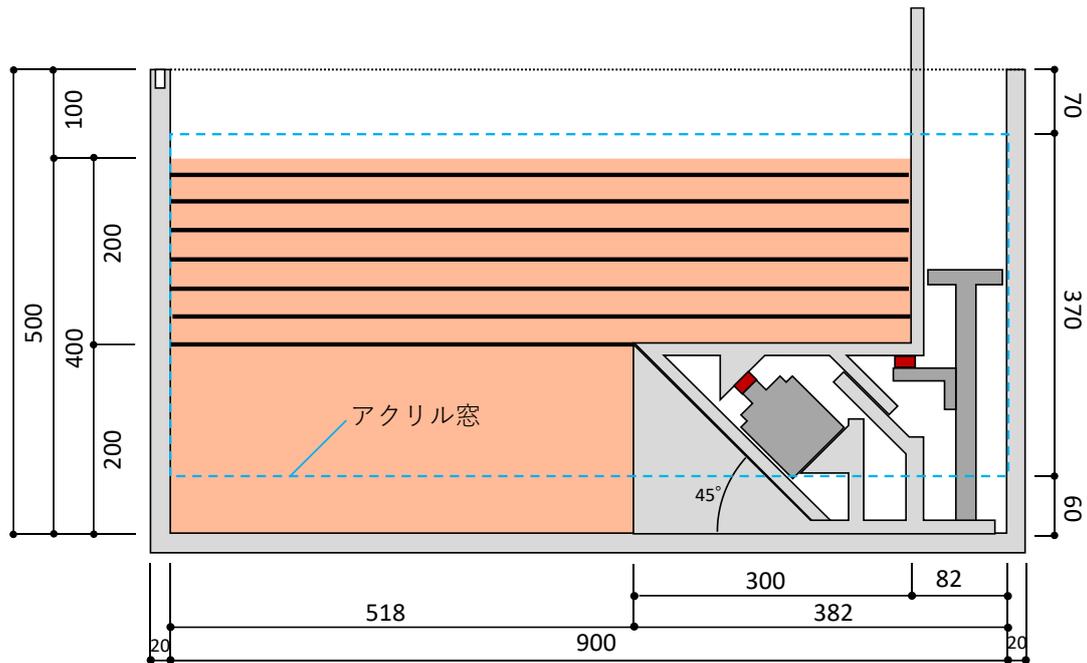


図2 実験装置の概要図

模型実験より得られた知見を以下に示す。

1. 逆断層変位を受ける地盤において、下盤側では、断層変位発生位置からの距離によって地盤の水平および鉛直変位は異なり、断層変位発生位置に近いほど地盤変位が大きくなる。
2. 地盤内に杭が存在する場合の断層変位に伴う地盤変位は、自由地盤のそれと比べて小さくなる。また、杭が地盤変位を受けることによって、杭には曲げモーメントと引張軸力が発生する。ただし、発生する杭応力の大きさは杭位置によって異なる。
3. 基礎梁がない場合に断層変位を受けて発生する杭応力は、断層変位発生位置に近い前方杭で大きく、後方杭で小さい。これは自由地盤における地盤変位が杭位置によって異なることに起因すると考えられる。基礎梁が存在する場合には、基礎梁による変位拘束効果により、前方杭および後方杭の杭頭が載荷され、特に後方杭の杭頭には大きな曲げモーメントが発生する。すなわち、杭頭を基礎梁で連結した場合には、断層変位に伴う地盤変位と杭頭拘束効果の両方が影響して、前方杭と後方杭の曲げモーメント分布は大きく異なる結果となる。
4. 鉛直方向の地盤変位を受けることによって杭に発生する引張軸力は、静止土圧と内部摩擦角から推定される杭周面抵抗力より大きい。さらに、引張軸力は杭位置によって異なるため、杭の引き抜き抵抗力次第では基礎の浮き上がりや傾斜につながる可能性がある。

シミュレーション解析は、杭基礎—梁なしのケースと杭基礎—梁ありのケースを対象として行った。解析コードは、三次元有限要素法の汎用プログラムであるLS-DYNAを用いる。実験における杭試験体の配置は対称となっており、解析時間の削減の観点から、対象性を利用して解析範囲は実験模型の半分とした。図3に杭基礎—梁なしのケースについて解析モデルの全体を示す。解析モデルの寸法は図に示す通りである。杭は杭径 $D=12\text{mm}$ 、長さ 430mm のアクリル製の円筒杭であり、杭頭は地表面

から 30mm 突出させている。また、断層発生位置から杭までの距離は水平に 70mm であり、杭間の距離は 150mm である。なお、本解析では、断層に近い杭を前方杭、後方杭を後方杭と称することとする。層地盤の境界条件は、地盤側面を鉛直ローラー条件とし、地盤底面を水平ローラー条件としている。断層変位は地盤右側 300mm の範囲に強制変位を与えることで模擬する。

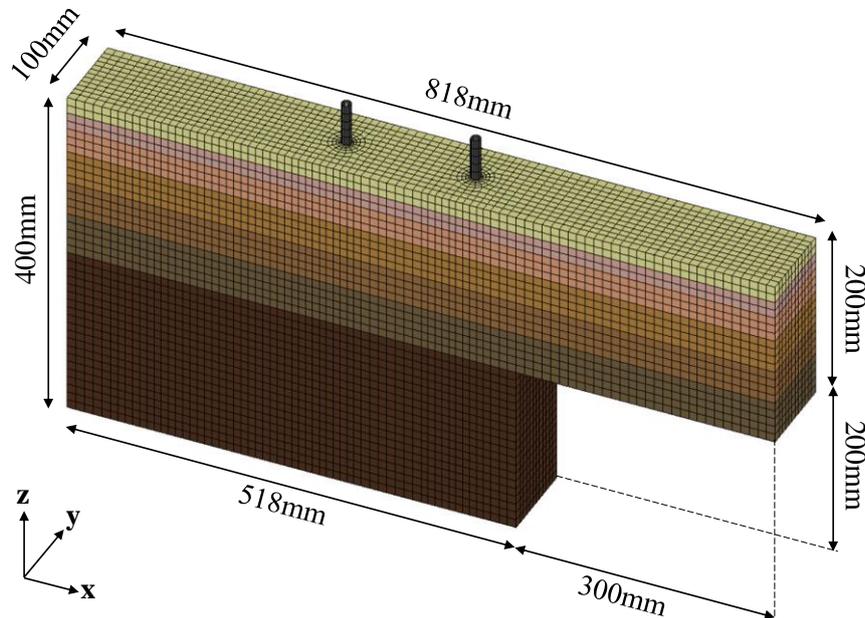


図3 解析モデルの概要図

シミュレーション解析より得られた知見を以下に示す。

1. 解析結果における自由地盤の鉛直および水平変位分布は実験結果のそれと良好に対応する。さらに、杭が存在する場合についても、解析結果における地盤の変位分布と杭応力は実験結果のそれと良好に対応する。よって、逆断層変位を受ける下盤側の杭基礎建物のシミュレーションに対して、三次元有限要素法は有用である。
2. 実験で得られた杭の曲げモーメント分布に対して、三次元有限要素法に基づく力学的考察を行い、断層変位に伴う地盤変位と基礎梁の変位拘束効果の重ね合わせによって応力が発生して、実験で得られた曲げモーメントの分布形状になることを示した。
3. 基礎梁がない場合の杭に発生する最大曲げモーメントは、断層変位発生位置と杭位置の距離が増大すると、線形に減少する。また、断層からの距離が同じ位置の杭であっても、前方杭となる場合の最大曲げモーメントは後方杭となる場合のそれより大きくなり、前方杭と後方杭の曲げモーメント分布も大きく異なる。

【課題②の成果】

実大スケールの解析的検討では、杭基礎建物の近傍で 60 度の逆断層変位が生じたと仮定し、3次元有限要素法による解析を行う。解析コードは LS-DYNA を用いる。図 4 に対象建物および解析領域を示す。検討対象とする建物は杭支持された 6 階建ての RC 壁式ラーメン構造の集合住宅である。敷地は、深さ 15000mm の表層地盤と厚さ 4500mm の支持層の 2 層からなる砂主体の仮想的な敷地とする。杭は、杭長 19.5m の場所打ちコンクリート杭 ($F_c = 32$ 、鉄筋 SD390、鉄筋比 2.1%_21-D38)

とする。地表から深さ 19.5m において、杭中心位置から 6000mm 離れた位置に建物長辺と並行な断層が存在すると仮定する。解析領域は杭を含む建物短辺方向の一構面とする。

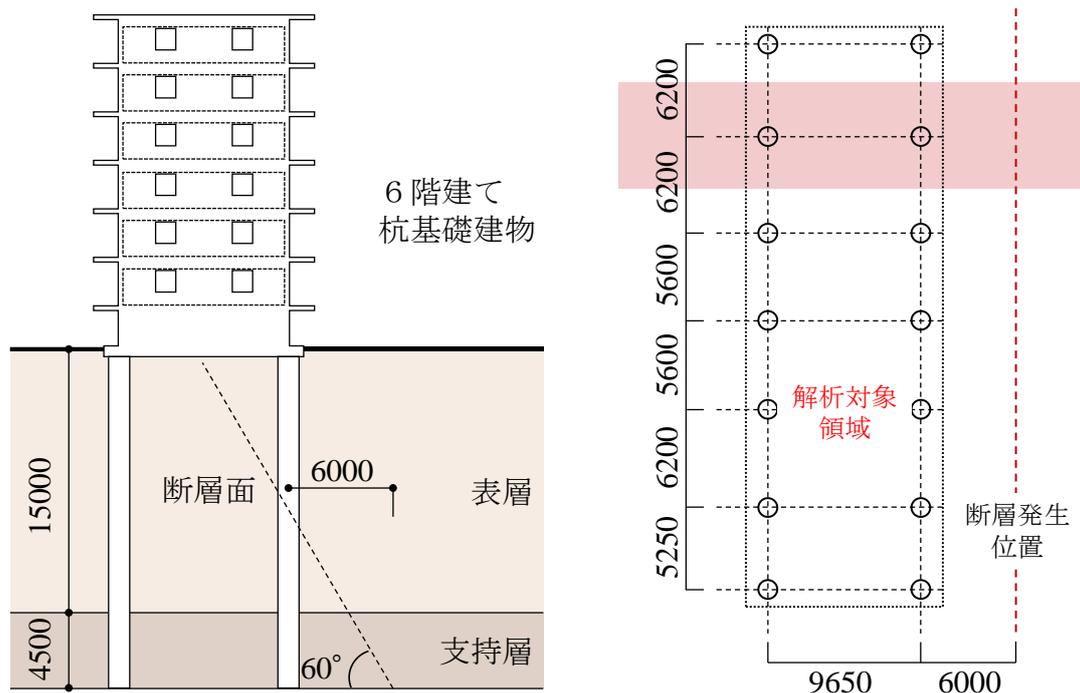


図 4 対象建物および解析領域の概要

実大スケールの解析的検討より得られた知見を以下に示す。

1. 模型実験の結果と同様に、実大の杭基礎建物が断層変位を受ける場合、杭には曲げモーメントと引張軸力が発生する。また、基礎梁を有する杭基礎には、断層変位による地盤変位と基礎梁の変位拘束効果の影響を同時に受ける曲げモーメント分布が発生する。ただし、杭先端の境界条件によっては、杭頭の曲げモーメントや杭先端の引張軸力は、比較的小さい断層変位量においても終局に達する可能性がある。
2. 杭先端の上下変位を許容する条件での解析により、断層変位に伴って発生する杭の引張軸力によって、杭の引き抜きおよびそれに伴う基礎梁の回転傾斜が生じる可能性がある。
3. 杭周面抵抗力が異なると、断層変位による地盤の相当塑性ひずみの発生位置が変化して、杭に発生する杭応力も変化する。また、杭周面抵抗力が小さい場合でも、杭の引き抜きや基礎の回転傾斜が生じる可能性がある。

4. 今後の課題

(注) 必要なページ数をご使用ください。

本研究課題により、砂質土地盤において杭基礎建物が断層変位を受けた場合の地震時挙動を明らかにすることができた。ただし、粘性土地盤模型の製作は極めて困難であったため、粘性土に対する知見を蓄積することができなかった。粘性土地盤の製作方法を再検討し、実験の実施を実現することにより、大阪市域における防災対策に資する知見を得ることを今後の課題とする。