

国土交通省総合技術開発プロジェクト
「多世代利用型超長期住宅及び宅地の形成・管理技術の開発」
宅地技術部門

空気注入法による 地盤液状化対策の実大振動実験

国土技術政策総合研究所都市研究部
2009年2月

1

研究の趣旨

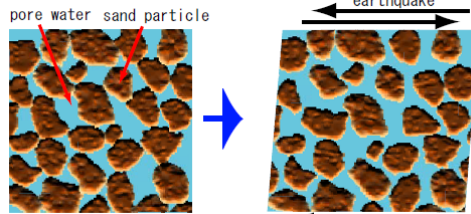
- 多世代利用型超長期住宅の立地場所は、大部分が既存の宅地となる。このため、既存の宅地に対する防災対策が重要である。
- 現状の市街地で、地震時に液状化が生じる危険がある地域は、狭くはない。建物が稠密に建て込んだ市街地の中において、住宅が建ったまま簡便に行うことのできる液状化対策技術の開発が求められる。

2

空気が液状化を抑えるメカニズム

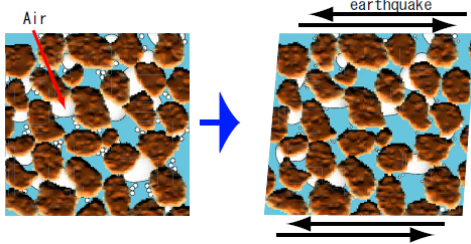
液状化のメカニズム

地震動により間隙水圧が上がり、
粒子の構造を破壊



液状化を抑えるメカニズム

空気が縮んでクッションになり、
水圧上昇の破壊力を緩和する



(注) 図の作成: 永尾浩一(佐藤工業株式会社技術研究所)

3

実験の目的

- 液状化現象は、地下水位の高い砂地盤などの土地で発生しやすい。
- しかし、地盤中に空気が多く存在すると、地震動による水圧上昇に対して空気が縮んでクッションの役割を果たすので、水圧の破壊力を緩和し、液状化を抑制する。
- この原理を利用して、環境汚染がなく、安価で、建物が建ったまま行える液状化対策工法が開発可能なことを示す。

4

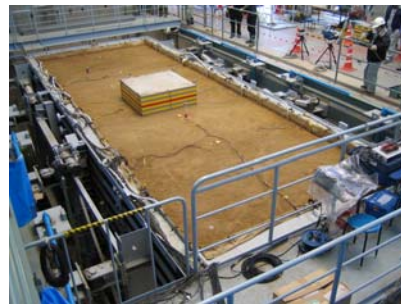
実験の実施体制

実施主体	国土交通省国土技術政策総合研究所 都市研究部
検討委員会	末政 直晃 武蔵工業大学教授(委員長)
	渦岡 良介 東北大学准教授
	岡村 未対 愛媛大学准教授
	二木 幹夫 (財)ベターリビングつくば建築試験センター長
共同研究	飯場 正紀 (独)建築研究所構造研究グループ長
	平出 務 (独)建築研究所主任研究員
	新井 洋 (独)建築研究所主任研究員
	神宮司元治 (独)産業技術総合研究所主任研究員
実施・協力	(財)ベターリビング
	(株)テクノソール 佐藤工業(株)技術研究所

5

実験方法の概要

- 実験装置
 - － 大型せん断土槽
 - ・ 10m × 3.6m × 深さ5m
 - ・ (独)建築研究所所有
- 試験体
 - － 砂地盤、N値6～7程度
 - － 地下水位位置 -0.3m
- 入力振動
 - － 加速度: 50ガル、100ガル、150ガル
 - － 周波数: 2Hz、回数: 20回



中央部に重さ約1.5t/m²の住宅に見立てたおもりを置き、沈下量を可視化

6

マイクロバブル水

- マイクロバブルは、直径数十マイクロメートルの微小な気泡。
- 水と混合した時、長時間水中に滞在し続ける性質。
- マイクロバブル水によって土中に空気を注入する方法は、静かで場所をとらず、実用化にも優れることが期待。



7

仮説と実験計画

1. 仮説
 - 宅地の地盤内に空気を注入することにより、水圧の上昇を抑えて液状化を防止でき、または沈下による建物被害を軽減できるのではないか。
2. 検証実験
 - ゆるい砂地盤の大規模な試験体(N値6~7程度、深さ5m弱)をつくり、この同じ条件の地盤に下部約-5mから「マイクロバブル水(ケースA)」と「脱気水(ケースB)」を注入し、加振して2つのケースを比較した。
3. 予測
 - 加振の加速度を強くしていくと(50gal→100gal→150gal)、ケースBが先に液状化を起こし、ケースAは耐えるはずである。

