

造成盛土の地震時滑動崩落に対する安全性評価

地震時滑動崩落 大規模盛土造成地 側方抵抗モデル

太田ジオリサーチ 正会員 太田英将

1.はじめに

2011 年の東日本大震災では、仙台市だけでも 4,000 箇所以上の宅地が地震時滑動崩落現象により被災した。これと同様の現象は、1995 年の阪神・淡路大震災時に多く発生し、2004 年新潟県中越地震、2007 年新潟県中越沖地震でも発生した。都市化が進行した我が国において、地震の活動期となった今、この現象の発生予測は「災害を予防」という意味において重要である。

『地盤調査法』の改訂において、2006 年の宅地造成等規制法の改正後に創設された宅地耐震化推進事業における大規模盛土造成地の変動予測を書き加えた。造成地盛土の危険性を事前に評価する手法は、まだ十分標準化されているとは言えないが、現在試みられているいくつかの方法の評価結果と、新しい実効性の高い調査方法について紹介する。

2.災害を予防するという意味

造成地盛土が地震時にまとまったユニットとして地すべりの変動を発生させることは、1995 年兵庫県南部地震に関する釜井らの研究によって明らかとなっていたが、その詳細な地盤工学的な解釈やモデル化は未だ達成されていない。しかし、防災の目的は、事前に容易に得られる情報によって危険を予測し、事前に対策することによって災害を回避することにあるので、これまでの事例研究等によって得られた知見で「最善の防災」を達成することが重要である。詳細な調査・解析を厳密に行うことの重要性は否定しないが、被災してしまった時点で防災としては敗北である。

3. 仙台市太白区緑ヶ丘周辺地区の危険度予測結果の評価

東日本大震災で被災した仙台市太白区緑ヶ丘地区周辺は、1978 年宮城県沖地震での被災事例データで滑動崩落予測モデル検証のための作業が行われていた地域のひとつであった。図らずも、東日本大震災前に複数の方法で危険度予測が行われていたことになる。その際に用いられた危険度予測は、以下の 3 つの手法による。

- (1)国交省ガイドラインの点数法
- (2)釜井らによる数量化解析の方法 (一種の点数法)
- (3)太田らによる側方抵抗モデル

いずれの方法も 1995 年兵庫県南部地震の阪神地区のデータセットで骨子が組み立てられたものである。(3)については国土院によって、2004 年新潟県中越地震、2007 年新潟県中越沖地震の被災事例を追加して修正が加えられた。

表-1 に、事前予測結果との対比を一覧表にして示す。これは、現地踏査を実施し、地すべりの有無(単なる変状の有無ではなく、引張亀裂・圧縮変状の組み合わせや連続性により認定)と、評価結果を対比させたものである。

この表から明らかなように、事前予測に関しては(3)の側方抵抗モデルが最も良い予測結果となっていることがわかる。逆に(1)ガイドラインの点数法は変動盛土の予測をほとんど外している。この傾向は、中越地震の長岡市の事例、中越沖地震の柏崎市の事例での評価結果と同様である。

表-1 事前予測結果と実現象との比較

盛土ユニット	変動有無	仙台市太白区緑ヶ丘周辺の予測結果一覧表			備考
		(1) ガイドライン点数法 変動確率	(2) 数量化解析法 変動確率	(3) 側方抵抗モデル 変動指数	
1 緑ヶ丘3丁目北側	変動	4%	28%	1.19	1978年地震で大変動(釜井ら)発生し、1978年地震で変動せず
2 緑ヶ丘3丁目南側	変動	2%	28%	0.88	1978年地震で大変動(釜井ら)発生し、1978年地震で変動せず
3 緑ヶ丘4丁目	大変動	68%	92%	0.61	1978年地震で大変動(釜井ら)発生し、1978年地震で変動せず
4 青山2丁目	大変動	-	-	-	盛土が抽出されていない。1978年は変動せず
5 大ヶ町	変動せず	16%	41%	1.11	隔壁変動のみ。1978年は変動せず
6 恵和町上部	変動	6%	28%	1.00	1978年地震で変動せず
7 恵和町中部	変動	16%	13%	1.01	1978年地震で変動せず
8 恵和町最下部	大変動	22%	64%	0.86	盛土が抽出されていない。1978年は変動せず
9 松が丘	大変動	-	-	-	盛土が抽出されていない。1978年は変動せず
10 青山1丁目上部	変動	-	-	-	盛土が抽出されていない。1978年は変動せず
11 青山1丁目中部	変動	7%	13%	1.15	1978年地震で変動せず
12 青山1丁目下部	変動	41%	92%	0.84	1978年地震で変動せず
13 緑ヶ丘1丁目上部	変動せず	7%	21%	1.13	3/27~30調査
14 緑ヶ丘1丁目下部	変動せず	2%	21%	2.07	1978年地震で大変動(釜井ら)発生し、1978年地震で変動せず
15 砂押町上部	変動せず	4%	35%	1.08	3/27~30調査
16 砂押町下部	変動せず	7%	21%	1.30	1978年地震で変動せず
17 緑ヶ丘2丁目上部	変動せず	7%	28%	1.10	3/27~30調査
18 緑ヶ丘2丁目下部	変動せず	10%	28%	1.50	1978年地震で大変動

