

## 地盤における今後の展望

# II.

# 液状化に関する最近の動向

真島正人+船原英樹 ●大成建設技術センター

はじめに

「液状化」は、地震時に発生する地盤災害の代表的なものである。液状化により建築物や土木構造物が損傷を受け、社会的・経済的に大きな損害を被る可能性がある。また、液状化による人命被害の事例はないといわれることがあるが、構造物の高層化・大規模化が進んだ現代においては、地盤の液状化が思わぬかたちで人命被害に結び付く可能性も否定できない。したがって、液状化の被害を軽減することに関する社会的関心は高く、活発な研究や技術開発が行われている。本稿では、戸建住宅や集合住宅を含め、液状化地盤に計画される建築構造物の安全性を確保するために有用となる知識を紹介する。

液状化とは

### 1) 液状化する地盤

地震時に液状化しやすい地盤は、地下水位が高く、かつゆるく堆積した砂地盤であるといわれており、人工的な埋立地や比較的最近（約2万年前以降）に堆積した沖積層が該当する場合が多い。埋立地では、砂以外の例えばシルトや礫が多く含まれる地盤でも、液状化が発生する場合のあることが確認されている。

図1は、地盤の断面を巨視的に示しており、液状化地盤の有する上記の主要な属性（①砂が②ゆるく堆積し③地下水があること）を併記している。また、図2に「ゆるく堆積している」とはどういうことかを、「密に締まっている」状態と対比して、微視的な視点で模式的に示している。密に締まっている状態では液状化しにくいのに対し、ゆるい状態では液状化しやすい。

### 2) 液状化のメカニズム

地下水で飽和していることが液状化発生の条件であることをすでに述べたが、逆に地下水がない乾燥した砂は液状化しないということを示したのが、図3である。乾燥砂では、液体である地下水の代わりに、気体である空気が粒子の間隙に存在している。空気は水に比べて圧縮性が高く、流動性も高い。したがって、地震時に地盤が

