

平成 21 年 6 月 8 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19560496

研究課題名（和文） 液状化による構造物の不同沈下に関する研究

研究課題名（英文） Study on the differential settlement of structures due to soil liquefaction

研究代表者

安田 進 (YASUDA SUSUMU)

東京電機大学・理工学部・教授

研究者番号：90192385

研究成果の概要：地震時に地盤が液状化すると建物やタンクなどが沈下するが、単に沈下するだけでなく不同沈下を生じることもあり、この不同沈下の方が居住性などに影響する。過去の地震時における不同沈下の事例を調べたところ、隣接する建物の距離などが不同沈下量に影響を与えることが分かった。そこで、振動台および解析によって不同沈下に影響を与える要因を研究し、不同沈下量を予測する経験式を導き出した。これを東京のある地区に適用して建物群の不同沈下の被害推定を行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：地盤工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：液状化、沈下、家屋、砂地盤、地震、模型実験、被災事例分析、解析

1. 研究開始当初の背景

液状化による中層・低層建物の沈下は過去に数多く発生し、その沈下量の測定も行われてきた。ところが、不同沈下量や傾斜角まではあまり目が向けられてこなかった。これに対し、2000年鳥取県西部地震における米子市の安倍彦名団地の液状化による戸建て住宅の沈下に対しては、住民の方々から傾斜が問題とされ、その詳細な測定が行われた。そして家屋が1/100程度以上傾くと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ことが明らかになってきた。石油タンク類

も許容傾斜角が問題と考えられている。このように液状化による直接基礎構造物の被害では等沈下量に加えて不同沈下量が大きな問題であるが、不同沈下が発生するメカニズムさえまだ確定していないのが現状であった。

2. 研究の目的

本研究では液状化による直接基礎構造物の不同沈下を対象にし、下記の項目を明らかにすることを目的とした。

①不同沈下が発生するメカニズム

- ②隣接する構造物間の距離など、不同沈下量や向きに与える要因
- ③不同沈下を解析できる手法
- ④既設構造物の不同沈下に対する簡易な対策方法
- ⑤構造物ごとの許容不同沈下量および性能設計への導入方法
- ⑥既存の住宅団地における戸建て住宅の不同沈下量および向きに対するハザードマップの作成方法

3. 研究の方法

本研究は下記のような方法で行った。

- ①過去の被災事例を収集、分析し、不同沈下の実態およびそれに影響を与える要因を検討した。
- ②振動台実験を行って不同沈下量に影響を与える要因の検討を行った。
- ③解析手法をして静的解析の"ALID"を適用し、その適用性を検討した。そして、多くの解析を行って不同沈下量に影響を与える要因を検討した。
- ④既設の構造物に対する簡易な不同沈下対策方法を考案し、その効果を振動台実験で確かめた。
- ⑤解析結果をもとに不同沈下量を簡易に予測する手法を導きだし、それを東京などの既存の住宅団地に適用して団地内の建物の不同沈下を予測した。

4. 研究成果

(1)過去の地震時における不同沈下の調査

2000年鳥取県西部地震の際、米子市の安倍彦名団地内では図1の●印で示した箇所で噴砂・噴水が発生した。この液状化により、多くの家屋が沈下・傾斜や損壊の被害を受けた。傾斜した家屋では住民の方々にめまいや頭痛が生じ、そのままでは生活が出来なくなった。団地内には169棟の戸建て住宅があったが、その内116棟は5/1000以上傾いた。そのため、傾斜がひどい家屋は基礎下嵩上げ