8

実験結果の概要

80きちり	空気注入を行った地盤			無対策の地盤		
地盤剛性	N値6～7程度			N値6～7程度		
注入した水	マイクロバブル水			脱気水		
推定飽和度 (地表付近)	78%			84%		
入力加速度 (アクチュエーター)	50gal	100gal	150gal	50gal	100gal	150gal
地表付近の 最大加速度	80gal	180gal	300gal	80gal	200gal	160gal
液状化の状況 (地表付近)	せず	せず	液状化	せず	せず	せず
(深い層)	せず	せず	せず	せず	液状化	液状化

※()内は、初期状態からの沈下量

9

地盤・基礎模型の沈下量

土槽下部の加速度	空気注入を行った地盤		無対策の地盤	
	地盤	基礎模型	地盤	基礎模型
50gal	0mm	0mm	1mm	2mm
100gal	15mm	5mm	14mm	7mm
150gal	26mm	55mm	10mm	2mm

(注) 沈下量は、各加振ごとの前後の変化であり、累計でない。基礎模型は地盤面からのめり込み量。
基礎模型は、戸建て住宅のべた基礎を想定し、約1.5t/mのもの。

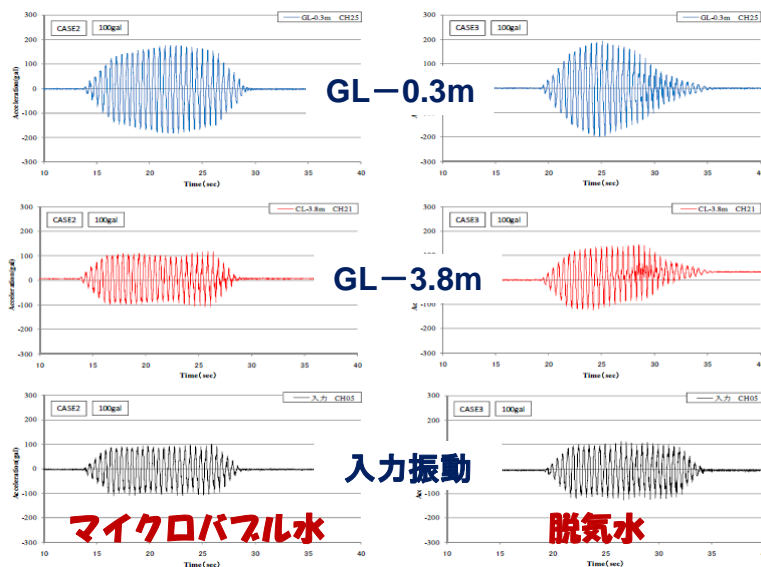
10

外形観察による実験結果

- 外形的には、ほぼ同じ結果が観察された。すなわち、マイクロバブル水と脱気水のどちらも、入力(土槽下部)50galおよび100galでは地表面が液状化せず、150galで液状化が見られた。
- 地盤および基礎模型の沈下量は、マイクロバブル水の方が大きく、かつ150galで50mmを超えた。
⇒ これはなぜか？

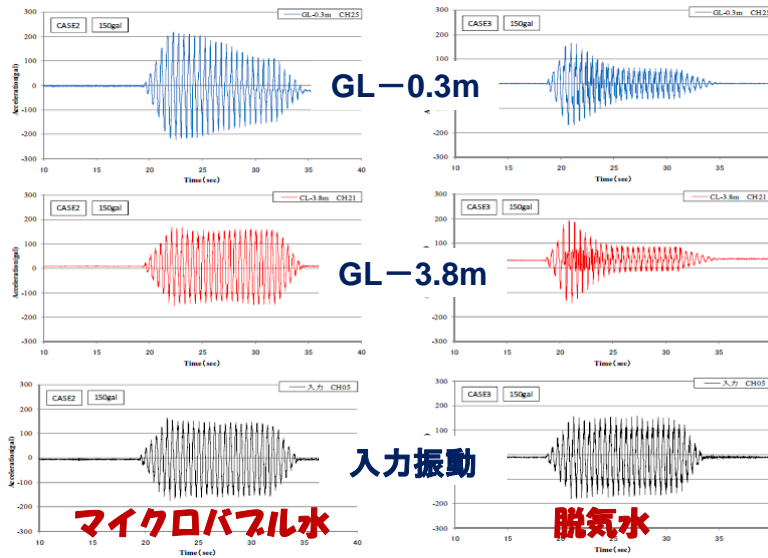
11

加速度の時間変化(100gal入力)



