

戸建て住宅地の液状化被害メカニズムの 解明と対策工の検討

名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻
中井健太郎

名古屋大学連携研究センター
野田 利弘

1.背景・目的

2.建物による被害影響

- ・材料定数, 境界条件
- ・高さ・重量の影響
- ・地盤層序と固有周期の影響

3.被害に及ぼす隣接建物の影響

- ・2棟隣接時の隣接距離と傾斜方向の関係
- ・3棟以上が隣接時の挙動

4.沈下量・建物傾斜に対する対策工の検討

5.結論

1.背景・目的

◆宅地の液状化被害

●東日本大震災(2011年)

- ・液状化による被害が甚大
- ・隣接家屋の影響を受け建物が傾斜



千葉県内の宅地被害の様子

●新潟地震(1964年)

- ・アパートが傾斜, 倒壊



1964年新潟地震液状化被害のアパート写真, 国産工学会, 丸善出版



過去の地震被害において,
多くの戸建て住宅, アパートで液状化被害が確認

1.背景・目的

◆宅地の液状化対策の現状

●東日本大震災前

- ・被害自体が軽視
- ...大規模建造物の耐震対策
- ×...小規模建築物の耐震対策



●東日本大震災後

- ・住宅被害の判断基準見直し
- ・小規模建築物への対策検討⇒コスト面で課題



南海トラフの巨大地震に対し戸建て住宅の被害現象の
解明と液状化対策は喫緊の課題

1.背景・目的

◆本研究の目的

水～土連成有限変形解析コード**GEOASIA**を用い、

1.戸建て住宅地の液状化被害メカニズムの解明

- ・**建物**による被害の解明
- ・**隣接建物**の影響による被害形態の解釈

2.戸建て住宅に対する液状化対策工の検討

- ・効果的かつ経済的な**浅層盤状改良**を検討

を行う。

5

2.建物による被害影響(材料定数, 境界条件)

◆材料定数の決定

遠心模型実験で使用した材料を使用

●地盤

- ・**珪砂7号**を使用

珪砂7号の材料定数					
《弾塑性パラメータ》			《発展則パラメータ》		
圧縮指数	λ	0.045	正規圧密土化指数	m	0.080
膨潤指数	$\bar{\epsilon}$	0.002	構造劣化指数	a	2.200
境界状態定数	M	1.200		b	1.000
NCLの切片	N	1.980		c	1.000
ポアソン比	ν	0.150		c_s	1.000
土粒子密度	A	2.636	回転硬化指数	h_s	3.500
透水係数 (cm/s)	k	1.0×10^{-3}	回転硬化限界定数	m_s	0.900
《初期値》					
液状化層					
比体積	v_s	1.900	静止土圧係数	K_v	0.600
構造の程度	$1/R_s$	2.000	異方性の程度	K_d	0.600

●構造物

- ・模型実験で使用した
アクリル⇒1相系弾性体

木造材料定数

構造物材料定数(木造)	
《弾塑性パラメータ》	
ヤング率 E (kN/m ²)	3.2×10^6
ポアソン比	0.35
弾性体密度	0.292

模型実験の再現計算により、モデル化等は妥当

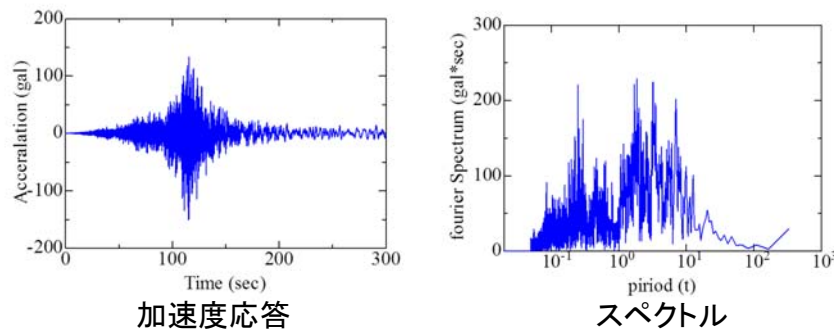
6

2.建物による被害影響(材料定数, 境界条件)

◆入力地震波

●地震波

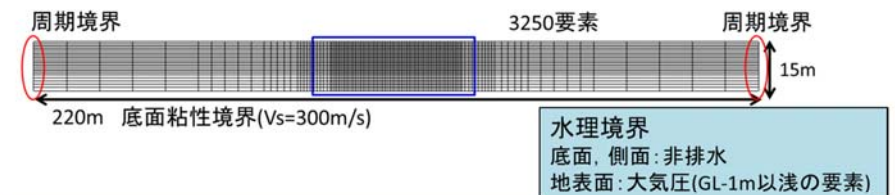
- ・東北地方太平洋沖地震で浦安地区で観測した地震波
- ・継続時間:300s
- ・最大加速度:150gal



7

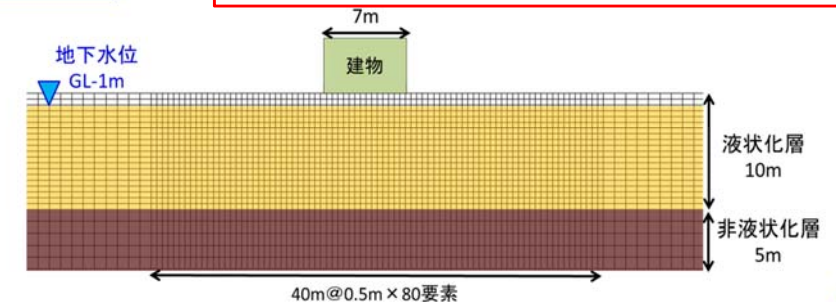
2.建物による被害影響(材料定数, 境界条件)

