

# 宅地耐震設計における地盤の液状化評価法に関する研究

## Risk Evaluation of Soil Liquefaction for Earthquake Resistant Design of Residential Land

技術監理部 技術管理課  
専門役 人見 孝

### 概要

宅地は、地震、洪水、土砂災害等さまざまな災害の危険にさらされる可能性があるが、地震災害に関しては、宅地造成の過程において一定の対策を講ずることが最大の防止措置となるため、造成時の適切な耐震設計が非常に重要となる。

宅地の安全性への社会的要求が高まるなか、平成11年度から3ヵ年にわたり、宅地耐震設計マニュアル検討委員会（委員長：東京理科大学石原研而教授）を開催し、宅地耐震の設計法、評価法等の検討を行った。本稿は、このなかの液状化評価法に関する研究成果の一部をとりまとめたものである。

キーワード：耐震設計、液状化、安全性

### はじめに

平成7年1月17日兵庫県南部地震が発生し、近年類のない大地震による被害を経験することになり、社会全体に大きな衝撃を与えた。

震災以降、各機関による大掛かりな被害実態調査が行われ、この調査結果に基づき大地震における各構造物の耐震設計手法の検討が積極的に行われてきた。

公団においても、従来の中規模地震対応の設計マニュアルを改訂すべく、委員会を立ち上げ、大地震にも対応した宅地耐震設計法、評価法の検討を行ってきた。

本稿は、このなかの宅地地盤の液状化判定法、評価法に関し、過去の地震被害事例の検証も行い、とりまとめたものである。

なお、本稿における中地震（レベル Ⅱ）、大地震（レベル Ⅲ）の定義は以下のとおりである。

中地震：宅地又は当該宅地を敷地とする建築物等の供用期間中に1～2度程度発生する確率を持つ一般的な地震動

大地震：発生確率は低いが直下型又は海溝型巨大地震に起因するさらに高いレベルの地震動

### 1. 地震による地盤の液状化現象と宅地被害

地盤の液状化とは、一般に地盤の浅部の飽和状態にある緩い砂質土が地震時の振動により砂粒子間に存在する間隙水の水圧が上昇し、砂粒子間のかみ合わせがはずれてしまう現象のことを言う。地盤の液状化が発生すると砂粒子は水の中に浮いた状態となり、せん断抵抗力を失ってしまうため、地盤は支持力を失い、盛土や構造物の荷重により大きな沈下を生じさせたり、地盤の側方流動が発生することもある。

液状化による被害は、一般に液状化現象により地盤そのものが液状化破壊を起こす場合の他、地盤の液状化に起因して各種構造物が変形・破壊を受ける形態として現れる場合が多い。これらを大別すると以下のようなになる。

#### 1) 水平移動（側方流動）

護岸などのように、偏土圧を受ける構造物において、液状化により水平抵抗力の不足が生じ、水平方向への変状が生じるものである。道路・護岸等の線状構造物が蛇行した例が特徴的である。

## 2) 構造物の傾斜、転倒、沈下

過剰間隙水圧の発生によるせん断抵抗力の低下に起因し、地盤の支持力が失われ、構造物が不安定となり、構造物の傾斜、転倒、沈下の被害が生じる。新潟地震の県営アパートの倒壊は典型的な例である。

## 3) 構造物の浮き上がり

軽量の地中構造物が液状化した土砂の浮力によって持ち上げられる現象で、マンホールや浅く設置した小規模の地中タンク等に多く見られる。

## 4) 土構造物の崩壊

盛土がのり尻部の液状化によって安定を失い、変状、破壊した例や、アースダムの浸潤線以下の盛土部が液状化し、変形、破壊した例がある。

## 2. 液状化の判定法

一般に地震時に地盤が液状化するかどうかを検討する判定法には、表-1に示すように種々のものがある。

表 - 1 液状化判定方法の種類、概要および適用性

(出典：「土木構造物の耐震設計ガイドライン(案) - 耐震設計基準作成のための手引き -」、土木学会、2001年9月)

判定法の種類	判定法の細分		判定法の概要	判定法の適用性
概略判定法	微地形分類		地形、地質をもとに判定する。	簡易ではあるが精度は低い。
	液状化履歴		過去に液状化した場所は再液状化しやすい。	液状化しないことの判定はできない。
簡易判定法	限界N値		地下水位、粒度、N値などをもとにして判定する。	ボーリング調査結果だけで判定できる。港湾の基準のように高度なものもある。
	F <sub>L</sub> 法	地表面深度から簡易的にせん断応力を推定	簡易的に求められたせん断応力と実験式などに基づき、N値などから求められた液状化強度を比較する。	指針等に多用される方法。
		応答計算によりせん断応力を推定	最大せん断応力と、実験式などに基づき、N値などにより求められた液状化強度を比較する。	簡易法の最大せん断応力を計算により求めた分精度が高くなっている。
詳細判定法	全応力法	F <sub>L</sub> 法	最大せん断応力と、液状化強度試験で求められた液状化強度を比較する。	液状化強度も試験値を用いるので精度が高くなる。
詳細判定法		過剰間隙水圧発生予測	せん断応力時刻歴より、過剰間隙水圧の発生量を予測する。	F <sub>L</sub> 法が最大せん断応力のみに着目しているのに対し、せん断応力の時刻歴も使っているだけ精度は高い。特別な解析コードが必要。
		過剰間隙水圧消散予測	過剰間隙水圧の発生量を入力とし、透水方程式を解いて過剰間隙水圧の消散解析を行う。	グラベルドレーンなど、特殊な場合に用いられる。
		有効応力法		有効応力法による地震応答解析を行う。
実験的判定法	模型実験	振動台実験	振動台を用いて模型地盤の地盤・構造系の加振実験を行う。	特殊なケースのみに用いられる。相似則に注意を要する。
		遠心力载荷実験	遠心力载荷実験装置を用いて模型地盤や地盤・構造物系の振動実験を行う。	特殊なケースのみに用いられる。相似則が満足れる。
	原位置実験		原位置で加振実験を行う。	液状化を起こさせることが困難。費用が多く掛かる。

1) 概略判定法

a) 地震被災履歴調査

各事業の計画段階において、過去の地震等による地盤の被災履歴に関する情報を得ることは問題箇所を抽出するために重要である。このため、基本計画および耐震設計のための調査計画等は、この被災履歴調査を活用して行うことが望ましい。

液状化被災履歴の調査方法としては以下に示すものがある。

イ) 住民からの聞きこみ調査や空中写真により把握する方法

ロ) 地震被害報告書や古文書を調べる方法

イ)の方法は、近年の地震による液状化履歴を調べる方法として、ロ)の方法は、精度は劣るがかなり昔までさかのぼる方法として適用できる。ロ)の方法により西暦416年以降の我が国における液状化履歴地図が作成されている(「日本の地盤液状化履歴図」(若松加寿江:東京大学出版会,1991年))。

また、地方自治体では国の地域防災計画に基づいた地震被害想定が実施されており、こうした情報も問題箇所を抽出するための資料として有効なため、計画段階で入手しておくことが望ましい。

b) 微地形区分による予測

地盤の液状化の可能性については、表-2および表-3に示すように周辺地形等からも簡易に予測する方法が提案されており、こうした方法を活用することもできる。

c) 地盤特性からの予測

地震時に液状化を生じやすい地盤の条件として一般に以下の条件が挙げられる。

イ) 地下水位が浅いこと

ロ) 緩く堆積した砂質土の層が存在すること

ハ) 砂質土の成分が粒径の揃った細砂や中砂であること

より具体的な判断基準は、液状化判定法を規定する基準類によって若干考え方が異なるが、「建築基礎構造設計指針」((社)日本建築学会,2001年10月)によれば、液状化の判定を行う必要のある飽和土層は、以下の条件に該当するものとしている。

イ) 一般に地表面から20m程度以浅の沖積層で、細粒分含有率が35%以下の土

ロ) 粘土分含有率(0.005mm以下の粒径を持つ土粒子)が10%以下、または塑性指数が15%以下の埋立あるいは盛土地盤

ハ) 細粒土を含む礫や透水性の低い土層に囲まれた礫

また、建築物基礎の設計に際して留意すべき、地震時に液状化のおそれのある地盤として「2001年版 建築物の構造関係技術基準解説書」(国土交通省住宅局建築指導課,日本建築主事会議,(財)日本建築センター,国土交通省建築研究所,平成13年3月)には以下の条件が示されている。

イ) 地表面から15m以内の深さにあること

ロ) 砂質土で粒径が比較的均一な中粒砂等からな

表-2 微地形区分による液状化予測方法

(出典:液状化地域ゾーニングマニュアル(平成10年度版、国土庁防災局震災対策課、平成11年1月))

地盤表層の液状化可能性の程度					微地形区分
グレード1	グレード2				
	レベル1地震動		レベル2地震動		
液状化の検討を要する地域	大	液状化の可能性は大きい	極大	液状化の可能性は非情に大きい	埋立地、盛土遅、旧河道、旧池沼、ポイントバー、砂泥質の河原、人工海浜、砂丘間低地、堤間低地、湧水地
	小	液状化の可能性は小さい	大	液状化の可能性は大きい	自然堤防、湿地、砂州、後背低地、三角州、干拓地、緩扇状地、デルタ型谷底平野
	極小	液状化の可能性は極めて小さい	小	液状化の可能性は小さい	扇状地、砂礫質の河原、砂礫州、砂丘、海浜、扇状地型谷底平野
要しない地域	無	可能性無し	無	可能性無し	台地・段丘、丘陵地、山地

(注1) ・ここで言う盛土遅とは、崖・斜面に近接した盛土遅、低湿地・干拓地・谷底平野の上の盛土をさす。これ以外の盛土遅は、盛土前の微地形区分と同等に扱う。

(注2) ・自然堤防のうち、自然堤防縁辺部、比高の小さい自然堤防等、地下水位が高い部分(G.L.2m~G.L.-3m以浅)は液状化の可能性を1ランク高く評価する。

・砂丘のうち、砂丘末端斜面や辺土地など、地下水位が高い部分(G.L.-2m~G.L.-3m以浅)は液状化の可能性を2ランク高くする。

・台地・段丘上でも凹遅部分などで地下水位が高い場合は、液状化の可能性がある。

表 - 3 微地形分類基準

(出典：液状化地域ゾーニングマニュアル(平成10年度版、国土庁防災局震災対策課、平成11年1月))

微地形区分		判読の際の分類基準		
分類	細分類	地形的位置、特徴	形態	主な土地利用
谷底平野	扇状地型谷底平野	古期岩盤の山地、砂礫層の丘陵地	縦断勾配のやや急な谷底	畑、水田
	デルタ型谷底平野	未固結岩石の丘陵地、台地	縦断勾配の緩やかな谷底	水田
扇状地	扇状地(沖積錐を含む)	河川の谷底、山麓部	扇状~円錐状、平均縦断勾配1/100(0.57°)程度以下	果樹円圃、桑畑、畑
	緩扇状地	同上、または扇状地の末端部	扇状~円錐状、平均縦断勾配1/100(0.57°)程度以下	畑、水田
自然堤防	自然堤防	現・旧河川の流路沿い	帯状またはパッチ状の微高地	畑、桑畑、集落
	自然堤防縁辺部	低地一般面と自然堤防の境界部	同上。微高地のうち比高1m以下の部分。	畑
	比高の小さい自然堤防			
蛇行州(ポイントバー)	蛇行河道の凸岸側にできる堆積地形	河道に沿って湾曲した帯状または半円状の微高地	水田	
後背低地		自然堤防・砂州・砂丘の背後	沼沢性起源の低地	水田
旧河道	新しい(明瞭な)旧河道	低地域の全般、過去の河川流路の跡	帯状凹地。一般面よりの比高0.5~1.0m	水田、荒地
	古い(不明瞭な)旧河道	同上	帯状凹地。比高0.5m以内で不明瞭	水田
旧池沼		過去の池沼の跡	凹地または平坦地	水田、荒地
湿地		低地域のうち排水不良地、湧水地点付近、旧河道	同上	同上
河原	砂礫質の河原	扇状地型谷底平野・扇状地における現河道の流道沿い	平坦。流水に覆われることのある複地中流部	荒地、果樹園
	砂泥質の河原	デルタ型谷底平野・低地一般面における現河川の流道沿い	同上。下流部	荒地、畑、水田
三角州(デルタ)		河川の河口部	起伏に乏しい	水田
砂州(浜堤砂礫を含む)	砂州*	海岸、湖岸沿い	汀線に平行な微高地	針葉樹林、畑、荒地、集落
	砂礫州	同上	同上	同上
砂丘	砂丘	海岸、河岸	小丘の集合体、一般面との比高3m~4m以上	針葉樹林
	砂丘末端緩斜面	同上、砂丘の縁辺部	比高3m~4m以下	畑、集落
海浜	海浜	海岸地域の堤外地	海岸の波打ち際の砂地	海浜
	人工海浜	同上	同上。人工的なもの	同上
砂丘間低地・堤間低地		砂丘間、砂州間	比較的平坦	畑、水田
干拓地		沿岸地域、湖水地形や水面を干して陸地化した土地	平坦地、規則正しい地割り	水田
埋立地		海域などの水面を一般面と同じ高さまで埋め立てたもの	平坦地	工場地、宅地
湧水地点(帯)		扇状地末端部、砂丘縁辺部、断崖部、旧河道、湿地、天井川に沿った堤内地		湿地、水田
盛土地			低地において1m以上の盛土	宅地

砂州、砂礫州：空中写真だけでは判定困難。

盛土地：ここでいう盛土地とは、崖・斜面に隣接した盛土地、低湿地・干拓地・谷底平野上の盛土地を指す(すなわち、地下水位が高いと想定されるもの)。これ以外の盛土前の地形の区分と同等に扱う。

段丘：本表は沖積層の微地形分類のため、段丘層は記載していないが、斜面に隣接した地下水位が高いと想定される段丘については液状化の可能性があるので、段丘も分類するものとする。

ること

- 八) 地下水で飽和していること
- 二) N値がおおむね15以下であること

## 2) 簡易判定法

以下に示す地盤情報を用いて予測する方法である。この方法は、液状化判定の簡易手法として最も一般的に行われているもので、施設ごとに各機関で基準化されている。

- 土層構成
- 地下水位
- N値
- 土の湿潤密度
- 粒度特性(細粒分含有率 $F_C$ 、平均粒径 $D_{50}$ )

簡易法は以下に示す「限界N値法」と「 $F_L$ 法」に大別される。

### イ) 限界N値法

所定の深度で測定された飽和砂層のN値が、定められた限界N値と比較して小さい場合に液状化の可能性があると判定する方法。砂層の粒度特性を判断に加える方法もある。「港湾の施設の技術上の基準」(1979年版)や「建築基礎構造物設計指針」(1974年版)に示された方法が典型であるが、これらの方法は、その後の基準類の改訂によって現在ではあまり用いられていない。

### ロ) $F_L$ 法

$F_L$ 法は地盤の液状化抵抗比 $R$ と地震によって地盤内に生じるせん断応力比 $L$ との比で定義される液状化抵抗率 $F_L (= R / L)$ で液状化の可能性を判定する方法である。基準類によって地盤の液状化抵抗比 $R$ とせん断応力比 $L$ の求め方に特徴があり、「建築基礎構造設計指針」の方法や「道路橋示方書・同解説 耐震設計編」((社)日本道路協会,平成14年3月)の方法等が代表的である。

液状化抵抗率 $F_L$ は次式により算定するものとする。 $F_L$ が1.0以下となる土層は液状化するものと判定することができる。

$$F_L = \frac{R}{L}$$

ここに、

- $F_L$  : 液状化抵抗率
- $R$  : 液状化抵抗比
- $L$  : 繰返しせん断応力比

なお、限界N値法、 $F_L$ 法による判定法については、マニュアルに詳細を示しているので参照されたい。

## 3) 詳細法

液状化抵抗率 $F_L$ を算定するにあたって、不攪乱試料を用いた繰返し非排水三軸試験等から液状化抵抗比 $R$ を求め、地震応答解析等からせん断応力比 $L$ を求める方法である。簡易法で評価することが困難な土質を判定する場合や、簡易法で液状化すると判定される地盤に対して、より詳細な評価を行う場合等において実施することが望ましい。なお、詳細法では、簡易法に必要な地盤情報に加え、以下のものが必要となる。

- 初期せん断剛性
- 動的変形特性 ( $G \sim$  ,  $h \sim$  関係)
- 液状化抵抗比

この他、有効応力に基づく地震応答解析を実施することによって地震中に地盤に発生する過剰間隙水圧やせん断応力、せん断ひずみ等を予測し、さらに詳細な判定を行うこともできる。こうした解析には、より多くの地盤情報等が必要となるが、地盤の非線形性が卓越する大地震の検討を行う場合等においては有効である。