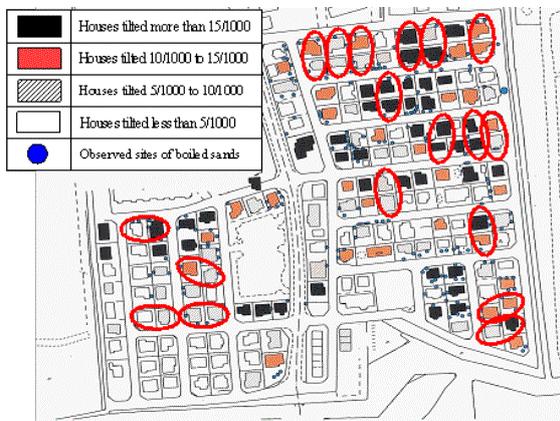


図1 安倍彦名団地の傾斜角の分布

を行って水平に戻す水平化工事が行われた。

この傾斜量、つまり不同沈下量については、地震後の被災状況把握時や復旧時に測定が行われ、自治会でまとめられた。そこで、研究代表者はそれらのデータをもとに最大と最小の差をとり不同沈下量を求め、また、その最大と最小の沈下を生じた角どうしの間の距離をとり、不同沈下量をこの距離で除して傾斜角を求めてみた。図1に示したように、この団地では中央を南北に通る幹線道路を挟んで、東半分は東西方向に2列ずつ家屋が並び、西半分は南北に2列ずつ家屋が並び配置となっている。そこで、図1に楕円で囲った隣接している家屋同士を対象にし、図2に示すようにお互いに内側に向いている場合を+とし、2棟間の相対傾斜角を求め、2棟間の距離との関係でプロットしてみた。これが図3である。この図をみるとばらつきが多いものの一応右下がりになっており、家屋間距離が狭いほど内側に傾く傾向が見られた。ただし、図中○で囲った3点がかけ離れた値となった。これらの箇所は地下水位が浅く絶対的な沈下量も大きい区域に位置している。

ところで、1964年新潟地震の際、被災した中層建物の沈下量や傾斜角が建設省建築研究所によって詳しく調査されている。これらの建物の位置を割り出すため、新潟図書館へ行き、地震後の地図を調べた。そして新潟地震直後に撮影された航空写真から中層建物の長短両辺からの距離を定規で測り、実際の距離を求めた。このようにして求めた長辺からの2棟間距離と傾斜角の関係を図4に示す。

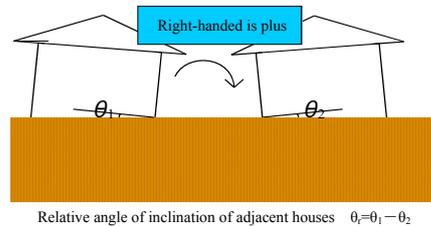


図2 傾斜角の定義

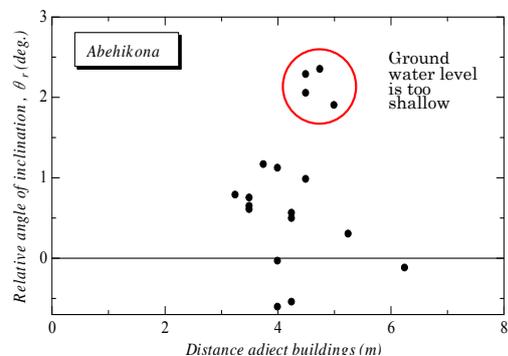


図3 安倍彦名団地における2棟間距離と2棟間相対傾斜角の関係

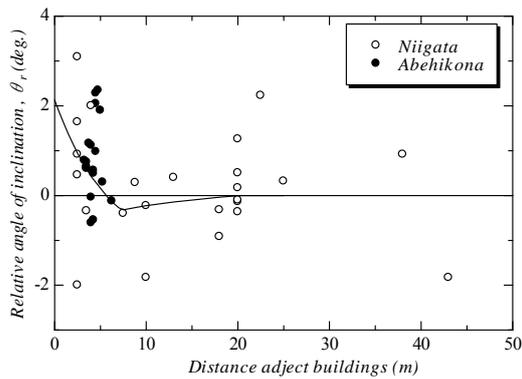


図4 安倍彦名団地と新潟における2棟間距離と2棟間相対傾斜角の関係

2棟間距離が近い時には内側に傾き、その距離が離れると外側に傾き、さらに離れると等沈下へ向かうという結果になった。

(2) 不同沈下を再現する振動台実験

上述したように、家屋が隣接する場合お互いに影響しあって不同沈下を生じるか否かを確かめるために、振動台実験を行ってみた。図5に示すように土槽には中型土槽、試料には珪砂を用いた。地盤の相対密度をとし、その上に底面積が200mm×200mm、高さが85mm、重さが16kgの家屋模型を地盤上に設置した。模型数は2棟とし模型間距離を5mm～320mmと変化させて相対傾斜角を求めた。加振を行い、過剰間隙水圧比が1に達した1秒後の沈下量で整理してみた。2棟間距離と相対傾斜角の関係を図6に示す。ここに示すように2