◆解析条件



中心部拡大

地下水位以浅の要素の水理境界は大気圧状態



8

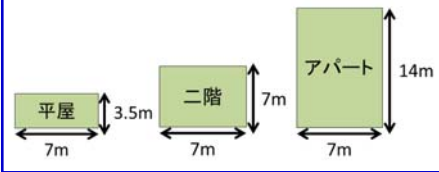
2.建物による被害影響(材料定数, 境界条件)

◆検討ケース(構造物のモデル化)

●建物高さ

・底面一律7m

・高さ
 3.5m
 7.0m
 14.0m



●建物重量

・木造重量の5倍をRC重量

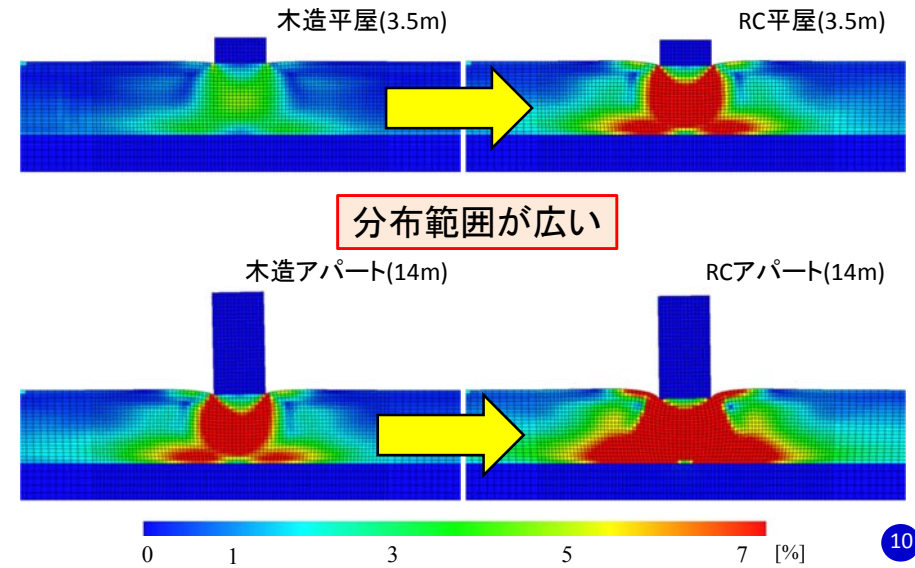
構造物材料定数(木造)		構造物材料定数(RC構造)	
《弾塑性パラメータ》			
ヤング率 $E(kN/m^2)$	3.2×10^6	ヤング率 $E(kN/m^2)$	3.2×10^6
ポアソン比	0.35	ポアソン比	0.35
弾性体密度	0.292	弾性体密度	1.458

建物重量

建物重量(t) (実スケール)	建物種類	
	木造	RC
3.5m	49.1	245.3
7.0m	98.1	490.5
14.0m	196.2	981.0

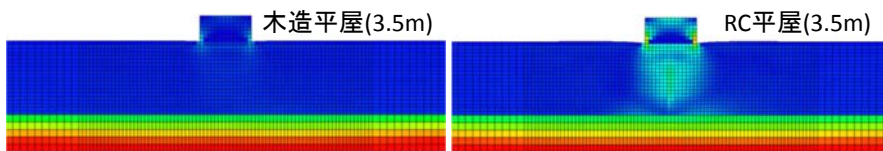
2.建物による被害影響(高さ・重量の影響)

◆せん断ひずみ(地震後の間隙水圧消散時)

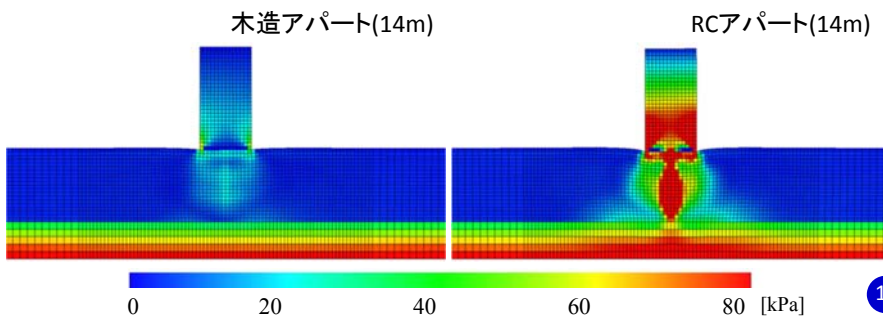


2.建物による被害影響(高さ・重量の影響)

◆平均有効応力(最大加速度時)