12

加速度の時間変化(150gal入力)



13

推察される地盤内部の様子

		空気注入を行った地盤	無対策の地盤
100gal入力	G.L-0.3m	加速度約180galで一定	加速度が一時的に約200galに達するが、急速に減衰
	G.L-3.8m	加速度約100galで一定	加速度が約100galに達した後徐々に減衰
	考察	地盤が剛性を保った	地盤の中・下部が軟化して上部に力を伝えなくなった
150gal入力	G.L-0.3m	加速度が200galを超えた後徐々に減衰	加速度が急速に減衰し50gal程度で安定
	G.L-3.8m	加速度約140galで一定	加速度が瞬時に減衰し50gal程度で安定
	考察	地盤上部が徐々に液状化	地盤下部が瞬時に液状化⇒地盤自体が「免振」化

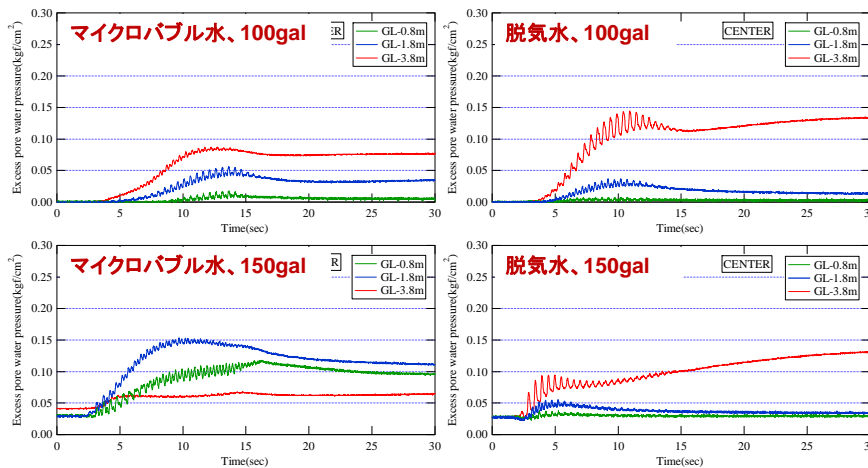
14

過剰間隙水圧比(最大値)

深さ	$\sigma'_{z'}$ Kgf/cm ²	空気注入を行った地盤		無対策の地盤	
		100gal	150gal	100gal	150gal
-0.8m	0.10	0.26	1.23	0.15	0.40
-1.8m	0.18	0.31	0.85	0.20	0.30
-3.8m	0.36	0.25	0.22	0.40	0.37
-4.8m	0.45	0.16	0.18	0.92	0.98
液状化		なし	地盤上部で発生	深い箇所で急速に発生	

15

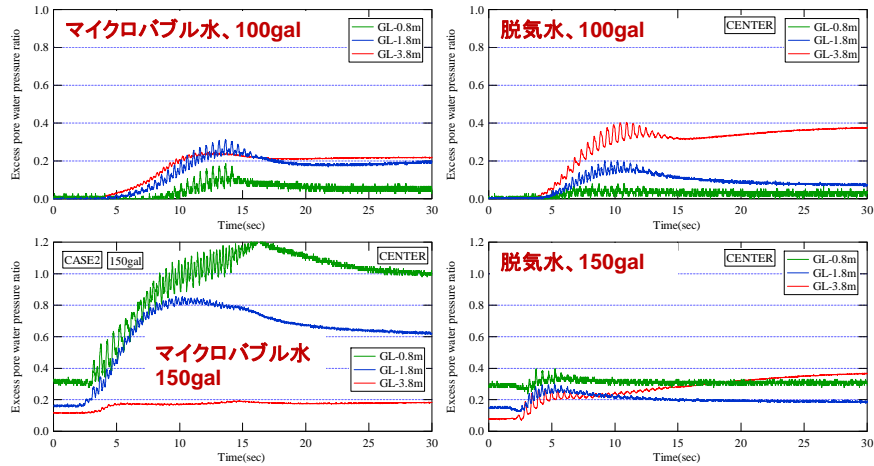
過剰間隙水圧の時間変化



(注)実験は、土槽下部50gal、100gal、150galの順で、同じ試験体を加振をした。

16

過剰間隙水圧「比」の時間変化



(注)実験は、土槽下部50gal、100gal、150galの順で、同じ試験体を加振をした。

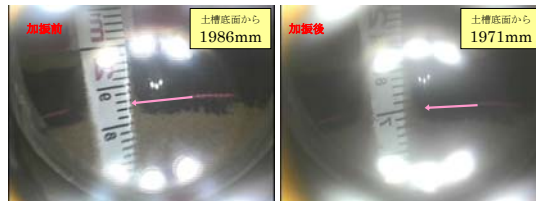
17

観測沈下量

	空気注入を行った地盤			無対策の地盤		
	50gal	100gal	150gal	50gal	100gal	150gal
0m (地表)	(0mm)	(15mm)	(41mm)	0mm	15mm	25mm
-0.8m	1mm	—	52mm	0mm	17mm	30mm
-1.8m	0mm	17mm	35mm	0mm	15mm	29mm
-2.8m	0mm	—	15mm	0mm	15mm	27mm
-3.8m	0mm	—	4mm	0mm	10mm	21mm



(注)・50gal→100gal→150galと順次加振。
・地表の値のみ6地点の平均値。

(注)沈下量は、地盤内に垂直に挿入した透明な筒内からポアホールカメラでの観察による。



18

沈下量の差の原因

	空気注入を行った地盤	無対策の地盤
液状化抵抗	大	小
	浅い(軟らかい)部分が液状化	やや深い(硬い)部分から液状化
		
地盤・建物の沈下量	比較的大	比較的小
加速度への影響	上部液状化による減少(影響小)	下部免震効果による減少(影響大)

19

飽和度と液状化(100gal)

	空気を注入した地盤				無対策の地盤			
	0.8	1.8	3.8	4.8	0.8	1.8	3.8	4.8
深度(GL- m)	0.8	1.8	3.8	4.8	0.8	1.8	3.8	4.8
飽和度(%)	79	83	94	94	81	86	97	100
最大加速度(gal)	180	170	110	100	200	180	140	100
最大せん断応力比	0.29	0.33	0.24	0.22	0.31	0.35	0.27	0.31
最大せん断ひずみ(%)	0.12	0.27	0.58	0.32	0.11	0.24	0.58	2.22
最大水圧比	0.31	0.34	0.25	0.16	0.10	0.22	0.45	0.92
平均水圧比	0.24	0.30	0.25	0.14	0.07	0.20	0.41	0.83
液状化の有無	せず	せず	せず	せず	せず	せず	△	◎

20

飽和度と液状化(150gal)

	空気を注入した地盤				無対策の地盤			
	0.8	1.8	3.8	4.8	0.8	1.8	3.8	4.8
深度(GL- m)	0.8	1.8	3.8	4.8	0.8	1.8	3.8	4.8
飽和度(%)	79	83	94	94	81	86	97	100
最大加速度(gal)	220	260	150	150	170	150	190	150
最大せん断応力比	0.59	0.40	0.36	0.37	0.26	0.33	0.39	0.45
最大せん断ひずみ(%)	1.20	0.82	0.67	0.33	0.15	0.18	0.51	3.36
最大水圧比	1.25	0.84	0.23	0.18	0.42	0.33	0.39	0.89
平均水圧比	1.07	0.82	0.23	0.17	0.38	0.31	0.37	0.83
液状化の有無	○	○	せず	せず	△	せず	せず	◎

21

計測による実験結果

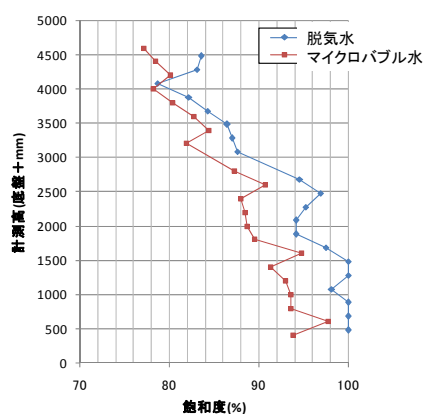
- 飽和度がほぼ100%(空気を含まない)の層では、100galのゆれでも直ちに液状化を発生した。
- 飽和度が80%程度の層では、180gal程度のゆれが連続しても液状化を発生しなかった。
- 液状化に至った場合でも、マイクロバブル水を注入した地盤は発生時期が遅くなる。