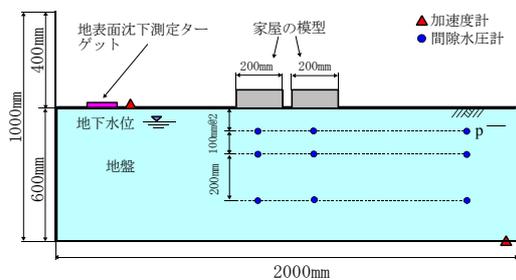


図5 振動台実験の土槽と家屋模型

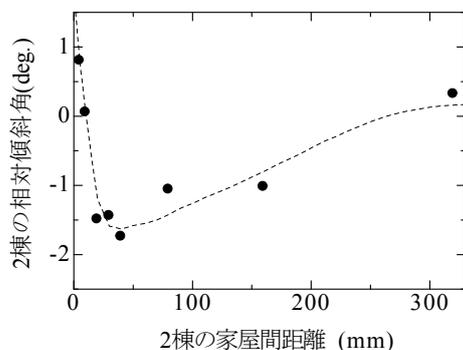


図6 2棟間の距離と相対傾斜角の関係

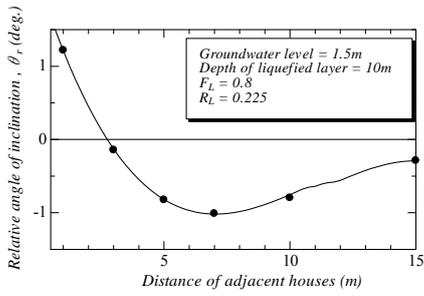
棟間距離が近いと家屋模型は内側に向かって傾き、離れていくと外側に傾いた。さらに離れていくと傾斜することなくそれぞれ独立に沈下した。これは2棟の家屋間距離が近いと、お互いの荷重が重なり合って編心荷重のようになり内側に傾斜するのに対し、少し離れるとその間に土が盛り上がってきて2棟は仰け反るようになり、さらに離れるとこれらの影響を受けなくなって傾斜しなかったのではないかと考えられた。

(3) ALIDによる不同沈下に影響を与える要因の解析

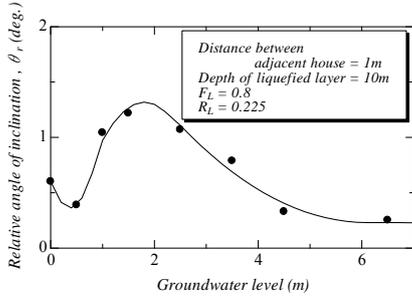
解析には研究代表者が開発したALIDを用いた。これは残留変形解析手法のひとつであり、単位体積重量などの物性以外に初期応力解析に用いるせん断剛性と、液状化によって低減したせん断弾性係数が必要である。前者に関しては N 値から $E=2744M(kN/m^2)$ として弾性係数を求め、それからせん断弾性係数に換算した。後者に関しては、液状化層は安田・稲垣の式で R_L と F_L から推定し、地下水位以上は1/40、液状化層下の非液状化層は低下なしと仮定した。

解析用の地盤モデルは前述した安倍彦名団地の地盤と同じとした。ここでは地下水以下の盛土層が数mの厚さで液状化したと考えられているが、代表的な値として、 N 値が9(N_1 値に換算すると11)の $F_c=7.2\%$ の土と設定した。そして、地下水位をGL-1.5mと設定し、GL-10mまで液状化層と仮定した。液状化強度比は N_1 値と F_c をもとに道路橋示方書の式で推定したところ $R_L=0.225$ となったのでこの値を基本とした。地震動は近く地震記録から観測された280Galの地表面最大加速度を基本とした。そして、これらを基本ケースとし、2棟間距離、地下水位、液状化深度、液状化安全率、液状化強度比をそれぞれ変化させて解析を行った。