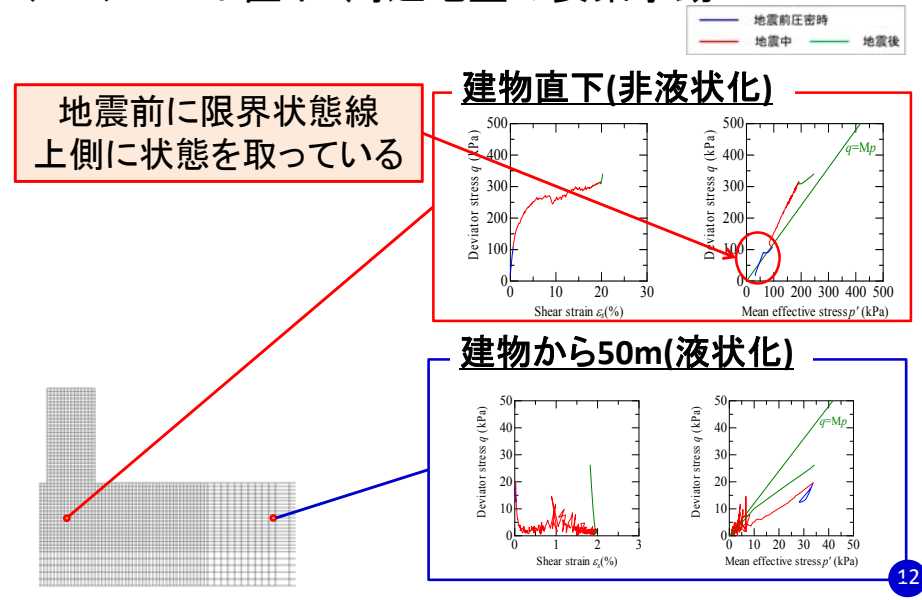


重いほど建物直下で平均有効応力の低下はみられない



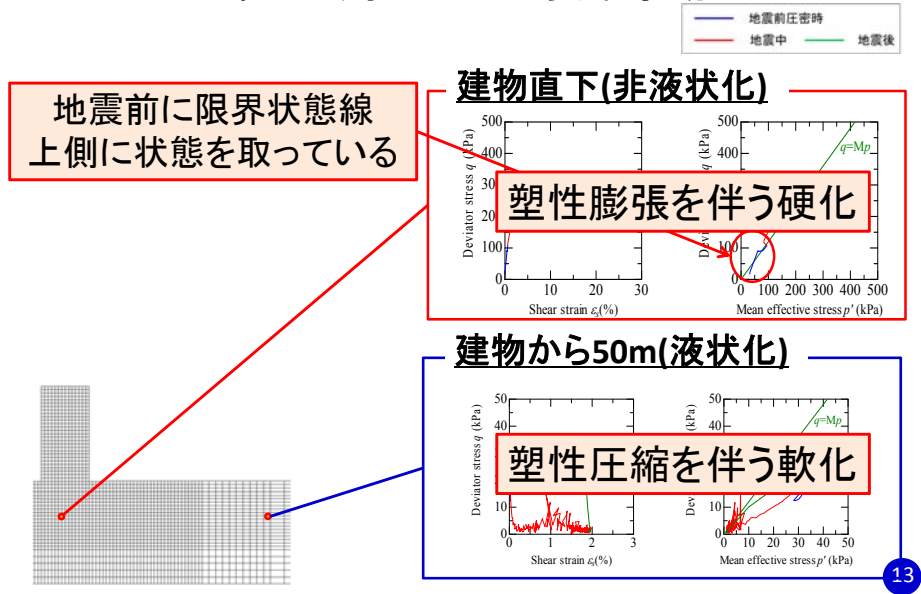
2.建物による被害影響(高さ・重量の影響)

◆RCアパート直下・周辺地盤の要素挙動



2. 建物による被害影響(高さ・重量の影響)

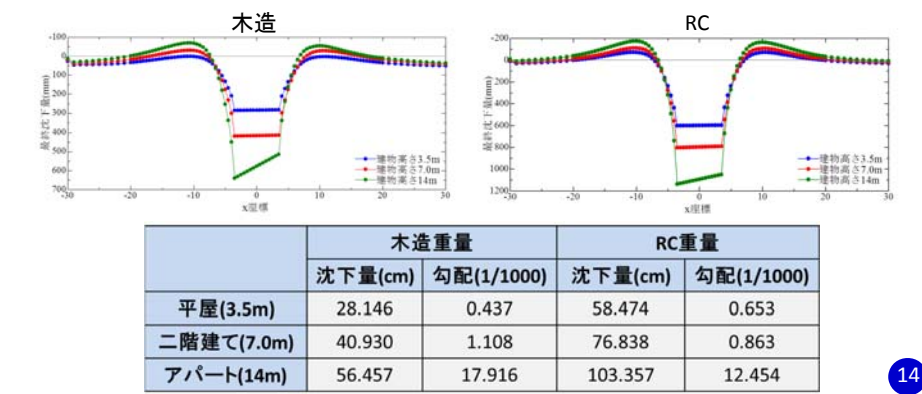
◆RCアパート直下・周辺地盤の要素挙動



2. 建物による被害影響(高さ・重量の影響)

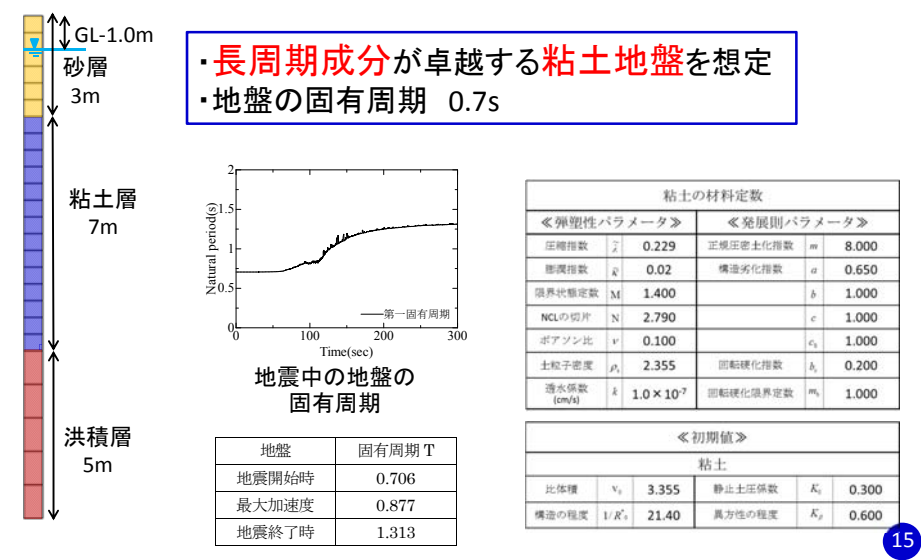
◆不同沈下(過剰間隙水圧消散後)