⇒ 空気を注入して飽和度を下げることが、液状化の抑止に一定の効果がある。

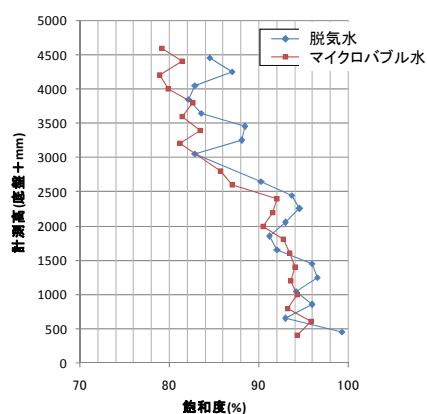
22

試験体の飽和度

試験体中央の位置



やや北寄りの位置



23

マイクロバブル水注入の効果

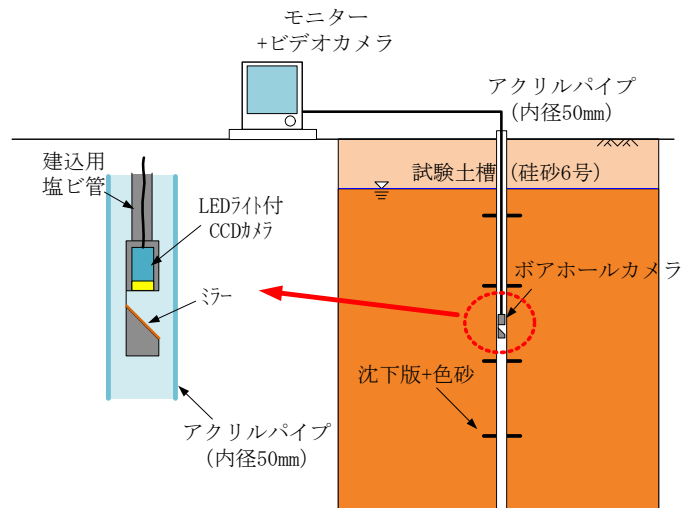
- マイクロバブル水は、1回の注入で数パーセント飽和度を下げる(空気を入れる)効果が認められた。

⇒ 実用化へ向けた課題

- マイクロバブル水の飽和度(空気含有率)の改善
- 実地盤への注入効果
- 空気が止まる耐久性の検証

24

ボアホールカメラによる観察



(注)ボアホール(Borehole)カメラ: 小型CCDカメラと全方位視覚ミラーを組み合わせたもので、ボーリング孔内の観察に用いられる。

ボアホールカメラで見た気泡



26

得られた示唆(1)

1. ゆるい砂地盤(N値=6~7)であっても、空気を多く含む層(飽和度80%程度)では液状化に対する抵抗力が顕著に増加し、最大加速度200ガル程度の揺れに対しても液状化を発生しないことが確認された。
2. ただし、空気を注入して地盤全体の抵抗力を高めると、地震時応答が大きくなり、最終的には相対的に弱い層で液状化が生じた。この弱層が地表面に近かったために、建物沈下量が増大した。
3. 一方、無対策の地盤では、深い層の飽和度が高く、小さな地震動で液状化が発生したが、逆に浅い層への地震入力が減少して建物沈下が小さくなった。

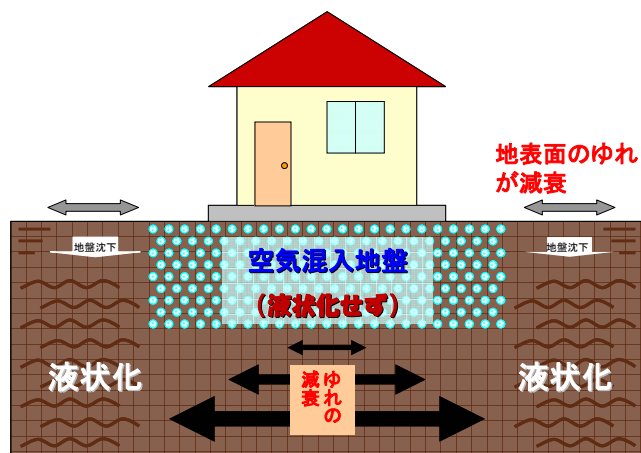
27

得られた示唆(2)

4. 本研究結果は、砂層地盤上の戸建て住宅の場合において、建物まわりの地盤表層部(深度3m程度)に空気を注入して飽和度を下げることにより表層の液状化を防止するとともに、その下層部が液状化することで表層の入力加速度を減衰させ、より大きな地震動に対しても建物被害を軽減させる方法(液状化免震技術)の可能性を示唆している。

28

「液状化免震」の概念図



- ・地盤下部の液状化が、地表面のゆれ(建物のゆれ)を減衰
- ・地盤の空気混入により、建物周りは液状化しない

(注)国土技術政策総合研究所都市計画研究室作成

次年度以降の予定

実用化に近づけるため、以下の研究を予定

1. 耐震性

- 地盤の剛性を違えて複数の加振実験を行い、空気注入法の有効性が高い土質条件等を確認する
- これには、小規模な試験体が可能な遠心力載荷試験装置を用いる予定

2. 耐久性

- 気泡が土中に止まる耐久性を確認するため、実測調査を行う