表示区分			
大変動	50%以上		1.0未満
変動	30~50%		1.0~1.2
変動せず	30%未満		1.2以上

4.現実的な宅地盛土調査方法 (スウェーデン式サウンディング+土層強度検査棒)

被災地においては学術的な研究などで、詳細な地質調査、土質試験、数値解析などが行われる。しかし、それらはすべて「事後」であり、災害の予防という観点で言えば「遠い将来への投資」である。防災は「今」の問題であり、宅地を購入する時、あるいは家屋を建築する時に、普通に行われる地盤調査で危険性を評価する方法が求められている。

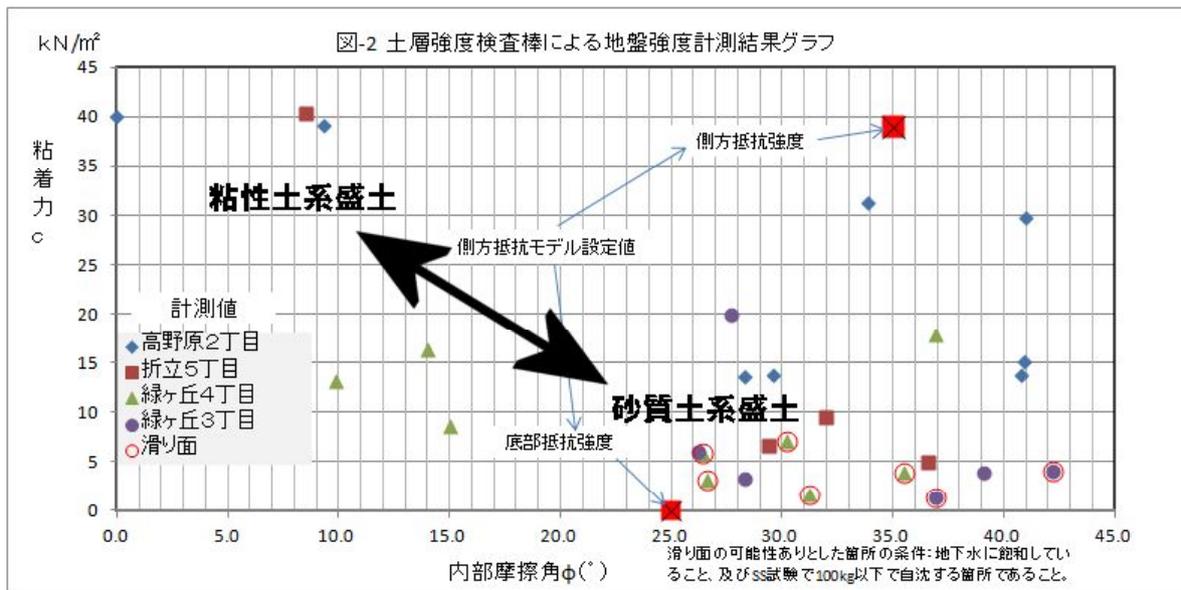
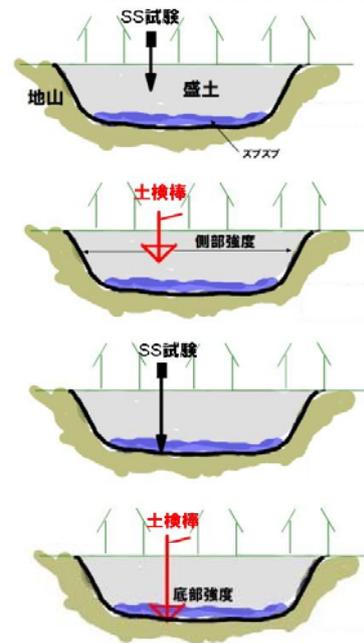
事前評価結果と実現象との対比で、側方抵抗モデルの的中率が高かったことは、そのモデルに必要な地盤情報を得ることが有益であることを示唆している。特にすべり面を形成していると考えられる盛土最下部の地中洗掘により緩んだ部分の強度を簡易に得ることができれば、有益な情報となるはずである。また盛土内の強度は側方抵抗の強度として活用することも可能となる。