建物が高い⇒重心が高く、傾斜する
重量が重たい⇒沈下量, 周辺への押し広げが広がる
建物は安定し、傾斜は小さくなる



2. 建物による被害影響(地盤層序と固有周期の影響)

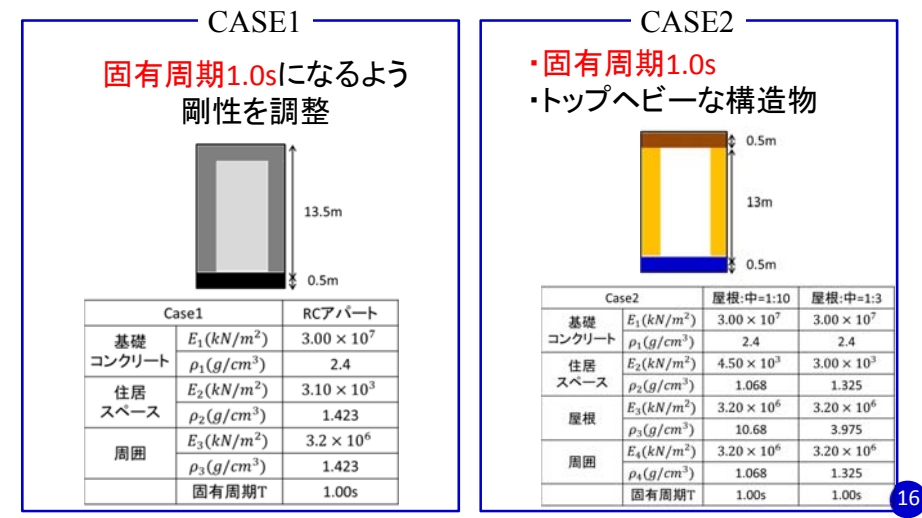
◆検討ケース(地盤のモデル化)



2. 建物による被害影響(地盤層序と固有周期の影響)

◆検討ケース(構造物のモデル化)

RCアパートを想定

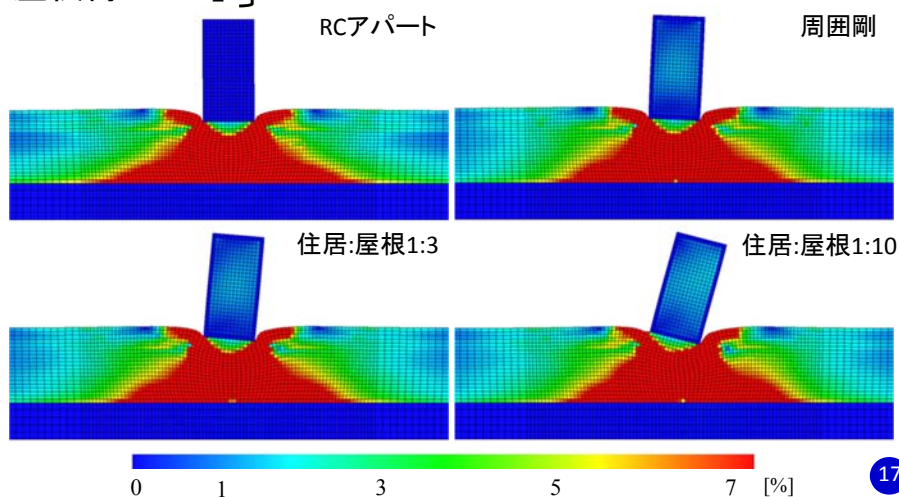


2. 建物による被害影響(地盤層序と固有周期の影響)

◆せん断ひずみ

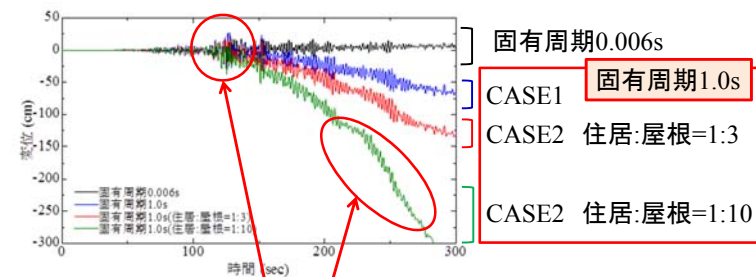
固有周期「長」
屋根荷重「重」

建物は転倒しやすくなる



2. 建物による被害影響(地盤層序と固有周期の影響)

◆水平変位



建物天端の水平変位(地震時)

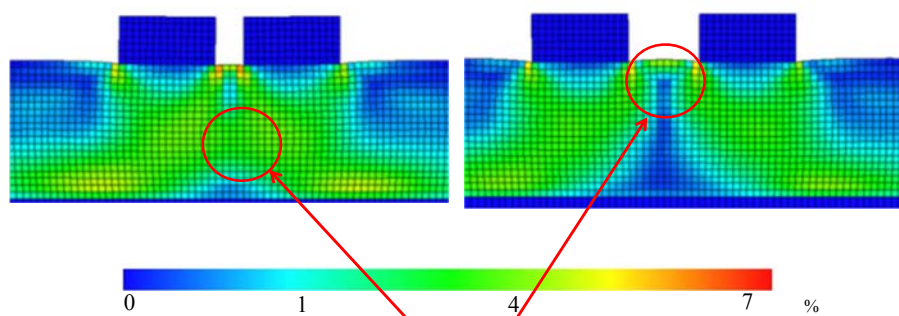
建物固有周期 = 地盤固有周期 ⇒ 揺れ「大」

トップヘビー(屋根荷重と水平変位) ⇒ p-Δ効果

3. 被害に及ぼす隣接建物の影響(2棟隣接時)

2m隣接

5m隣接



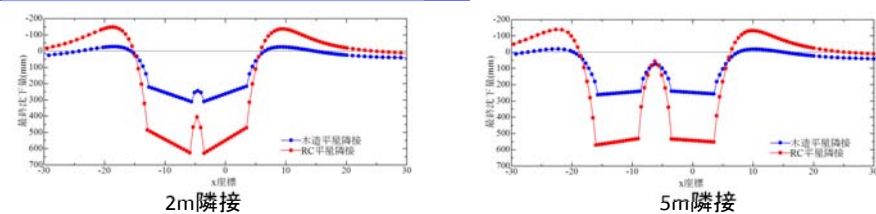
せん断ひずみ(地震終了後水圧消散時)

隣接距離によりお互いへの影響が異なる

3. 被害に及ぼす隣接建物の影響(2棟隣接時)

◆不同沈下

2mの隣接では内向きに, 5mの隣接では外向きに傾斜



		左家屋		右家屋	
		沈下量 (cm)	勾配 (1/1000)	沈下量 (cm)	勾配 (1/1000)
2m	木造	26.7	12.845	26.4	13.284
隣接	RC	55.6	19.955	55.1	22.397
5m	木造	25.2	3.020	24.9	2.415
隣接	RC	55.0	5.650	54.4	2.592

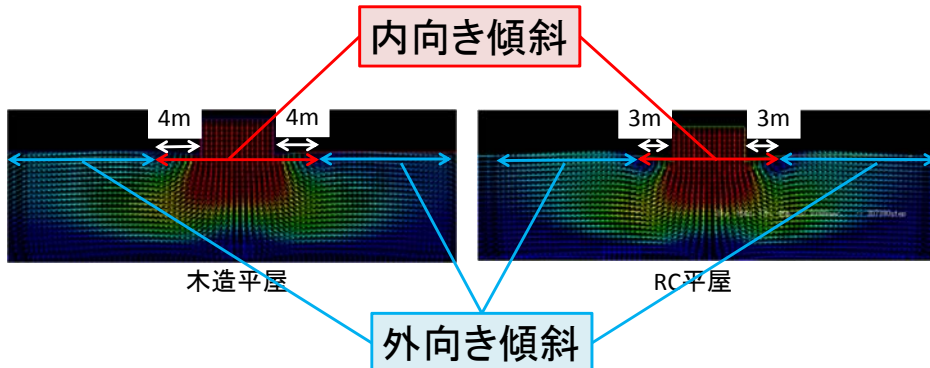
隣接間隔と傾斜方向に関係性があるのでは・・・?

3.被害に及ぼす隣接建物の影響(2棟隣接時)

◆隣接距離と傾斜方向

1棟での変位ベクトルの向きで隣接時の傾斜方向を予測

建物周囲で地表変位ベクトルが下方方向を向いている範囲

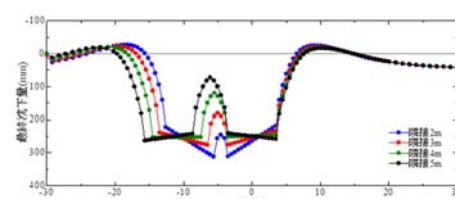


地表の変位ベクトルが横方向(押し広げ)を向いている範囲

3.被害に及ぼす隣接建物の影響(2棟隣接時)

◆隣接距離と傾斜方向

木造平屋では4mの距離の隣接時に影響無し



	左家屋	右家屋
	勾配(1/1000)	勾配(1/1000)
2m	12.845	13.284
3m	5.379	6.057
4m	0.105	0.540
5m	3.020	2.415

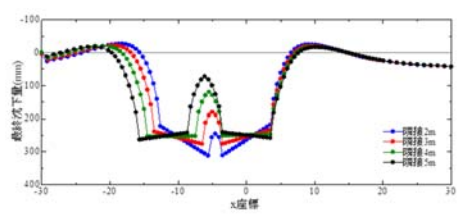
木造平屋の隣接距離と傾斜角

地表面の変位ベクトルの向きで
2棟隣接時の傾斜方向を推測可能

3.被害に及ぼす隣接建物の影響(2棟隣接時)

◆隣接距離と傾斜方向

木造平屋では4mの距離の隣接時に影響無し



	左家屋	右家屋
	勾配(1/1000)	勾配(1/1000)
2m	12.845	13.284
3m	5.379	6.057
4m	0.105	0.540
5m	3.020	2.415

木造平屋の隣接距離と傾斜角

地表面の変位ベクトルの向きで
2棟隣接時の傾斜方向を推測可能

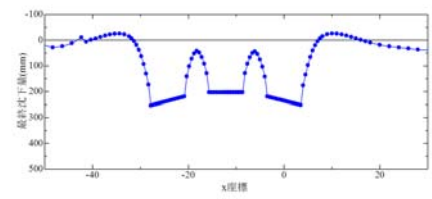
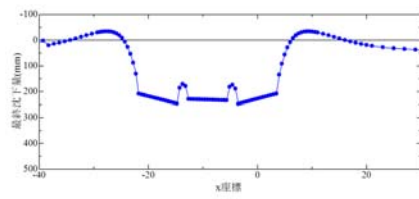
隣接距離を4m程度離すと
液状化による建物傾斜は大幅に低減できる