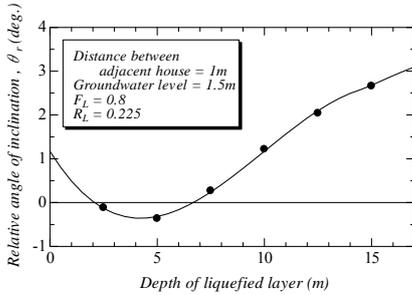
図7(a)に2棟間距離と2棟間傾斜角の関係を示す。2棟間距離が近いときは内側に傾き、またその距離が少し離れると外側に傾き、さらに離すと等沈下に向かうという結果になった。図7(b)に地下水位と2棟間傾斜角の関係を示す。この図から、地下水位が浅ければ浅いほど2棟間傾斜角に影響が出ているのが分る。また、だいたいGL-4m以上だと家屋に与える影響はなくなってくると考えられる。図7(c)に液状化深度と2棟間傾斜角の関係を示す。この図から液状化深度が浅いと2棟間傾斜角は小さく、8m程度までは外側への傾斜が増していき、さらに深くなると外側への傾斜が小さくなっていくという結果になった。図7(d)に液状化に対する安全率 F_L と2棟間傾斜角の関係を示す。この図から、 F_L が小さいときは内側に傾き、 $F_L=0.7$ 程度までは外側へ傾き、さらに大きくなると傾斜角は0へ収束していくのが分る。図7(e)に液状化強度



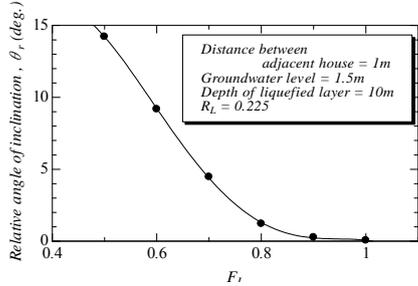
(a) 2棟間距離の影響



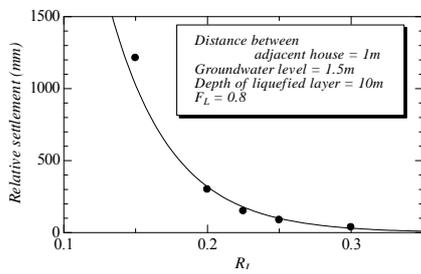
(b) 地下水位の影響



(c) 液状化深度の影響



(d) 液状化に対する安全率の影響



(e) 液状化強度比の影響

図7 各要因と相対傾斜角の関係

比 R_L と 2 棟間傾斜角の関係を示す。この図から、液状化強度比 R_L が小さいほど 2 棟間傾斜角に影響が出ているのが分る。

(4)既設の構造物に対する簡易な不同沈下対策の考案と振動台実験による効果の確認

(2)で前述した振動台および土槽を用いて、既設の2棟の家屋を対象とした簡易な不同沈下対策方法を考案し、その効果を実験で確かめた。家屋のモデルは200mm×200mmである。考案した対策方法は以下の5通りである。

- ①2棟の家屋間に矢板を打設する。
- ②各棟の周囲に矢板を打設する。
- ③2棟の外側それぞれに重りを載荷する。
- ④2棟を連結する。
- ⑤地下水位を一時的に低下させ過圧密にさせる。

①では図8に示すように2棟間に矢板を入れ、その長さを変えたところ、図9に示すように矢板の根入れ長さに応じて不同沈下の防止効果が得られた。②でも根入れ長さに応じて不同沈下のみならず絶対沈下量の対策効果が得られた。③では重りの重さと設置位置によって効果が異なった。④では剛性の高いもので連結すると当然不同沈下は抑制で