また、地盤内に発生する繰返しせん断応力比 $L$ の算定には、地震時の地表面水平最大加速度  $a_{max}$  を設定する必要がある。マニュアルでは「建築基礎構造設計指針」に示されている液状化抵抗率 $F_L$ の算定方法を標準としたため、以下の値を標準としている。

- 中地震(損傷限界検討用) :  $200 \text{ cm} / \text{s}^2$  (gal)
- 大地震(終局限界検討用) :  $350 \text{ cm} / \text{s}^2$  (gal)

このため、 $F_L$ の算定をその他の基準類に準拠して行う場合は、それに整合した地表面最大加速度を設定する必要がある。また、耐震設計に考慮すべき具体的な想定地震が地域防災計画等で設定されている場合や、周辺の活断層等の調査が実施されており、その調査結果をもとに想定地震を設定する場合は、地震応答解析等の適切な方法で算定したせん断応力比 $L$ や地表面最大加速度を液状化判定に用いることができる。

マニュアルでは、地盤の液状化の可能性は、上記の簡易法のうち $F_L$ 法により判定することを標準とした。ただし、簡易法のみで地盤の液状化を判定することが困難な場合等においては、詳細法や有効応力に基づく地震応答解析による検討を行うことが望ましい。

### 3. 液状化による影響の判定

ここでは、戸建住宅用地を想定した地盤の液状化による影響の判定方法について示す。

地震時に液状化すると予測される地盤においては、液状化の程度や地表面への影響等を適切な方法で判定する必要がある。

通常、宅地地盤の地表面付近には、地下水以浅の不飽和土層や粘性土層等、液状化の恐れのない土層が存在する。このため、地震時にその下の飽和砂質土が液状化した場合においても、表層の非液状化層の存在によりその影響が地表面に及ばないこともある。

本研究において、過去、地震における地盤の液状化により、地表部への噴砂現象、家屋等への被害状況が把握されている日本海中部地震（中地震）、鳥取県西部地震（中地震）、兵庫県南部地震（大地震）を検討対象に、液状化現象が生じた地点の地盤特性と地表部への影響について検証を行った。

検証内容については、次章に概略を示すが、検証結果として図 - 1の液状化の影響が地表面に及ぶか

否かを判定する境界線を設定することができた。

図 - 1に示す曲線関係は、中地震および大地震において、地表面付近に噴砂や噴水、クラック、不同沈下等の変状が生じるか否かの境界を示すものである。すなわち、それぞれの想定地震に対して、液状化層厚と非液状化層厚の関係が曲線の右側に位置する場合、地表面における地盤の変状は生じず、左側に位置する場合は何らかの変状が生じることを示す。

また、図 - 1により液状化被害の評価を行う場合の非液状化層（ $H_1$ ）及び液状化層（ $H_2$ ）の設定方法を図 - 2に示す。

なお、図 - 1に示す関係は、既往の限られた地震被害記録等をもとに設定したものであるため、対象とする地盤の液状化層厚と非液状化層厚の関係が境界付近に位置する場合は、より詳細な検討を追加して判断することが望ましい。

また、地盤に側方流動が生じない水平地盤を対象としているところに留意する必要がある。

地盤の液状化に対する一般的な検討の流れを図 - 3に示す。

この他に側方流動を生じない水平な宅地地盤を対

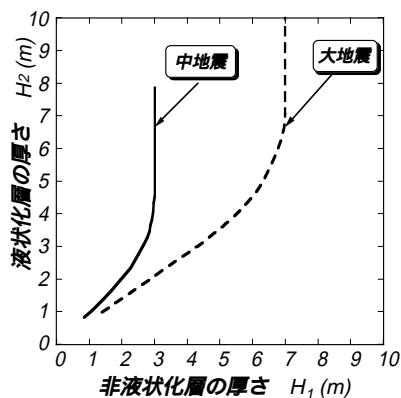


図 - 1 液状化の影響が地表面に及ぶか否かを定める非液状化層 $H_1$ と液状化層 $H_2$ の関係

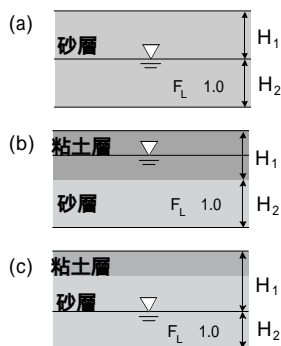


図 - 2 非液状化層 $H_1$ および液状化層 $H_2$ の設定方法

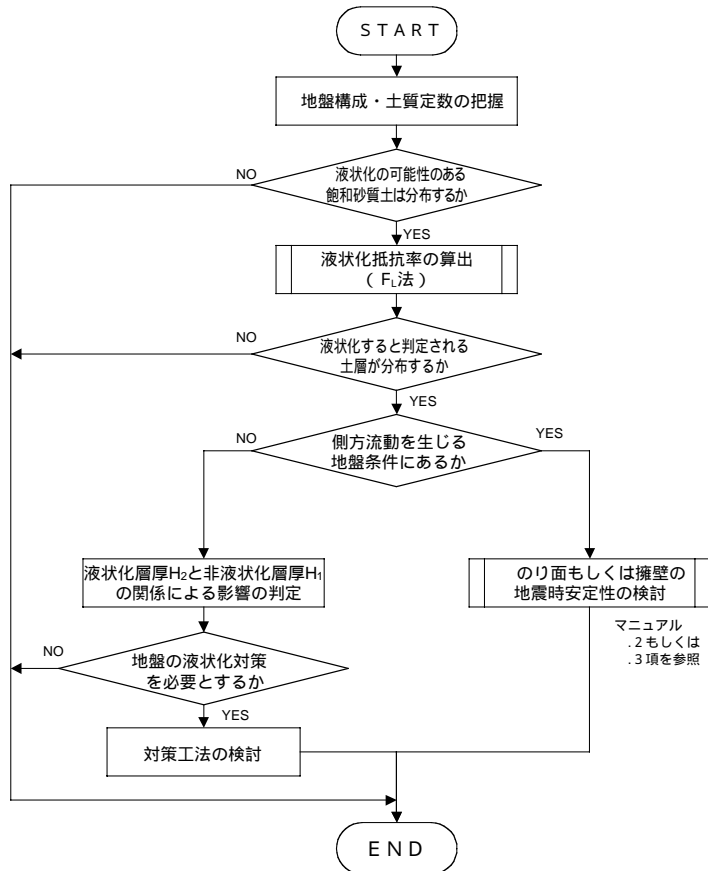


図 - 3 地盤の液状化に対する検討の一般的な流れ

象とした液状化による地盤変状の判定指標として、次式に示す液状化指数 $P_L$ 等があり液状化層厚と非液状化層厚の関係と併せて、適宜、使い分けるとよい。

液状化層厚と非液状化層厚の関係および $P_L$ を用いて地盤の液状化を判定した事例をマニュアルの参考資料に示しているので参照されたい。

$$P_L = \int_0^{20} F \cdot W(z) dz$$

ここに、 $P_L$ ：液状化指数

$$F = 0.0 \quad (F_L > 1.0 \text{ の場合})$$

$$F = 1 - F_L \quad (F_L \leq 1.0 \text{ の場合})$$

$$W(z) = 10 - 0.5z$$

$Z$ ：深度 (m)

また、 $P_L$ による液状化判定区分を表-4に示す。ここで、 $P_L$ を用いて大地震時における液状化の影響を判定する場合、戸建住宅の甚大な被害を防止するという観点から、少なくとも $P_L = 20$ を満足する必要があると考えられる。

表-4  $P_L$ による液状化の判定区分

(出典：「液状化地域ゾーニングマニュアル(平成10年度版)」、国土庁防災局震災対策課、平成11年1月)

区分	液状化の影響の程度	$P_L$ 値	
		(レベル1地震動)	(レベル2地震動)
(a)	液状化による影響は小さい	$0 < P_L \leq 5$	$0 < P_L \leq 5$
(b)	液状化による影響が大きい	$5 < P_L \leq 15$	$5 < P_L \leq 20$
(c)	液状化による影響が非常に大きい	$15 < P_L$	$20 < P_L$

また、液状化による戸建住宅等の不等沈下の発生要因は、液状化後の過剰間隙水圧消散に伴う地盤の一樣沈下や液状化時の過剰間隙水圧上昇に伴う地盤のせん断剛性の低下からくる建物荷重によるめり込み沈下等が挙げられる。

これらの沈下の予測は、変形解析の領域となり、近年、研究が進められているが、戸建住宅を例にとった場合の許容変形量の設定と解析結果の精度に課題があり、一般的な設計、評価法として定着するには、一定の時間を要すると思料される。

本研究では、鳥取県西部地震で発生した、地盤の液状化による戸建住宅の不等沈下の詳細を調査し、建物の実際の不等沈下量(建物の傾斜角)と解析による建物沈下量(めり込み沈下量)の推計値との検証も行った。

結果としては、液状化による地盤のせん断剛性の低下率を $F_L$ 値、 $F_c$ 値(細粒分含有率)をパラメータとして設定することで、実際の建物沈下量を解析により、近似することができたので、別稿で報告することとした。

#### 4. 中・大地震における液状化層厚、非液状化層厚と地震被害の検証

これまで表層の非液状化層( $H_1$ )と深部の液状化層( $H_2$ )の関係について、図-4に示す石原らの研究により、地表面最大加速度別に被害の想定がなされてきている。

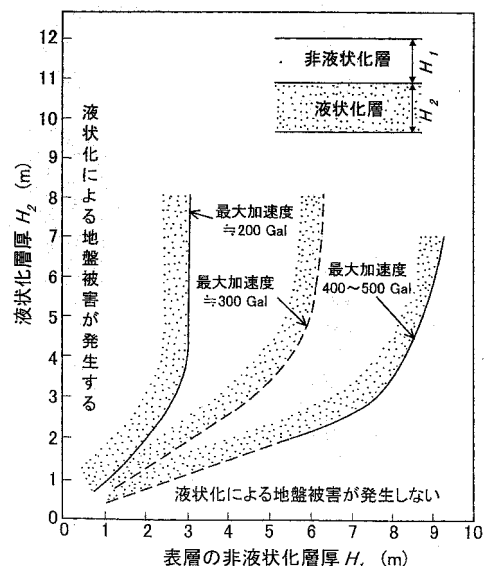


図-4 表層の非液状化層( $H_1$ )と深部の液状化層( $H_2$ )との相関(石原)

今回の研究において検証を行った内容は以下のとおりである。

1983年5月の日本海中部地震(マグニチュード7.7)による中地震相当(200gal相当)の $H_1$ 層と $H_2$ 層の関係について、東北工業大学浅田教授が詳細に調査、検証を行っており、非液状化層厚 $H_1 = 2$ mで顕著な建物被害がみられないとの分析結果を得ている。

ここでは、この分析結果について「道路橋示方書・耐震設計編(平成8年版)」に基いて、設計水平震度 $K_h = 0.2$ として再計算し検証を行った。

また、2000年10月の鳥取県西部地震(マグニチュード7.3)において液状化被害を受けた地区では、278gal(約300gal)相当の液状化被害があった。

この被害については、地元自治会等により被害実

態調査がおこなわれており、委員会活動のなかでも建物の不等沈下の詳細調査及び30箇所以上に及ぶ地下水水位調査も行い、 $H_1$ 層と $H_2$ 層の関連について検討を行った。

さらに、1995年1月の兵庫県南部地震（マグニチュード7.2）における大地震時の $H_1$ 層と $H_2$ 層の関係について「兵庫県南部地震で液状化した地盤の特性に関する研究（東京電機大学 安田教授指導）」論文を用いて検討を行った。

この大地震時の液状化層の推測は、ほぼ実際の噴砂、噴水現象を示しており、400gal、500gal、600gal相当の解析値として整理されていたので、これらを検証に用いたものである。

以上の中地震2事例の $H_1$ 層と $H_2$ 層の相関を図-5に、大地震1事例のそれを図-6に示す。

日本海中部地震における平成8年版の道路橋示方書・耐震設計編による中地震の検証では、当時の道路橋示方書による結果と大差はなく、200gal相当で非液状化層2m以上の地点において建物被害が顕著でないことが明らかとなった。

また鳥取県西部地震のA地区における検証でも、日本海中部地震と同様に300gal相当で非液状化層厚2m以上の地点において建物被害が顕著でないことが同様に、明らかとなった。

しかし、従来の石原らの $H_1$ 層と $H_2$ 層との相関から200gal相当で非液状化層厚（ $H_1$ ）を3m以上としており、また、地下水位には季節変動もあることから、マニュアルでは、中地震での検証は、安全側に

$H_1$  3mが望ましいとした。

つぎに兵庫県南部地震における大地震の検証では、600gal相当で非液状化層厚（ $H_1$ ）6m以上の地点において噴砂、噴水現象が見られなかったが、これも安全側に考慮し $H_1$  7mを建物被害が顕著でない領域とし新たに採用した。

## むすび

地盤の液状化による建物への被害に関しては、宅地造成段階で完全に被害防止対策を講ずることが理想であるが、建築費用とのトータルコスト面において、集合住宅、商業・業務施設等においては、宅地造成段階では、一定の水準に止め、地盤情報を建物設計側に伝達し建物基礎構造で対応する場合が合理的な場合もある。

また、建物基礎での対応の徹底が困難な戸建住宅用地では、中・大地震における地盤の性能を宅地造成の段階で適切な水準にしておくことが求められる場合もある。

今回の研究は、主に後者の性能水準の検討を目的に実施したものである。

しかしながら、どちらの場合においても、宅地造成サイドによる、液状化の適切な判定、評価技術が求められることになることから、今後、街づくりの各場面において、本研究成果が有効に活用されることを願う次第である。

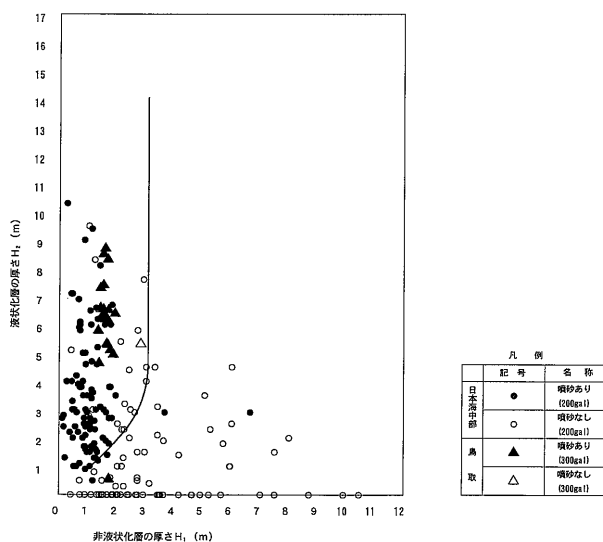


図-5 表層の非液状化層（ $H_1$ ）と深部の液状化層（ $H_2$ ）との相関（中地震）

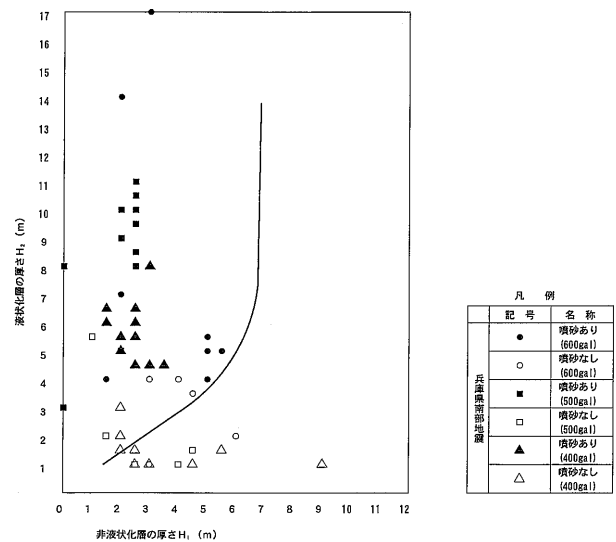


図-6 表層の非液状化層（ $H_1$ ）と深部の液状化層（ $H_2$ ）との相関（大地震）



## 謝辞

今回の研究活動は3ヵ年の長期間にわたるものであり、石原委員長、安田副委員長をはじめとした委員会関係各位、現地調査、資料収集、解析等を担当したワーキンググループの各位、また、鳥取県西部地震の被害事例調査にご協力を頂いた地元自治会および関係者各位に深謝する次第である。

## 引用文献等

1. Ishihara, K. : Stability of Natural Deposits during Earthquakes, 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.1, pp.321-376, 1985
2. 浅田秋江：住宅の液状化被害の簡易予測法とその防止、1983年日本海中部地震15周年記念誌、1998年
3. 宅地造成技術、上巻P529～P531、(社)全国住宅地協会連合会・(社)日本宅地開発協会、平成11年7月