3.被害に及ぼす隣接建物の影響(3棟以上が隣接時の挙動)

◆3棟隣接(木造平屋)

- ・両端2棟⇒2棟隣接と同じ挙動
- ・中央⇒両端の影響で沈下量軽減

2棟隣接時と同じ
理論で説明可能



2m隣接

5m隣接

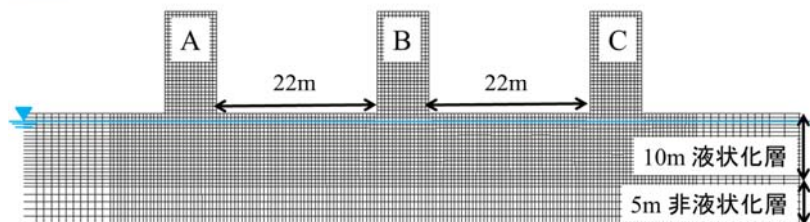
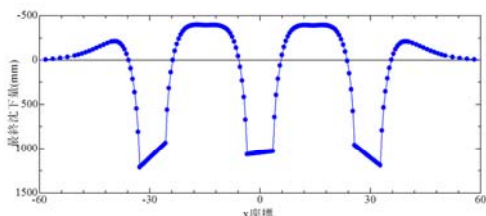
	左		中央		右	
	沈下量 (cm)	勾配 (1/1000)	沈下量 (cm)	勾配 (1/1000)	沈下量 (cm)	勾配 (1/1000)
2m	22.4	5.399	22.8	0.688	22.4	5.584
5m	23.32	4.912	20.0	0.020	23.23	4.645

3.被害に及ぼす隣接建物の影響(3棟以上が隣接時の挙動)

◆3棟隣接(RCアパート22m隣接)

A,Cは外向きに傾斜し, BはA方向へ傾斜

左	沈下量(cm)	101.5
	勾配(1/000)	39.116
中央	沈下量(cm)	98.5
	勾配(1/000)	4.962
右	沈下量(cm)	101.5
	勾配(1/000)	32.830



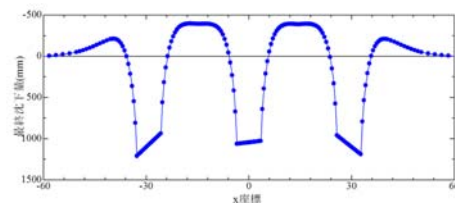
25

3.被害に及ぼす隣接建物の影響(3棟以上が隣接時の挙動)

◆3棟隣接(RCアパート22m隣接)

- ・加速度応答「 Cから40m地点 = 建物間 > 建物直下 」
- ・過剰間隙水圧比「 Cから40m地点 > 建物間 > 建物直下 」

建物距離がある場合, 建物間の地盤の挙動・2棟の傾斜角の違いにより中央の傾斜角は変わってくると考えられる



中央の転倒は再現できていないが, 傾斜方向は概ねこの理論で説明できる

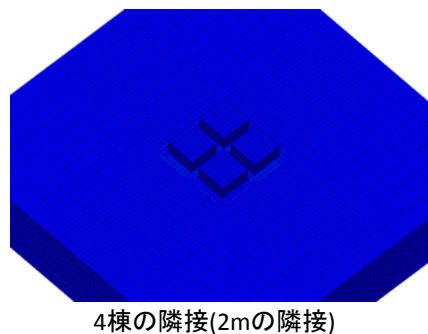
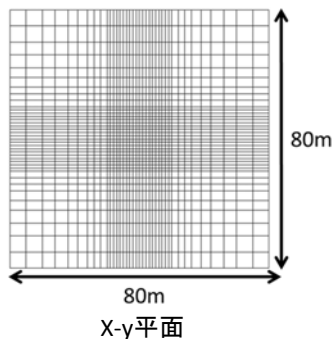
26

3.被害に及ぼす隣接建物の影響(3棟以上が隣接時の挙動)

◆4棟隣接(3次元解析)

●検討ケース

- ・4棟の平屋が2m間隔で4棟隣接
- ・地盤は2次元同様, 5mの洪積層, 10mの液状化層でGL-1m



27

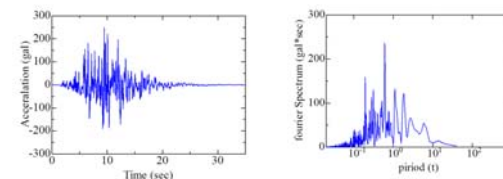
3.被害に及ぼす隣接建物の影響(3棟以上が隣接時の挙動)

◆4棟隣接(3次元解析)

●入力地震波

- ・模型実験時に用いられた直下型の地震波

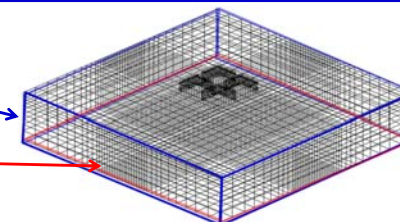
継続時間:35s
最大加速度:248gal



●計算条件

四方端: 加速度境界

底面: 粘性境界



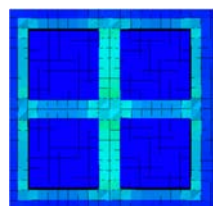
28

3.被害に及ぼす隣接建物の影響(3棟以上が隣接時の挙動)

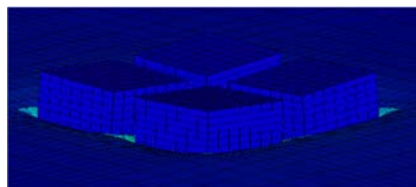
◆4棟隣接(3次元解析)

- ・4棟が**中心に向かい内向きに傾斜**
- ・2次元の場合同様のせん断ひずみが分布

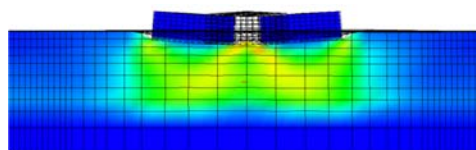
2次元の場合と同じ影響・論理で説明できる



真上からの様子



内向きに傾斜しあう様子



せん断ひずみの様子(水圧消散時) 29

4.沈下量・建物傾斜に対する対策工の検討

◆改良工法の検討(木造平屋を対象)

固化工法による改良

①改良厚の検討

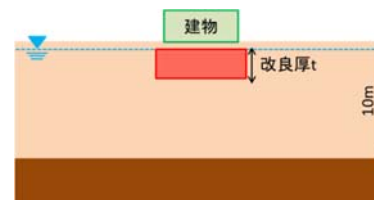
無改良, 1.5m, 3.0m, 4.5m

②改良幅の検討

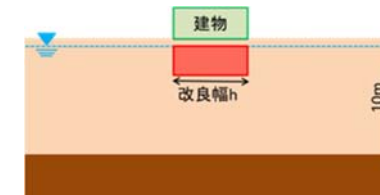
無改良, 7m, 9m, 11m

改良体の材料定数			
《弾性パラメータ》		《初期値》	
ヤング係数	4.0×10^4	比体積	元と同じ
ポアソン比	0.300	静止土圧係数	元と同じ
土粒子密度	元と同じ		
透水係数 (cm/s)	改良前より 10^{-2} 小さい		