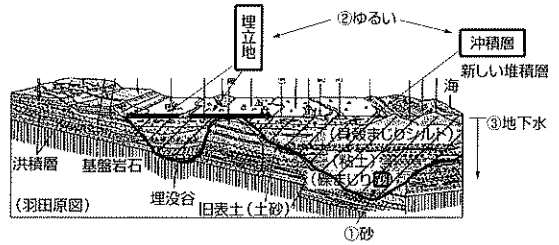


図1 液状化する地盤（文献<sup>1)</sup>の図に加筆）

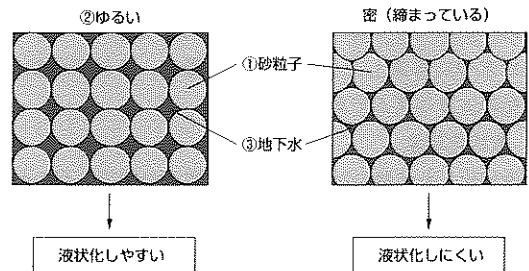


図2 ゆるい状態と密な状態

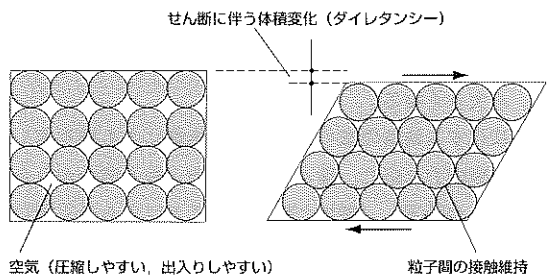


図3 乾燥砂は液状化しない

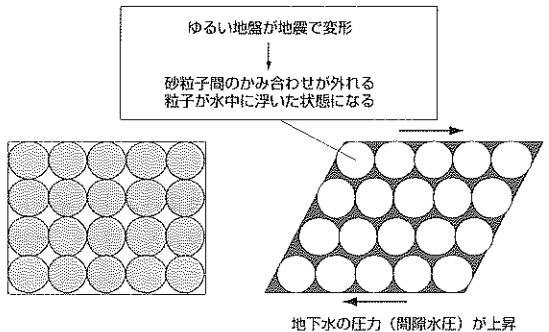


図4 地下水があるから液状化する

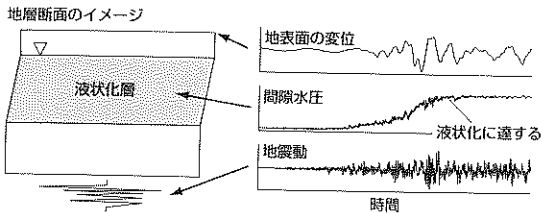


図5 液状化した地盤全体の挙動

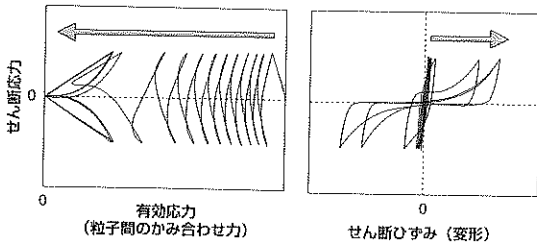


図6 液状化地盤の微小要素の挙動

せん断変形し、それに伴って砂粒子が側方に移動しようとする際、間隙流体が空気であれば粒子は下方の粒子間の窪みに容易に落ち込むことができ、粒子間の接触は維持される。それに対し間隙流体が水であれば、粒子の落ち込みが水により妨げられて、粒子間の接触が外れ、粒子が水中に浮遊した状態になる(図4)。これが液状化発生のメカニズムである。

### 3) 液状化現象

液状化した地盤の挙動を巨視的な視点で図示したのが、図5である。上記の液状化発生の条件を兼ね備えた地盤に下方から地震動が入射すると、飽和した砂層では地下水の圧力(間隙水圧)が徐々に上昇し、ついには上限値(初期有効上載圧)に達して液状化に至る。液状化した層は非常に軟らかくなり、液状化後の地表面の動き(変位)が大きくなる。

液状化する地盤の微小要素では、地震による繰り返しのせん断応力に応じ、徐々に有効応力(粒子間のかみ合わせ力)が低下し、剛性が低下することによりせん断ひずみ(変形)が増大する(図6)。

地盤が液状化すると、地下で圧力の高まった水が砂とともに地表面に噴き出してくる「噴砂」と呼ばれる現象が見られる場合がある。写真①は、砂混じりの水が噴き出したところに残る孔(噴砂孔)の写真である。地下で液状化が発生したことを示す証拠となる現象である。

### 4) 液状化による被害

液状化が発生すると、液状化層は液体のように非常に軟らかくなり、かつ、地盤は大きく揺れる。また、地震後には、土粒子間の水が抜けることによって地盤沈下が生じる。その結果、建物にはさまざまな被害が生じる。図7は、建物に発生する被害のパターンを模式的に示し



①液状化に伴う噴砂の痕

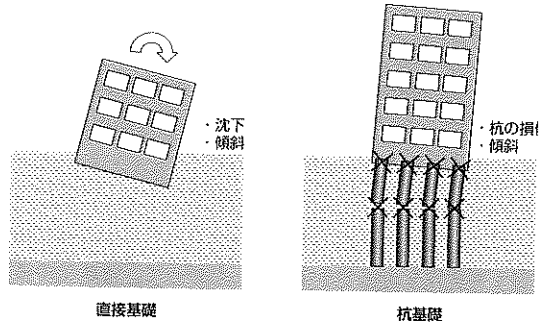


図7 液状化による建物の被害パターン

ている。液状化すると、地盤はせん断強度を失う。その結果、地盤に直接支持させる「直接基礎」形式の建物(大部分の戸建住宅が該当)では、鉛直支持力の喪失に伴う沈下、傾斜、転倒などの被害を生じる。「杭基礎」形式の建物では、杭の周面摩擦抵抗の喪失により鉛直支持力が低下する。あるいは、水平地盤反力の低下により杭に発生する曲げモーメントやせん断応力が増加し、杭が破損して建物の沈下が生じる。

護岸の近くや緩やかに傾斜した地盤では、側方流動とよばれる数mに及ぶ地盤の水平変位が発生し、近傍の建物に被害を与える場合もある。

### 地盤調査と液状化判定

#### 1) 地盤調査と土質試験

建物を計画する際、事前に敷地地盤を調査し、建物の支持地盤としての性能や地震時に液状化する可能性の有無を把握する必要がある。ここでは、液状化の可能性を評価するための調査に絞って紹介する。

通常、建築物が計画されている地盤が液状化するかどうかは、日本建築学会発行の『建築基礎構造設計指針』(以下、基礎指針)<sup>2)</sup>に示されている「液状化判定」により判断する。この液状化判定を実施するために必要な主な調査項目は、標準貫入試験と粒度試験である。標準貫入試験は原位置で行う試験であり、N値と呼ばれる地盤の締まり方の程度などを間接的に示す工学的指標が得ら

表1 液状化判定の例（地下水位3.5m）

深度 (GL-m)	N値	細粒分 含有率 $F_c$ (%)	繰り返し せん断 応力比 $L$	液状化 抵抗比 $R$	液状化 安全率 $F_L$	判定
1.3	5	24	0.23	0.21	対象外	対象外
2.3	7	21	0.22	0.22	対象外	対象外
3.3	6	15	0.22	0.17	対象外	対象外
4.3	10	18	0.24	0.23	0.96	×
5.3	12	13	0.26	0.25	0.94	×
6.3	8	35	0.28	0.20	0.73	×
7.3	9	19	0.29	0.19	0.65	×
8.3	18	14	0.30	0.42	1.41	○
9.3	8	25	0.30	0.18	0.58	×
10.3	13	13	0.31	0.21	0.67	×
11.3	4	76	0.31	0.19	対象外	対象外
12.3	3	85	0.32	0.19	対象外	対象外
13.3	4	92	0.31	0.21	対象外	対象外
14.3	8	68	0.32	0.22	対象外	対象外
15.3	5	84	0.32	0.21	対象外	対象外
16.3	21	9	0.32	0.28	0.88	×
17.3	25	6	0.32	0.26	0.81	×
18.3	30	7	0.32	0.50	1.57	○
19.3	25	15	0.31	0.54	1.71	○
20.3	20	21	0.31	0.34	1.09	○

れる。粒度試験は、原位置で採取した試料を試験室にもち込んで行う室内土質試験の一種であり、砂質土が粘性土かといった土質分類、およびシルト分や粘土分がどの程度含まれているか（細粒土含有率）を把握するのに利用する。その他、液状化の判定に必要な情報としては、地下水位、深さごとの湿潤密度（単位体積重量）がある。人工埋立地盤の土質が粘性土である場合、粒度試験で粘土含有率を、液性限界・塑性限界試験で塑性指数を評価し、液状化の判定に加味する。

一方、細粒土含有率が高くN値が極めて小さい砂質土では、N値と細粒土含有率から求めた液状化抵抗の信頼性は低いといわれている。このような地盤では、コーン貫入試験やPS検層の結果をも併せて参照し、総合的に液状化の可能性を検討することがより合理的な判断につながる。

しかしながら戸建住宅の場合には、コスト面の制約などから標準貫入試験が実施されるケースは少なく、スウェーデン式サウンディング試験と呼ばれる簡便な地盤調査のみ実施するケースが多い。また、最近ではコーン貫入試験（三成分型電気式）が用いられるケースも見られる。

## 2) 液状化判定

基礎指針に基づく液状化判定では、表層20mの各深度に対し、想定する地震動レベルに応じた荷重（繰り返しせん断応力比 $L$ ）と、N値や細粒分含有率から評価される強度（液状化抵抗比 $R$ ）を算出する。次いで荷重に対する強度の比率（強度 $R$ /荷重 $L$ 、一般に $F_L$ 値と呼ばれ

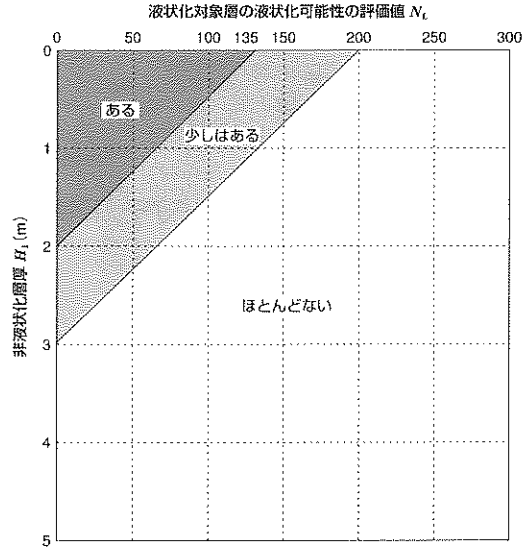


図8 スウェーデン式サウンディング試験に基づく液状化の評価例<sup>9)</sup>

る)を計算し、 $F_L$ 値が1を上まわると「液状化可能性なし」、1以下だと「液状化可能性あり」と判断する。表1に、液状化判定の実施例（マグニチュード7.5、地表面加速度 $350\text{cm/s}^2$ ）を示す。

また、上記の簡便な液状化判定で表層地盤のごく一部が液状化すると判定された場合に、特別な液状化対策が必要かどうかを工学的に判断しなければならない場面が実務では多い。建物の規模や用途によっては、局部的に液状化が発生したとしても、建物全体に及ぼす影響が無視できる場合がある。そのような判断の根拠になり得る指標として、 $D_{cy}$ <sup>1)</sup>や $PL$ <sup>3)</sup>といった表層地盤全体としての液状化程度を評価する指標がある。このうち $D_{cy}$ は、基礎指針で提唱されている指標であり、液状化後の地表面の沈下量として評価される。例えば、 $D_{cy}$ が5cm以下であれば、地盤全体としての液状化程度は「軽微」である、などと判断する。

一方、戸建住宅では、基礎指針の液状化判定に必要な調査や試験が行われるのは稀であり、前述したように簡便なスウェーデン式サウンディング試験のみ行われるケースが多い。そこで、スウェーデン式サウンディング試験に基づいた簡便な液状化判定方法（表層5mが対象）も提唱されている<sup>4), 5)</sup>。この方法では、表層の非液状化層厚と $N_{50}$ に基づく評価値 $N_L$ を用いて判定する（図8）。

加えて、標準貫入試験に比べると簡便に実施できるコーン貫入試験に基づいた液状化判定方法も提案されており<sup>6)</sup>、戸建住宅など軽微な構造物の液状化検討に際して、有望な手法の一つであると考えられる。

## 液状化対策

液状化の可能性のある地盤に建物を建設する場合の対

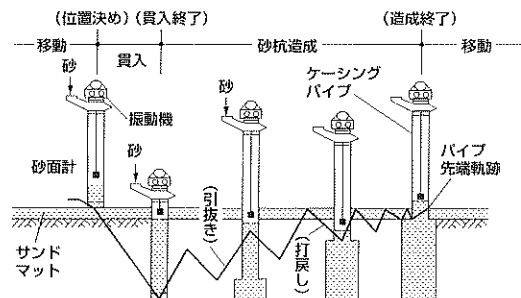


図9 サンドコンパクションパイル工法

策では、液状化の発生そのものを防止する考え方が基本となる。主要な液状化防止工法は、締固め工法と固化工法の二つである。

締固め工法は、液状化しやすいゆるい地盤を密な状態に締め固めることにより、液状化抵抗を高める方法である。サンドコンパクションパイル工法(図9)など、締固め砂杭工法が代表的である。これは、砂などを振動や圧入によって地中に杭状に造成し(これを砂杭と呼ぶ)、砂杭周辺の原地盤を締め固めるものである。

一方、固化工法は、セメント系固化材などを用いて全面的に格子状に地盤改良を施し、固化部分の液状化抵抗を高める方法である。また、固化部分に囲まれた原地盤に作用する地震時繰り返しせん断応力を低減することで、原地盤の液状化を防止する。

これらの液状化防止工法を建築の基礎地盤に適用する際の合理的な設計法が、近年盛んに研究されている<sup>7)</sup>。例えば、締固め工法では、改良地盤を砂杭とその間の地盤(杭間地盤)とで構成される、いわゆる複合地盤として取り扱うことにより、従来の杭間地盤のみを評価対象としてきた設計法をより一層合理化する考え方が提唱されている。また、敷地条件などによって建物周辺に十分な余改良範囲を確保できない場合に、排水性の高いグラベルコンパクションパイルを建物周辺に配置することにより、余改良範囲を合理的に狭くする考え方も提唱されている。余改良の範囲に関しては最新の実験的研究事例を後述する。

一方、液状化は発生するものの、液状化層厚が薄い場合や液状化の程度が軽微である場合、あるいは敷地の広さや建物規模の都合上、有効な液状化防止対策を講ずるための十分なスペースを確保できない場合には、液状化の発生をある程度許容して、基礎の補強対策をとる考え方もある。

最近では、過去の被災事例分析、大型土槽を用いた振動台実験、解析技術の進歩に伴い、液状化地盤中の杭の挙動が解明されつつあり、杭基礎で支持された一般の建

CASE	地盤条件		改良範囲 (層厚Hに対する比)
	改良地盤	未改良地盤	
1	$D_r=60\%$ (一様地盤)	—	—
2	$D_r=90\%$ (一様地盤)	—	—
3	$D_r=90\%$	$D_r=60\%$	0cm (0)
4	$D_r=90\%$	$D_r=60\%$	10cm (H/4)
5	$D_r=90\%$	$D_r=60\%$	20cm (H/2)
6	$D_r=90\%$	$D_r=60\%$	砕石: 5cm (H/8)

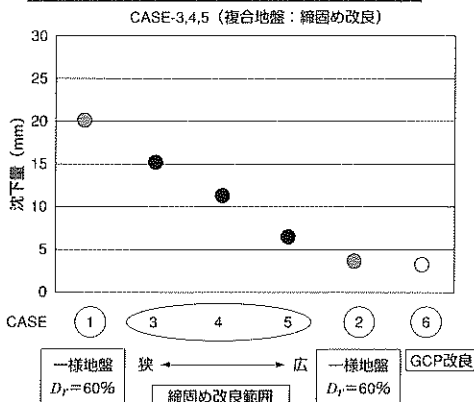
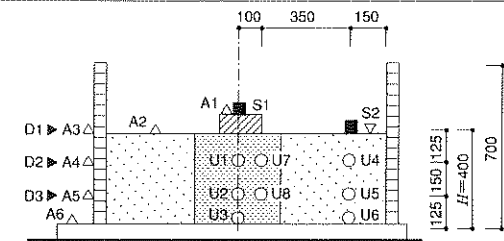


図10 締固め工法の改良範囲に関する模型実験<sup>8)</sup>

物では、液状化層の杭周面摩擦抵抗や水平地盤反力係を低減させ、かつ上部建屋から杭に作用する慣性力にえ地盤の水平変形の影響を考慮したうえで、強固で変能力に優れた鋼管杭などを採用することも多い。

また、戸建住宅では、杭基礎を採用するほか、セメント固化系の表層地盤改良や柱状地盤改良、あるいは強なべた基礎などを採用することにより、液状化が発生した場合でも損傷を最小限に抑える基礎補強対策を講じることが多い。

いずれにしても、液状化をある程度許容した基礎の強対策を採用する場合には、液状化による基礎や建物の損傷の程度や挙動(例えば、杭の応力-変形量、基礎沈下量)を既往の研究成果、過去の被災事例、あるいは後述の有効応力解析などにより予測しておくことが必要である。

#### 最近の実験的研究事例

1) 締固め改良地盤上の直接基礎建物に関する振動実験  
前述したように、締固め工法による液状化対策を建物に施す場合、建物周辺の余改良範囲を合理的に設定することが求められる。信頼性の高い設計を行うため、

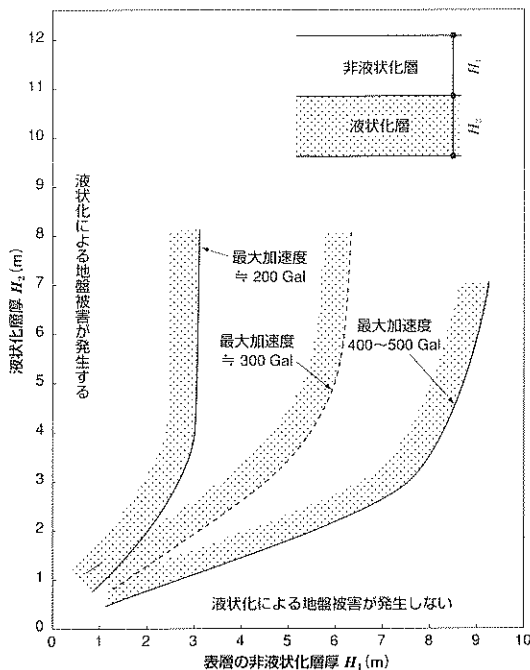


図11 非液化化層厚、液化化層厚と被害発生の関係(石原による)<sup>10)</sup>

験や数値解析を通じた定量的な研究が精力的に行われている。例えば、改良範囲や建物周辺に排水性の高いグラベルコンパクションパイルを配置する工法に関する振動台実験<sup>8)</sup>では、改良範囲を広くするほど直接基礎の沈下量が小さくなること、グラベルコンパクションパイルを建物周囲に配置すれば改良範囲を狭くしても、改良範囲が広い場合と同等の沈下抑制効果が認められること、などが明らかにされている(図10)。

2) 表層の非液化化層厚と被害発生に関する検証例  
 一般に地盤の深部が液化化したとしても、表層にある程度の厚さの液化化しない層が存在すれば、地表面には顕著な影響が及ばない。戸建住宅のように比較的軽微な構造物の敷地地盤が深部の液化化によって被害を被るかを判断する指標として、石原<sup>9)</sup>が提案したチャート(図11)が参照される場合があった。このチャートは、表層の非液化化層厚と深部の液化化層厚、および想定する地震動のレベルによって規定されている。

都市基盤整備公団では、このチャートと比較的最近の地震被害例とを照らし合わせて再検証を行っている<sup>10)</sup>。その結果、地表面の加速度レベルで200~300cm/s<sup>2</sup>相当の中地震(日本海中部地震、鳥取県西部地震)では、被害が発生したのは表層の非液化化層が2m以下である場合に限定されており、600cm/s<sup>2</sup>相当の大地震(兵庫県南部地震)では6m以下である場合に限定されていることが示されている。これらの結果は石原のチャートと整合しており、その妥当性を示唆しているといえる。

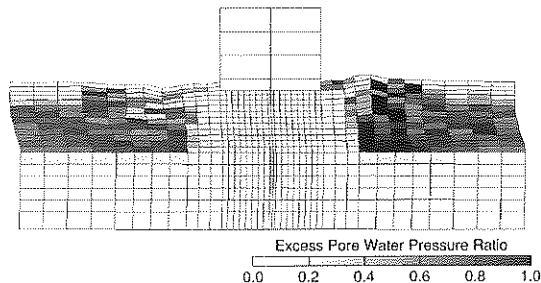


図12 液化化解析例(建物直下を締め改良した事例)

### 有効応力解析

近年、コンピュータを用いて液化化現象をシミュレートする有効応力解析手法(液化化解析手法)が盛んに開発され、実用化されている。液化化する地盤の主要な属性である地下水の存在を考慮し、地震時のせん断変形に伴って砂粒子のかみ合わせが外れることにより、有効応力が低下しせん断剛性が低下する複雑な現象を評価することができる。

この解析手法を用いれば、液化化地盤と建物との一体的な挙動を評価することができ、液化化地盤における耐震設計の信頼性を向上させることができる。図12は、締め固め工法による液化化対策を施した地盤に建つ杭基礎建物の解析例である。黒くなっている部分の地盤が液化化していることを示している。液化化対策を施した建物直下は液化化せず、それに伴って杭基礎に発生する応力が小さくなることなどが評価できる。

### まとめ

地盤の液化化現象と液化化地盤に建つ建築構造物に関して、一般的知識および最新の研究動向の一部を紹介した。液化化する可能性のある地盤で住宅の建設を計画される読者の一助になれば幸いである。

(まじま まさと、ふなはら ひでき)

### 【参考文献】

- 1) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説，p.22，2004年6月
- 2) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2001年
- 3) 岩崎敏男，龍岡文夫，常田賢一，安田進：地震時地盤液化化の程度予測について，土と基礎，Vol.28，No.4，pp.23-29，1980年
- 4) 小規模建築物のための液化化マップと対策工法，ぎょうせい
- 5) 二本幹夫：液化化マップと戸建住宅，基礎工，1997年11月
- 6) 鈴木康嗣ほか：地震時の液化化事例とコーン貫入試験結果の関係，日本建築学会構造系論文集，第571号，pp.95-102，2003年
- 7) 日本建築学会：「建築基礎のための地盤改良設計指針作成にあたって」シンポジウム資料，2003年11月
- 8) 倉崎，吉富，安達，原田，山田：締め固め改良地盤の改良範囲と沈下挙動に関する研究(円形せん断土槽を用いた振動台実験)，日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)，20261，pp.521-522，2005年9月
- 9) Kenji Ishihara：Stability of natural deposits during earthquakes，Proc. 11th ICSMFE，San Francisco vol.1，pp.321-376，1985
- 10) 都市基盤整備公団：宅地耐震設計マニュアル(案)，2003年3月