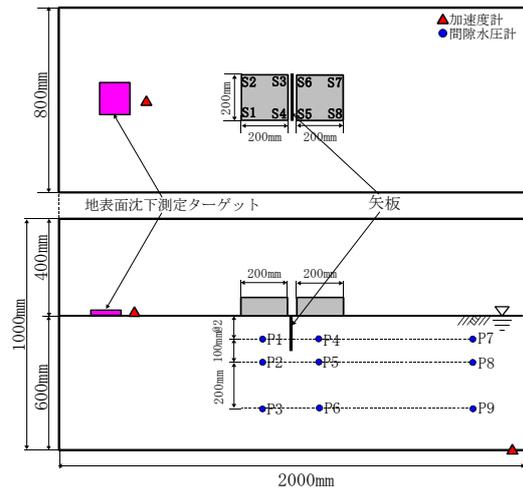


図8 矢板の打設による不同沈下対策の実験

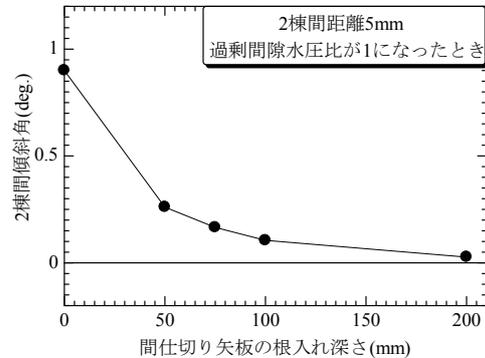


図9 矢板の根入れ長さと同相傾斜角の関係

きた。また、⑤でも対策効果が得られた。

(5) 不同沈下に関するゾーニング手法の検討

(3)で行った解析結果を用いて、地下水位、液状化深度、液状化に対する安全率、2棟間距離の4つの要因を考慮した2棟間の不同沈下量を推定式を導き出した。これを示すと以下ようになる。

$$\theta = 0.61 \times C_1 \times C_2 \times C_3 \times C_4$$

$$C_1 = 0.0095h_w^5 - 0.1421h_w^4 + 0.8468h_w^3 - 2.5439h_w^2 + 3.6544h_w - 0.9687$$

$$C_2 = -0.001h_L^4 + 0.0289h_L^3 - 0.2337h_L^2 + 0.5832h_L - 0.567$$

$$C_3 = -600.89F_L^4 + 1824.8F_L^3 - 1978.2F_L^2 + 877.35F_L - 122.99$$

$$C_4 = 0.0066x^3 - 0.0766x^2 - 0.074x + 1.1455$$

θ : 二棟間傾斜角
 C_1 : 地下水位による二棟間傾斜角の補正係数
 C_2 : 液状化深度による二棟間傾斜角の補正係数
 C_3 : 液状化安全率による二棟間傾斜角の補正係数
 C_4 : 二棟間距離による二棟間傾斜角の補正係数
 h_w : 地下水位 (m)
 h_L : 液状化深度 (m)
 F_L : 液状化安全率
 x : 二棟間距離 (m)

そこで、この式を用いて、東京の下町のある一区画に対して、各家屋の不同沈下の方向および傾斜角の予測をおこなってみた。地震動としてはレベル1と2の2つのレベルを想定したが、そのうちレベル2地震動における推定結果を図10に示す。この地区では家屋が連なっているような配列をしているため、特に角の家屋の傾斜が大きくなると推定された。

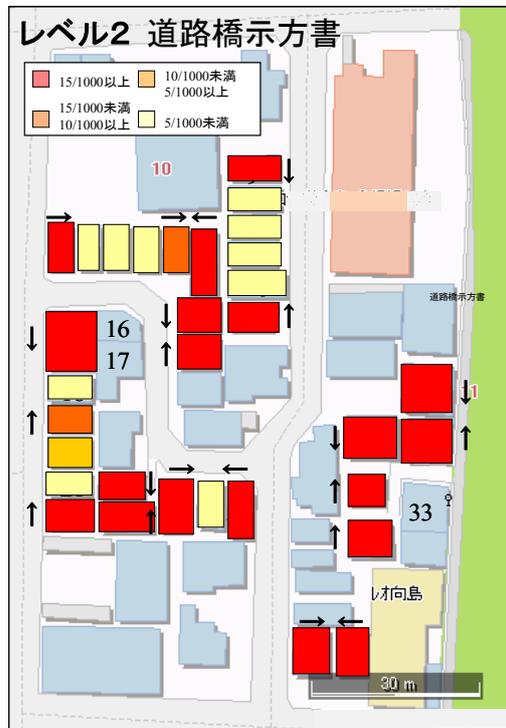


図10 東京低地の一区画における家屋の不同沈下の予測結果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計3件)

- ① 安田進・下枝浩徳：四つの家屋不同沈下対策工法に関する振動台実験，土木学会第64回年次学術講演会，2009年9月、福岡（掲載決定）
- ② Yasuda, S., and Shitaeda, H.: A hazard mapping for liquefaction-induced differential settlement of houses, *Proc. of International Symposium on Geo-Informatics and Zoning for Hazard Mapping*, 2009年12月、京都（査読有、掲載決定）
- ③ Yasuda, S. and Ariyama, Y.: Study on the mechanism of the liquefaction-induced differential settlement of timber houses occurred during the 2000 Totoriken-seibu earthquake, *Proc. of 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No.S26-021, 2008年11月、Beijing（査読有）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安田 進 (YASUDA SUSUMU)
 東京電機大学・理工学部・教授
 研究者番号：90192385

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし