

浅い基礎を有する隣接構造物の液状化による不同沈下挙動

國澤瑞樹¹・飛田哲男²

Differential Settlement Behavior of Adjacent Structures with Shallow Foundations during Liquefaction

Mizuki KUNISAWA¹ and Tetsuo TOBITA²

Abstract

On February 6, 2023, M_w 7.8 and M_w 7.5 earthquakes occurred in the southeastern part of Turkey. In Golbasi, serious damages such as settlements and tilting of buildings due to liquefaction were observed. Differential settlement of buildings caused by liquefaction has been reported in past earthquakes, with the impact of loads from adjacent buildings being noted. This study examines the differential settlement behavior of adjacent buildings with shallow foundations in Golbasi. The variations in foundation embedment depth and weight of the buildings were also investigated. The results showed that closer buildings experience more internal settlement due to stress interference, leading to inward tilting. As the distance between the two buildings increases, the mutual interference decreases, resulting in a smaller tilting angle.

キーワード：液状化, トルコ-シリア地震, 隣接構造物, 地盤内応力, 不同沈下

Key words: liquefaction, Turkey-Syria earthquake, adjacent structures, stress interference, differential settlement

1. はじめに

2023年2月6日, トルコ南東部において M_w 7.8, M_w 7.5の大地震が発生した¹⁾。これらの地震によって, 50万戸以上の建物が倒壊し, 5万人以上の死者が確認されている²⁾。トルコでは, 1939年のエルジンジャン地震¹⁾以来最大規模の地震であった。東アナトリア断層上に位置する Golbasi では, 液

状化によって建物が沈下や傾斜するといった深刻な被害が発生した(写真1)。Golbasi の建物は浅い基礎のものが多く, それが液状化による被害拡大に繋がった要因の一つではないかと考えられる。

このような液状化による建物の不同沈下は2000年の鳥取県西部地震や2011年の東北地方太平洋沖地震など過去の地震においても複数報告されてい

¹ 関西大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering, Kansai University

² 関西大学環境都市工学部
The Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai University



写真1 傾斜した家屋 (Golbasi Turkey, Lat: 37.7890, Long: 37.64313)

る³⁻⁵⁾。住宅が傾くと、戸の開け閉めの不具合、隙間風の発生、傾斜によるものの転がりといった障害だけでなく、めまいや吐き気など個人差はあるが、健康障害を生じることもある⁶⁻⁸⁾。液状化による不同沈下で生じる住宅の傾斜は、健康障害を引き起こすとともに住む場所を失いうる深刻な問題である。

安田ら⁹⁾の研究によると、あまり偏心していない住宅が傾く要因の一つとして隣接する構造物の荷重の相互作用に着目し、2棟の家屋間距離が近いと、お互いの荷重が重なり合って偏心荷重のようになり内側に傾斜するのではないかと考えられている。2棟の家屋(建物幅よりも高さが小さい)模型を用いた振動台実験が実施されており、2棟の家屋間距離が近いと内側に傾斜し、少し離れると仰け反るようになり、さらに離れると傾斜しなくなったと報告されている。液状化による隣接建物の不同沈下については、2棟の離隔に加え、構造物の荷重や建物の幅と高さの関係も影響すると考えられる。

本研究では、Golbasiを対象とした隣接した建物(3~4階程度)のパラメトリック解析を行うことにより、液状化による隣接した建物の不同沈下挙動について考察し、その傾向について明らかにする。2棟の建物間の離隔変化に加え、基礎の

深さ、建物の荷重の変化についても考慮する。また、著者らは2023年10月13日~23日に、トルコ(Golbasi)での現地調査を実施した。本研究では、今回の現地調査によって得られた現地の様子や地盤に関するデータを参考とする。

2. 地盤モデル

2.1. Golbasiの地盤

Golbasiは第四期の堆積物によって形成された沖積平野が広がっており、表層地盤は砂質シルト堆積物からなっている¹⁰⁾。Golbasiでは、簡易動的コーン貫入試験(Portable Dynamic Cone Penetration Test, PDCPT)と、試料採取を実施した(図1)。PDCPTのN値換算データを図2に示す。換算については、新任¹¹⁾により提案された式(1)を用いた。

$$N_d = 1.5N \quad (1)$$

深さ1m未満においては、地盤表層は人工的に締め固められておりN値が10を超えている。しかし、約1m以深においてN値は5程度であり比較的軟らかい地盤からなっていると考えられる。4mを越える深さではN値は20を超える結果となっていた。

水道管の工事を行っていたトレンチで試料を採



図1 PDCPT実施地点および試料採取箇所位置図

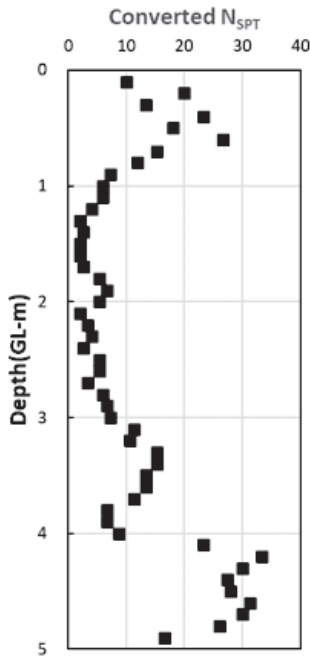


図2 Golbasi_PDCPT (Lat: 37.78917, Long: 37.64111)



写真2 試料を採取したトレンチ (Golbasi, Lat: 37.7856444, Long: 37.638825)

取した。トレンチの様子を写真2に示す。iPhone LiDARを用いて採取試料の体積推定を行った。推定された体積は1,110.67 cm³であり採取試料の湿潤重量は1,764.51 gであったため、現場密度は1.589 Mg/m³ (相対密度, $D_r=109.1\%$)と推定される。また、乾燥重量は1620.3 gであり、乾燥密度は1.459 g/cm³, 含水比8.9%であった。

採取試料を用いて粒度試験と繰返し非排水三軸試験を実施した。一連の試験は、関西地盤環境研究センターにて実施した。非排水三軸試験における供試体の含水比は現地の含水比8.9%とし、供試体密度を上記の現場密度と等しくすることにより、現地を再現した再構成供試体を用いた。これらにより得られた粒径加積曲線と液状化抵抗曲線

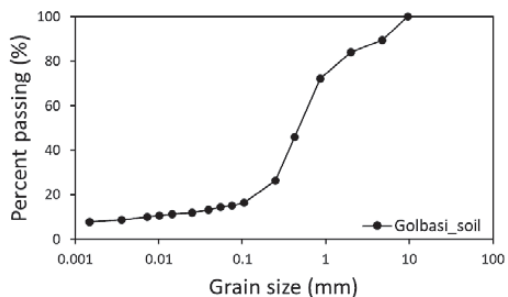


図3 粒径加積曲線

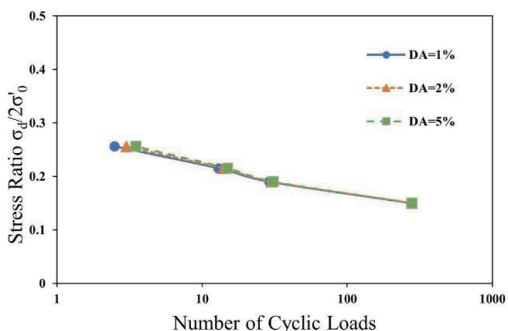


図4 液状化抵抗曲線

を図3、図4に示す。

粒度試験より、細粒分含有率は $F_c = 15.2\%$ であり、シルトや粘土を含んでいることが確認された。繰返し非排水三軸試験においては、供試体寸法は直径 5 cm、高さ 10 cm であり、供試体の密度は現場密度である 1.58 Mg/m^3 である。繰返し応力振幅比をそれぞれ、0.150、0.190、0.215、0.256 として試験は 4 回行った。液状化強度比は $R_{L20} = 0.205$ であり、日本海中部地震 (1983) で深刻な液状化被害が確認された秋田県大浜¹²⁾ と同程度の液状化強度比であった。

2.2. 解析モデル

本研究では、多重せん断ばねモデルを構成則とする有効応力解析法 FLIP¹³⁻¹⁵⁾ を用いて解析を行った。以上で得られた Golbasi の土の物性値を参考として、その他の地盤に関する物性値の決定には FLIPCSIM (ver4.0) のパラメータ簡易設定法 (森田ら 1997, 三上ら 2011)^{16,17)} を使用し、解析に必

表1 地盤パラメータ

			単位
質量密度	ρ_t	1.589	Mg/m^3
間隙率	n	0.470	
平均有効拘束圧	p_a	73.5	kN/m^2
初期せん断剛性	G_{ma}	38231	kN/m^2
せん断抵抗角	ϕ_f	33.0	度
体積弾性係数	K_{La}	99700	kN/m^2
最大減衰定数	H_{maz}	0.24	

表2 建物 (線形平面要素) に対するモデルパラメータ

			単位
質量密度	ρ_t	0.7	Mg/m^3
ヤング率	E	$8.1\text{E}+07$	kN/m^2
ポアソン比	ν	0.3	

表3 液状化パラメータ

ϕ_p	28.0度	q_1	1.0
ε_d^{cm}	0.4	q_2	1.0
r_{cd}^c	1.5	q_4	1.0
r_{cd}	1.0	S_1	0.005
r_k	0.2	c_1	2.02
l_k	2.0	q_{ns}	0

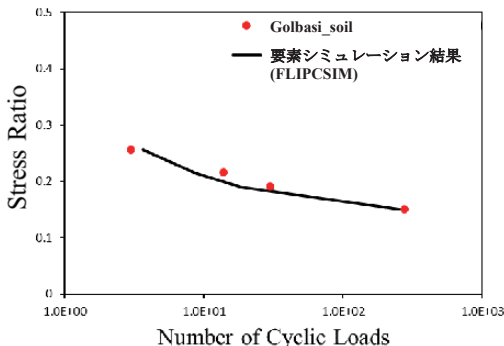


図5 Golbasi で採取した土の液状化抵抗曲線

要な地盤および建物の物性値、液状化パラメータを設定した。パラメータ推定の値として、N 値は 5、細粒分含有率 $F_c = 15.2\%$ を用いた。表 1 に地盤の物性値、表 2 に建物の物性値、表 3 に液状化パラメータ、図 5 に液状化強度曲線を示す。本解析における建物は、Golbasi で見られた 3 ~ 4 階建ての建物を設定している。そのため、建物の質

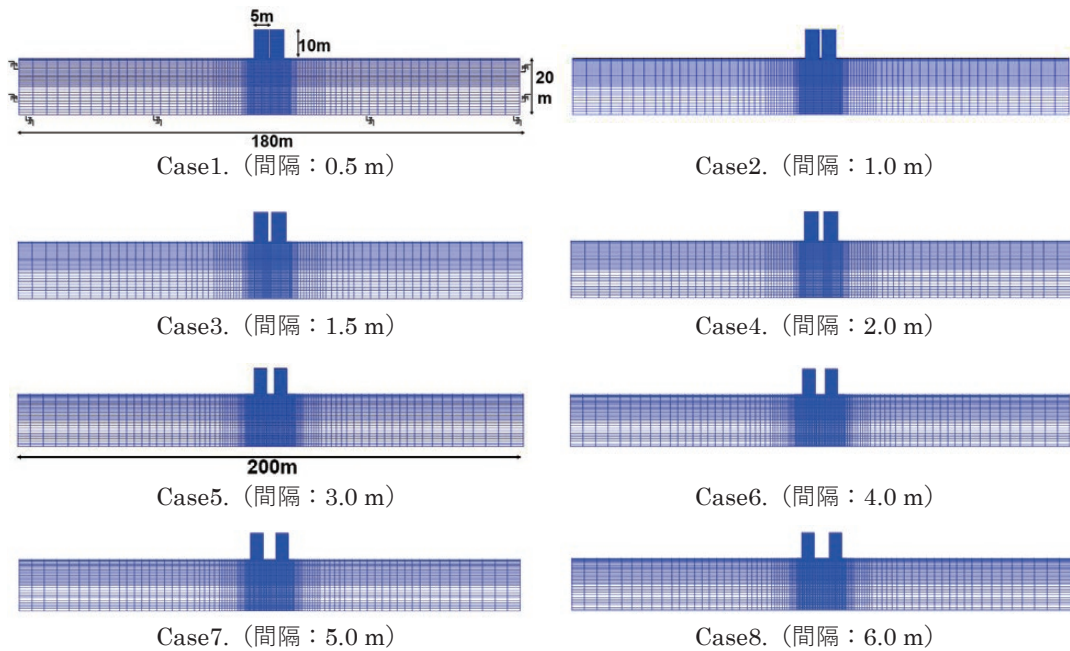


図6 2棟の離隔を変化させた解析モデルメッシュ図

量密度は一般的なコンクリート造りの家屋（1～2階建）の基礎底盤単位面積にかかる質量がおよそ2.8～3.0 Mg/m²であることから、本解析で対象とする建物の接地圧を70 kN/m²とした。また、近接した建物の液状化時の不同沈下挙動に対して建物の荷重が与える影響を検討するため、建物の接地圧を50～180 kN/m²の範囲で変化させて解析した。

2棟の建物の離隔を変化させた解析モデルのメッシュ図を図6に示す。地下水位は、Golbasiでの調査報告に基づきGL-1.0mとして設定した。液状化層厚は现阶段では不明のため20mとし、底面、側面ともに粘性境界としている。建物に関しては、幅5m、高さ10mのものが2棟隣接しているモデルとしている。Golbasiで見られた液状化により不同沈下を生じた3～4階建ての浅い基礎を有する建物を参考としている。なお、建物の重心は建物の中心になるように設定しており偏心はしていない。近接した2棟間の距離の変化と傾斜角の関係についての考察を行うモデルでは2棟間の距離以外は同一条件としてモデルを作成した。

2棟間の距離が0.5m、1.0m、1.5m、2.0mのものは地盤モデルの幅を180mとし節点数は6201、要素数は10368とした。一方、2棟間距離が3.0m、4.0m、5.0m、6.0mのものは地盤モデル幅を200mとし節点数は6795、要素数は11520とした。本研究では、以上の8ケースと、2棟間距離が1.0mであるCase2の場合において、地盤面から基礎底面までの深さ（以降、根入れ深さとする）を0.5mから3.0mまで変化させた6ケース、建物の見かけの密度を変化させた6ケースの解析を行った。建物は地盤モデルの中央部分に配置し、建物モデルと地盤モデルの結合を行っているため、滑動などは発生しない。

3. 地震応答解析

3.1. 入力地震動

Golbasiでは、2023年2月6日の地震動が記録されていなかった。そのため、入力地震動にはGolbasiから南西に約45km離れたPazarcikで観測されたデータ(図7)¹⁸⁾を用いた。この地震動は最大加速度21.7 m/s²のEW成分である。