2相系弾性体でモデル化



①改良厚を変更

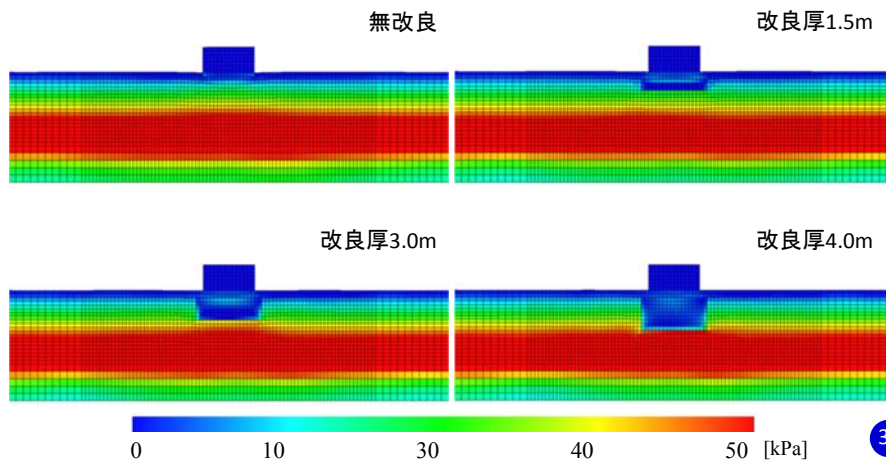


②改良幅を変更

4.沈下量・建物傾斜に対する対策工の検討

①改良厚検討～過剰間隙水圧(最大加速度時)～

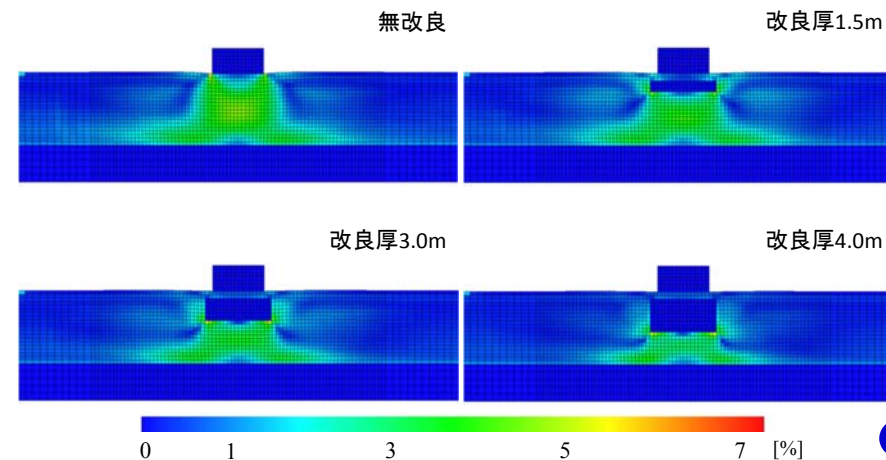
- ・砂層全域で液状化が発生
- ・改良体部分では**水圧が抑制**



4.沈下量・建物傾斜に対する対策工の検討

①改良厚変更～せん断ひずみ(水圧消散時)～

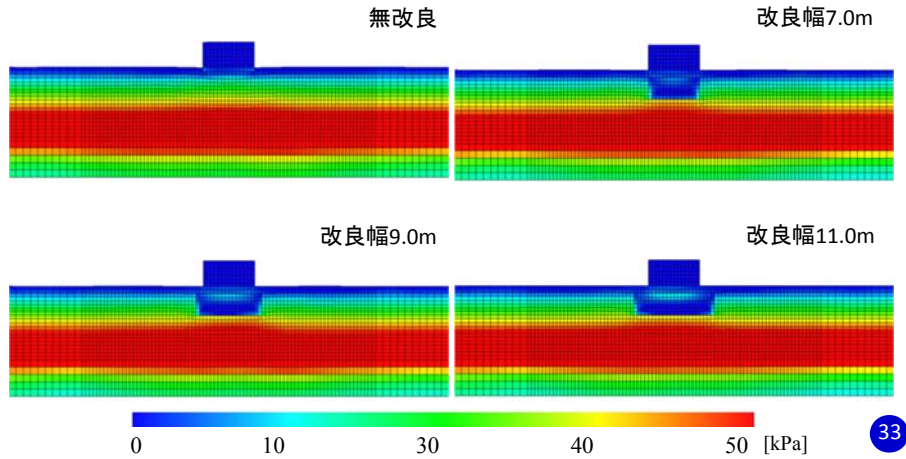
- ・改良体部分・周辺で**抑制**されている



4. 沈下量・建物傾斜に対する対策工の検討

②改良幅変更～過剰間隙水圧(最大加速度)～

- ・砂層全域で液状化が発生
- ・改良体部分では**水圧が抑制**

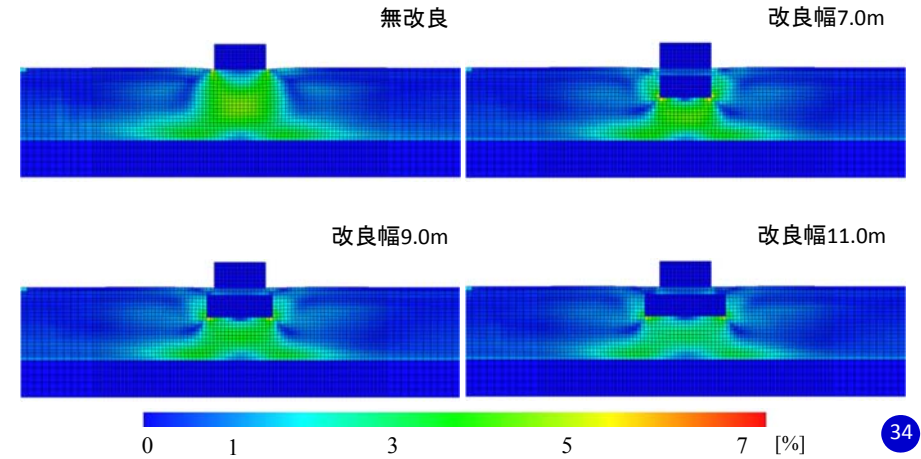


33

4. 沈下量・建物傾斜に対する対策工の検討

②改良幅変更～せん断ひずみ(水圧消散時)～

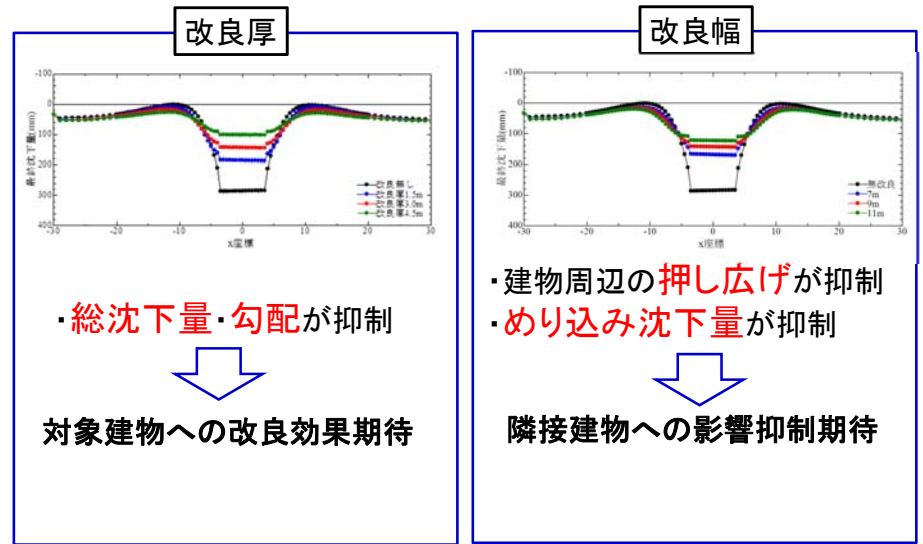
- ・改良体部分・周辺で**抑制**されている
- ・**浅部**のせん断ひずみが特に抑制



34

4. 沈下量・建物傾斜に対する対策工の検討

◆不同沈下



・**総沈下量・勾配**が抑制

対象建物への改良効果期待

・建物周辺の**押し広げ**が抑制
・**めり込み沈下量**が抑制

隣接建物への影響抑制期待

35

5. 結論

◆結論

●建物による被害影響

- ・建物が重いほど直下の地盤は液状化しにくくなる。
- ・建物が高くトップヘビーの構造では、**p-Δ効果**により建物の揺れは大きくなる

●隣接建物の影響

- ・建物の傾斜方向は**変位ベクトルの向き**が決定する。

●対策工の検討

- ・固化工法において、**改良厚**は総沈下量・勾配を、**改良幅**は**周囲地盤の押し広げ・めり込み沈下量**を抑制する
- ・固有周期や周辺建物の影響を正しく考慮しない場合、隣接建物の**さらなる傾斜**や建物の揺れの増加を引き起こす可能性がある。
- ・**締固め工法**、**排水工法**とも沈下低減効果が確認されたが、固化工法と比べ効果は小さい。

35