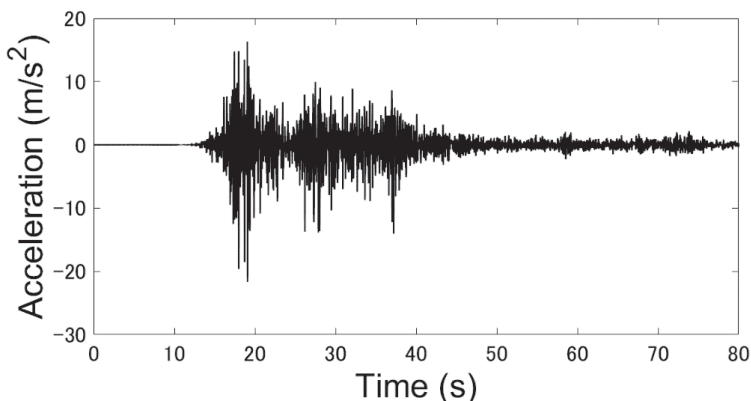


図7 入力加速度時刻歴 観測点：Pazarcik (TK/4614)¹⁷⁾

3. 2. 2 棟間の離隔変化解析の初期応力状態

2 棟の建物の離隔を変化させた解析における初期鉛直応力状態図を図 8 に示す。カラーコンター

は鉛直応力であり、最大値は200 kN/m²、最小値は 0 kN/m²である。カラーコンターが黄色の約 140 kN/m²において各離隔での比較を行うと、

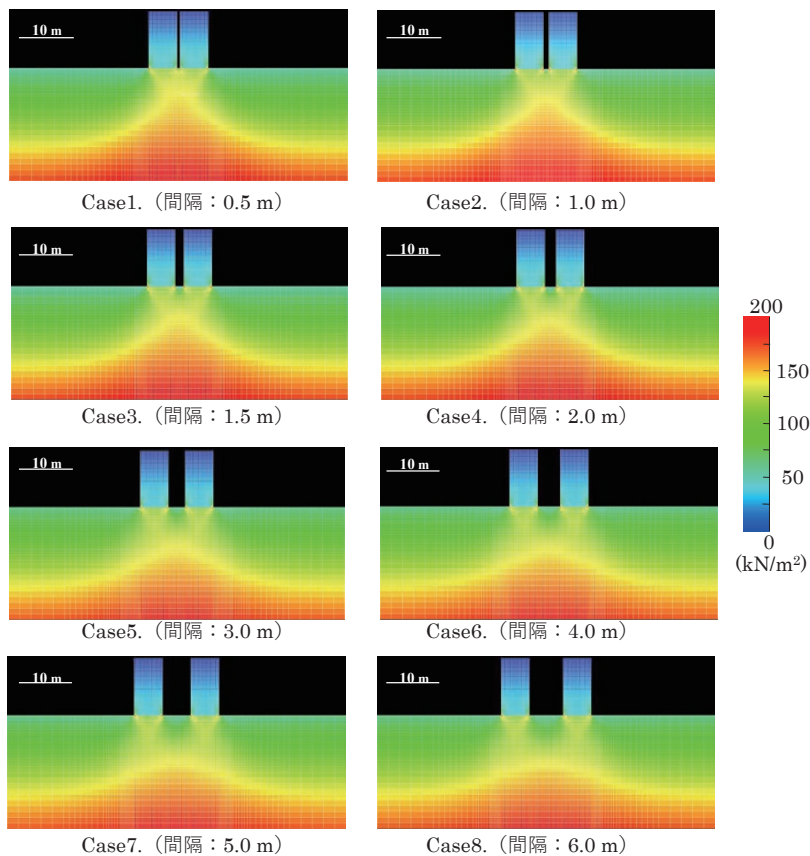


図8 解析開始時の初期鉛直応力状態 (自重解析結果図)

Case 1 では 2 棟それぞれの建物の荷重による鉛直応力が地盤内で干渉し、一つのようなふるまいとなっているが、2 棟間の離隔が大きくなった Case 8 では 2 棟の建物直下でそれぞれ独立した鉛直応力状態となっている。このように、2 棟の建物直下周辺の鉛直応力が約 140 kN/m^2 の範囲は、2 棟の離隔により変化しており、それぞれの離隔での干渉度合 (黄色コンターの配位変化) が見られた。

このような隣接した建物の荷重による地盤内での応力の相互作用が、液状化が発生したときお互いの方向に不同沈下を生じる要因となっているのではないかと考えられる。

3.3. 2 棟間の離隔変化による影響

2 棟の建物が隣接する場合について解析した結果を全ケースまとめて図 9 に示す。カラーコン

ターは過剰間隙水圧比を示しており、最大値は 0.95、最小値は 0 に対応する。Golbasi では、様々な建物間隔が見られたが、2.0~3.0 m 程度の離隔で 4~5 度程度の大きな傾斜被害も確認された。いずれの解析ケースにおいても建物の直下では建物の荷重による拘束圧の影響で過剰間隙水圧比は小さくなっている。また、2 棟の建物の間の部分においても過剰間隙水圧比が小さくなっている。2 棟の離隔が小さい Case 1 では、2 棟の間の部分において深さ 5 m あたりで過剰間隙水圧比が 0~0.20 程度である。離隔が大きくなった Case 8 では、2 棟の間の深さ 5 m あたりの過剰間隙水圧比は 0.20~0.40 程度となっており、2 棟の建物の上載圧の相互干渉の変化が確認できる。間隔が 2.0 m 程度まででは、地盤内応力の相互干渉が明瞭であるのに対して、間隔が 3.0 m 以上となると、

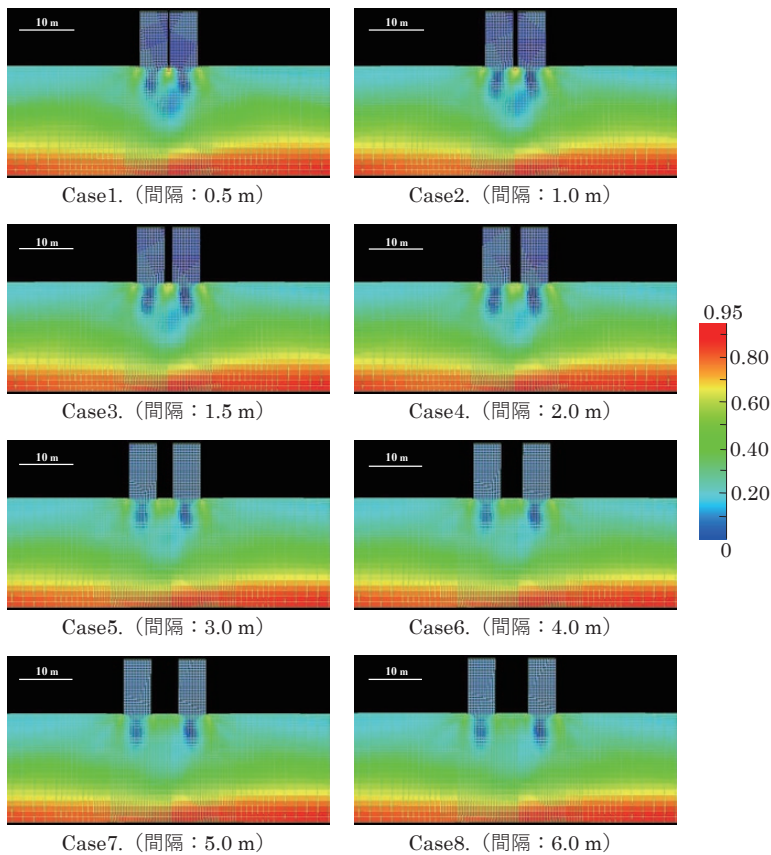


図 9 解析終了時の過剰間隙水圧比 (コンター) と変形図

応力干渉は存在しているものの小さくなっていく様子が確認できる。間隔が6.0 m の Case 8 では、過剰間隙水圧比が小さい部分はほとんど建物の直下であるが、完全にそれぞれの建物の荷重による応力が独立しているとはいえず僅かな応力干渉が見られる。

2 棟の建物の間隔を0.5~6.0 m と変化させてそれぞれの傾斜角を求めた。加振によって液状化が発生した直後から建物は徐々に沈下しているの、本研究では入力地震動が終了する80秒後の沈下量を用いて比較を行った。以降の解析終了時の変形図や、沈下量および傾斜角の値はすべて地震動が終了した80秒の時点の結果を用いている。2 棟の建物が傾くことを示す指標として建物の傾斜角を用いることとしているが、これは2 棟が内側に傾斜したときの角度をプラスとして、建物の左右の端の沈下量の差を用いることで傾斜角を求めた。また、左右の建物をそれぞれ Left, Right としている。Left および Right の平均値を Average としている。このようにして求めた2 棟間距離 (Interval) と傾斜角 (Inclination angle) の関係を図10に示す。傾斜角度の目安として、図10には目眩や吐き気がして家の中で生活できなくなるといった健康被害を生じ始める⁹⁾とされている1/100 (0.57度) の傾斜角をプロットした。また、図11に2 棟間距離と沈下量の関係を示す。不同沈下を生じているため建物の沈下は一様ではない。したがって、建物の左右の端の沈下量の平均を用いることで建物の沈下量を評価した。

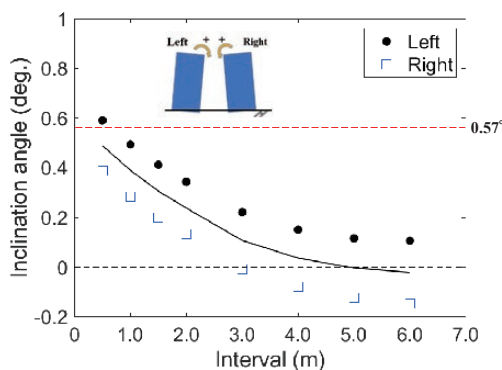


図10 2 棟間距離と傾斜角の関係

2 棟の距離が近い0.5 m や1.0 m においては比較的大きく傾斜した。2 棟間の離隔が大きくなるにつれて建物の傾斜も小さくなり、3.0 m 程離れた場合では右側の建物の傾斜角はほとんど0度となった。2 棟間距離が3.0 m を越えると、建物の傾斜角の減少は僅かなものとなり、右側の建物が外側に傾いていき、2 棟の建物が同じように右側に傾いた。1 棟のみの解析でも右側に傾くことが確認されており、地震動の影響によるものと考えられる。このことから本解析では3.0 m よりも近い場合に、隣接建物の応力干渉による影響が卓越したと考えられる。したがって、近接する2 棟の建物の距離が近いほど内側に傾斜する傾向が確認できた。左右の建物の傾斜角の平均値は、2 棟の離隔に伴い0度に収束していく様子がうかがえる。2 棟間距離が0.5 m の Case 1 では左側の建物が1/100を超える傾斜角を示す結果となった。隣接した建物の距離が近づくことで、健康被害を生じ得る傾斜角になりやすくなると思われる。

2 棟間距離と沈下量の関係では、建物の離隔が2.0 m から3.0 m に変化する際に0.05 m 程度の差異が見られた。離隔が2.0 m まででは沈下量は0.23 m 程度であるのに対し、離隔が3.0 m 以上では0.18 m 程度の沈下量となった。図8の地盤内鉛直応力図や図9の解析終了時の過剰間隙水圧比から、離隔が2.0 m までと3.0 m 以上の場合を比較すると、離隔が2.0 m までの方が地盤内での応力干渉がより顕著になっていることが確認された。近接した建物の荷重による地盤内の応力干渉は沈

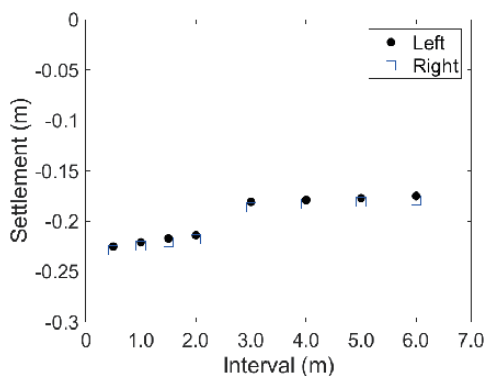


図11 2 棟間距離と沈下量の関係

下量にも影響を与えており、一定の離隔（本研究では2.0 m）より近くなると干渉が強まることで沈下量の増加に寄与していると考えられる。

液状化が発生すると、地盤が液体状になることにより支持力が失われ、その上にある構造物が沈下する。建物自体に偏心がない1棟の建物を考えると、その左右の下端に生じる地盤内応力は等しく、一様な地盤であれば建物の中心地点から左右対称な地盤内応力となる。一方、近接した2棟の建物の場合では、建物の荷重による応力は地盤内において重複している部分（すなわち応力干渉）が発生し、2棟の建物の距離が近いほど重複する荷重は大きくなる。そのため、それぞれの建物の左右の端に作用する荷重は同じであるが、地盤内応力については片方の建物の中心地点から見ると左右対称ではなく、隣り合った建物が存在する側の方が大きな値となる。このような近接した2棟の建物の荷重による応力の地盤内における干渉がお互いが引き込まれるように内側に傾斜する要因となっていると考えられる（図12）。

本解析モデルは、2棟の建物は同じモデルであり地盤モデルの中央部分に配置しているため左右

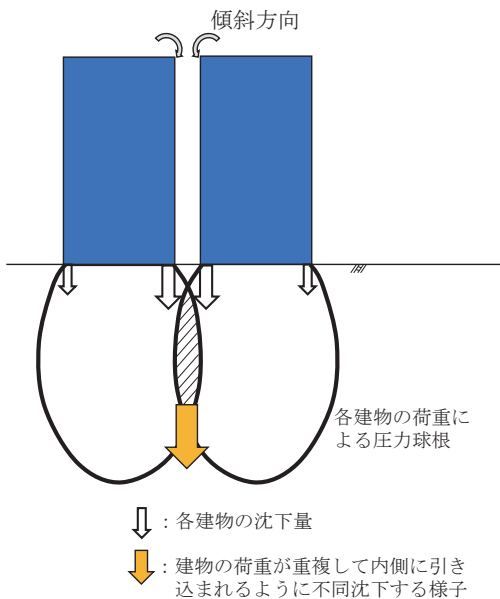


図12 近接する2棟の建物の不同沈下模式図（斜線部は建物の荷重による応力の重複を示す）

対称である。しかしながら、2棟間距離と傾斜角の関係では左右の建物の傾斜角は同じ値ではなく左側の建物の方が右側の建物よりも約0.2度大きく傾斜する結果となっている。これは、入力地震動に用いた Pazarcik で観測された地震動の影響によるものと考えられる。Pazarcik で観測された地震動を反転させたものを入力地震動として同解析を行うと、2棟間距離と傾斜角の関係は図10が反転したもの、つまり左右の建物の傾斜角が入れ替わった結果となった。

3.4. 根入れ深さの変化による影響

Golbasi において建物の根入れ深さは、およそ1.0~2.0 m 程度であった。本解析では根入れ深さを0~3.0 m として検討する。2棟の建物の離隔が1.0 m の場合の根入れ深さと沈下量の関係を図13、根入れ深さと傾斜角の関係を図14に示す。傾

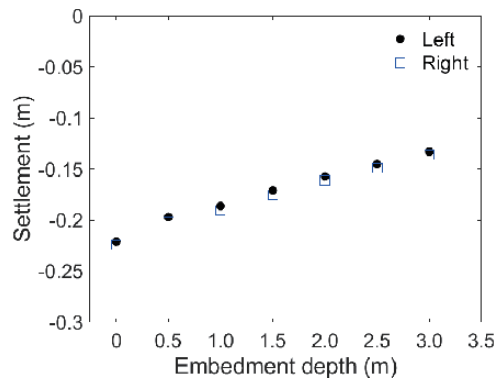


図13 根入れ深さと沈下量の関係

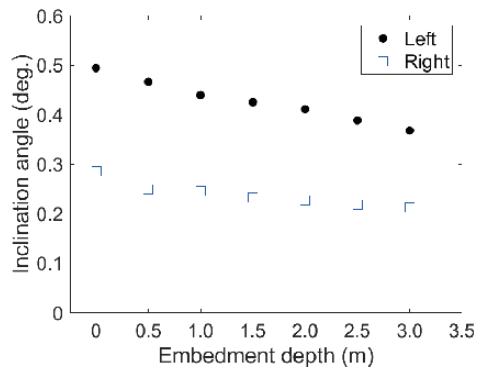


図14 根入れ深さと傾斜角の関係

斜角や沈下量に関しては、2棟間距離と傾斜角の関係および2棟間距離と沈下量の関係のときと同様の方法で求めた。

根入れ深さと沈下量の関係についてみると、根入れ深さが増加するにつれて建物の沈下量も小さくなる傾向が見られた。根入れ深さの増加によって、土と接する部分の周面摩擦力が増加し支持力が向上したため沈下量が減少したと考えられる。一方、根入れ深さと傾斜角の関係についてみると、根入れ深さが0 mから3.0 mへと増加しても、約0.1度程度の小さな変化であった。このことから、根入れ深さと建物の傾斜角との相関は小さいものと推察されるため、建物の根入れによる傾きの低減効果は小さいといえる。

一方、建物の傾斜について考察すると、本解析

モデルでは、基礎の幅を上部構造物の幅と同じ5.0 mとして設定しているため、建物の荷重による地盤内応力は基礎底面において根入れ深さが0 mのときと同様の変化となり、相互干渉による不同沈下が生じることで内側に傾斜する結果となったと考えられる。

3. 5. 建物の接地圧変化による影響

2棟の建物の離隔が1.0 mの場合において、建物の接地圧と沈下量を図15、建物の接地圧と傾斜角の関係を図16に示す。建物の重量、すなわち建物の接地圧が増加するにしたがい沈下量が増加した。同様に、建物の傾斜角も建物の接地圧増加にともない大きくなった。沈下量、傾斜角ともに線形的な変化であり、50 kN/m²から

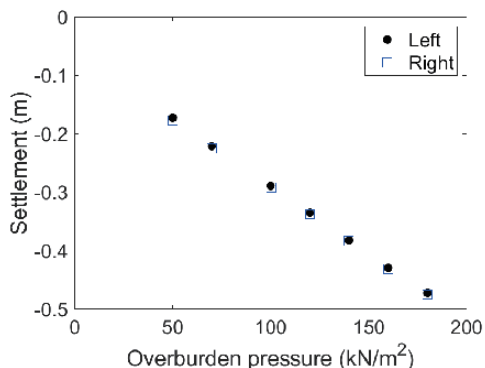


図15 建物の接地圧と沈下量の関係

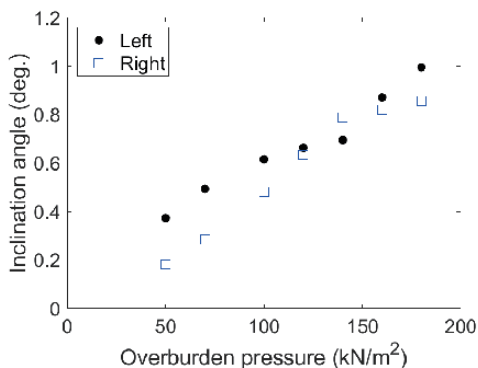


図16 建物の接地圧と傾斜角の関係

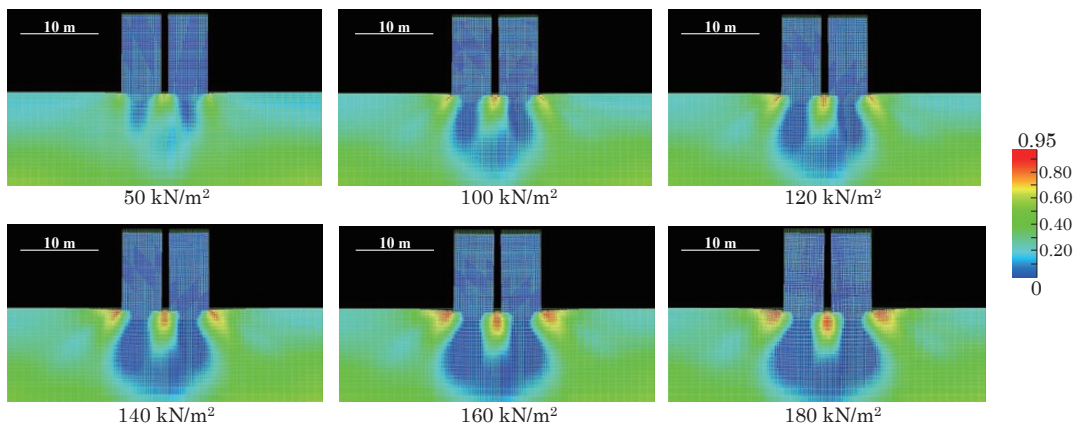


図17 建物の接地圧を変化させた場合の解析終了時の過剰間隙水圧比(コンター)と変形図

180 kN/m²への接地圧の増加により沈下量は約 0.3 m、傾斜角は左右の建物の平均値で約 0.6 度の変化であった。接地圧が 100 kN/m²を超えると、傾斜角は健康被害を生じ得る角度よりも大きい 0.6 度以上となった。図 17 に建物の接地圧を 50 kN/m² から 180 kN/m² まで変化させた場合の解析終了時の過剰間隙水圧比 (コンター) と変形図を示す。それぞれの接地圧において、過剰間隙水圧比が 0 ~ 0.20 の範囲 (図 17 の地盤内での青色の部分) に着目すると、接地圧増加に伴い過剰間隙水圧比 0 ~ 0.20 の範囲も増加している。建物の荷重による拘束圧の影響により過剰間隙水圧比が小さくなっていると考えられるため、建物の重量が増加すると、地盤内応力も大きくなり、結果として沈下量が増加する。また、2 棟の建物の荷重による地盤内応力の相互作用が大きくなることでそれぞれの建物の傾斜角も大きくなったと考えられる。地盤内における応力の伝播は建物の荷重により変化することから、建物の重量は応力干渉による不同沈下に影響を与える要因の一つであると推察される。

4. 結論

本研究では、2023 年 2 月 6 日に発生したトルコ-シリア地震で液状化被害の大きかった Golbasi を対象として、パラメトリック解析により隣接した浅い基礎を有する建物の液状化による不同沈下挙動の傾向を検討した。建物の間隔、根入れ深さおよび建物の重量が、隣接した 2 棟の建物の不同沈下挙動に与える影響を評価することができた。主な結論は以下の通りである。

- ・ 近接した 2 棟の建物の離隔を変化させた数値解析では、2 棟の建物の離隔が小さいときほど大きな傾斜角を示し、離隔が大きくなるにつれて傾斜角は小さくなっていく結果となった。2 棟間距離が 3.0 m までの傾斜角の減少に比べて、2 棟間距離が 4.0 m 以上の場合の傾斜角の減少は緩やかなものとなっていた。
- ・ 今回の解析ケースの中で最も 2 棟の建物による地盤内応力の相互干渉が大きかった 2 棟間距離 0.5 m のときでは、左側の建物が健康被害を生

じ得る 1/100 を超える傾斜角となった。

- ・ 一定距離 (本解析では 2.0 m) 以上に 2 棟の建物が近づくと地盤内応力の相互干渉が強くなり傾斜角だけでなく沈下量も増加することが確認できた。
 - ・ 2 棟間の距離を 1.0 m として、建物の根入れ深さのみを変化させた数値解析では、根入れ深さが増加するにしたがって、建物の沈下量は小さくなった。これは根入れ深さとともに建物側面と地盤との周面摩擦力が増加するためであると考えられる。
 - ・ 根入れ深さの変化と傾斜角の関係にはあまり変化がなく、根入れを深くしても建物傾斜の遞減効果は小さいといえる。
 - ・ 今回の解析では基礎の幅を上部の建物の幅と同じとして行った。そのため、基礎底面以深の地盤内応力の変化が根入れ深さ 0 m のときの地盤で見られた応力変化と同じようになっており、根入れ深さが建物の傾斜挙動に与える影響が小さかったためと考えられる。
 - ・ 建物の接地圧を変化させた場合では、接地圧が大きくなるほど建物の沈下量と傾斜角は大きくなった。建物の荷重が増加することで、地盤内における応力干渉は大きくなり沈下量と傾斜角の増大につながったと考えられる。
 - ・ Golbasi では、2.0 ~ 3.0 m 程度の離隔の建物で、4 ~ 5 度の傾斜も確認されており、本解析では過小評価と考えられる被害も発生していた。
- 以上より、近接した建物の液状化による不同沈下挙動には、隣り合う建物との離隔や建物の重量が影響を与えており、地盤内における応力干渉が重要になると考えられる。しかしながら、Golbasi では解析結果よりも大きい被害も見られており、実際の液状化による建物の沈下挙動は、他の要因 (例えば、地下水位、地震動の特性、地盤の液状化特性など) による影響も考えられる。また、3 棟以上の建物が隣接している場合での相互作用について検討することでより詳細な不同沈下挙動の傾向を把握することができると考えられる。

謝辞

本研究は、科学技術振興機構 (JST) の国際緊急共同研究・調査支援プログラム (J-RAPID) 「カフラマンマラシュ (トルコ南東部) 地震の被害に関連した研究・調査 (代表：清田隆)」の支援による調査結果を一部用いました。記して謝意を表します。東京大学の清田隆教授、仮屋直紀氏、京都大学の後藤浩之教授、基礎地盤コンサルタンツの八野裕二氏、長岡技術科学大学の志賀正崇助教、北園和磨氏、佐藤景也氏、Boğaziçi University の Prof. Özer Çinicioğlu, Mr. Mert Güner, MEF University の Dr. Gökçe Tonuk, Mr. Görkem Akyol, University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy の Dr. Nikolay Yordanov Milev, Gebze Technical University の Mr. İsmail Alpaslan Ceylan, Mr. Furkan Çiçek, Mr. Buğra Mehdil İnce には本研究にご協力いただきました。深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) USGS Geologic Hazards Science Center and Collaborators: 2023. The 2023 Kahramanmaraş, Turkey, earthquake sequence., <https://earthquake.usgs.gov/storymap/index-turkey-2023.html> (Accessed 2024.04.02).
- 2) VOA news: 2023. Turkey begins rebuilding for 1.5M left homeless by earthquakes, <https://www.voanews.com/a/turkey-begins-rebuilding-for-1-5m-left-homeless-byearthquakes-/6978531.html> (Accessed 2024.04.02).
- 3) 安田進・橋本隆雄：鳥取県西部地震における住宅の液状化による沈下について，土木学会第57回年次学術講演会，pp.1029-1030，2002.
- 4) Yasuda, S.: Allowable settlement and inclination of houses defined after the 2011 Tohoku: Pacific Ocean Earthquake in Japan, *Earthquake Geotechnical Engineering Design, Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering* Vol.28, pp.141-157, 2014.
- 5) 橋本隆雄：2016年熊本地震による近見～川尻地区における液状化被害と建物及び基礎構造と沈下・傾斜の関係，土木学会論文集A1 (構造・地震工学)，Vol.75, No.4, pp.736-753, 2019.
- 6) 川崎淳志・松下克也・石井雄輔・樋口俊一・西山高士：液状化に伴う戸建住宅の被害と分析－その1. 東日本大震災における被害の事例－，第47回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.1393-1394, 2012.
- 7) 北原正章・宇野良二：傾斜室における眩暈と平衡－新潟地震による傾斜ビルの研究調査－，耳鼻咽喉科臨床，耳鼻咽喉科臨床学会，Vol.58, No.3, pp.145-151, 1965.
- 8) 藤井衛・伊集院博・田村昌仁・伊奈潔：兵庫県南部地震の液状化地帯における戸建住宅の基礎の被害と修復－戸建住宅の基礎の修復に対する考え方－，土と基礎，地盤工学会，Vol.46, No.7, pp.9-12, 1998.
- 9) 安田進・深谷成司：隣接した直接基礎構造物の液状化による不同沈下について，地震工学研究発表会報告集，28巻，p.103, 2005.
- 10) Akil, B., Akpınar, K., Cuckardesler, C., Araz, H., Sağlam, M., Ecemış, B., Uran, S. B.: Doğu Anadolu Fay Zonu Uzerinde Yer Alan Golbaşı (Adıyaman) Yerleşim Alanındaki Zeminlerin, Jeoteknik Özellikleri ve Değerlendirilmesi, *Türkiye Jeoloji Bulteni, Cilt 51, Sayı 1, Nisan 2008*.
- 11) 新任修：既存資料の重要性と面的調査，地質と調査，1986年，第1号，pp.73-76, 1986.
- 12) Susumu Iai and Tomohiro Kameoka: Finite element analysis of earthquake induced damage to anchored sheet pile quay walls, *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 33(1), pp.71-91, 1993.
- 13) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol. 29, No. 4, pp.27-56, 1990.
- 14) 井合進・飛田哲男・小堤治：砂の繰返し載荷時の挙動モデルとしてのひずみ空間多重モデルにおけるストレスダイレイタンシー関係，京都大学防災研究所年報，第51号，2008.
- 15) Iai, S., Tobita, T., Ozutsumi, O. and Ueda, K.: Dilatancy of granular materials in a strain space multiple mechanism model, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 35, pp.360-392, 2011.
- 16) 森田年一・井合進・劉漢龍・一井康二・佐藤幸博：液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメタの簡易設定法，港湾技術研資料，No.869, 1997.
- 17) 三上武子・小堤治・中原知洋・井合進・一井康

- 二・川崎栄久：液状化解析プログラム FLIP のパラメータの簡易設定法（再訂版）の構築，第46回地盤工学研究発表会，2011.
- 18) Engineering Strong-Motion Database (ESM DATABASE): <https://esm-db.eu/#/station/TK/>

4614 (Accessed 2024.04.02).

(投稿受理：2024年4月4日
訂正稿受理：2024年6月25日)

要 旨

2023年2月6日，トルコ南東部において M_w 7.8, M_w 7.5の地震が発生した。東アナトリア断層上に位置する Golbasi では，液状化による建物の沈下や傾斜などの深刻な被害が発生した。液状化による建物の不同沈下は過去の地震においても報告されており，近接する建物の荷重による影響が指摘されている。本研究では，Golbasi を対象として浅い基礎を有する建物が近接している場合の不同沈下挙動について考察する。また，建物の基礎の根入れ深さや重量の変化についても検討した。検討の結果，隣接する建物の距離が近いと，2棟の荷重による地盤内応力が干渉することで，内側の沈下量が外側よりも大きくなるため建物が内側に向かって傾斜し，2棟間距離が大きくなると相互干渉は小さくなるため傾斜角も小さくなる結果となった。