東日本大震災で変動した仙台市内の宅地盛土において、簡易に強度（ c 、 ϕ ）が計測できるツールとして、（独）土木研究所で開発された土層強度検査棒を用いて盛土地盤強度取得を行った。ただし、盛土表面部は締め固められており、人力挿入型の土層強度検査棒を挿入することができないため、スウェーデン式サウンディング（SS）試験でつくられる穴を利用し挿入した（図-1参照）。

調査手順としては、SS試験で盛土内の概略強度を把握し試験箇所を定め、近くに別のSS試験を行って、所定の深度で土層強度検査棒による c 、 ϕ 測定を行った。

仙台市内の変動盛土で実施した計測値を図-2に示す。すべり面の可能性がある箇所を選定条件は、(1)地下水に飽和していること（過剰間隙水圧が発生する可能性がある）、(2)SS試験で100kg以下で自沈する箇所であること（緩い地盤であること）、の両者を満たす箇所とし、図中に赤○で示した。それ以外の箇所は、滑り面とはなりえない箇所、すなわち側方抵抗と同等と考えられる箇所である。

図-1 SS試験と土層強度検査棒の併用調査法



また図中には、これまでの地震で発生した事例で、側方抵抗モデルを用いた時に、変動盛土・非変動盛土の的中率が最も高くなる標準値を示した。

すべり面となる可能性のある箇所の強度値は、粘着力が小さい特徴があり、側方抵抗モデルの標準値はその下限値付近にあることが分かる。また側方抵抗強度は粘着力 c が大きいことが特徴であり、標準値はそれらの上限値付近にあることが分かる。実現象が発生した宅地盛土において、側方抵抗モデルの標準値の概ねの妥当性が確認できたことは、事前に調査を行えば、滑動崩落に対する危険度評価が可能となることを示唆している。

現在は、宅地地盤調査でSS試験を実施することはルーチンワーク的になっており、それに土層強度検査棒を追加することはあまり労力・調査費用の増大にはつながらず、実現性・実効性が高いと考えられる。

5.まとめ

防災では、災害発生後に研究的に行われるような詳細調査・解析を行うことは労力面・コスト面から期待できない。通常行う程度の調査・情報収集で危険度を評価することが重要である。現時点では、側方抵抗モデルにおける盛土形状に基づいた評価と、SS試験＋土層強度検査棒による地盤強度測定との組み合わせによって、滑動崩落の危険性を評価する方法が最も現実的手法と考えられる。なお、仙台市域での東日本大震災後の調査は、京都大学防災研究所釜井俊孝教授の調査団の一員として実施した。

造成盛土の地震時滑動崩落 に対する安全性評価

有限会社太田ジオリサーチ 太田英将

第47回地盤工学研究発表会(八戸) 第5会場
DS-9 防災・環境・維持管理に役立つ最新の地盤環境調査法
2012年7月14日(土)午後Iの部(13:00~)
7分/1題

事前評価が
必要な理由

被災後の負担と補償(1) 被災者生活再建支援法(2007)

表2 被災者生活再建支援法による支援金の支給額

支給額は、以下の2つの支援金の合計額となる		・住宅の被害程度→罹災証明	
(※ 世帯人数が1人の場合は、各該当欄の金額の3/4の額)		・宅地に対する補償→なし	
① 住宅の被害程度に応じて支給する支援金(基礎支援金)			
住宅の被害程度	全壊	解体	長期避難
支給額	100万円	100万円	50万円
② 住宅の再建方法に応じて支給する支援金(加算支援金)			
住宅の再建方法	建設・購入	補修	賃貸(公営住宅以外)
支給額	200万円	100万円	50万円
※一旦住宅を賃借した後、自ら居住する住宅を建設・購入(又は補修)する場合は、合計で200(又は100)万円			

補償

全壊の人が家を建て変えれば
最大300万円

これでは全然足りないの

負担

二重ローン
→生活崩壊

事前評価が
必要な理由

被災後の負担と補償(2)

資産価値低下リスク(被害が実際にあった箇所)

内藤武美(2011); "造成宅地の被災と土地価格との関連", Evaluation, No.42, pp.34-52

地価下落

表4 新潟県中越地震後の長岡市における固定資産評価額の時点修正率

H16.10 災害	H17.1.1~H17.7.1 (半年間)	H17.7.1~H18.7.1 (1年間)	H20.1.1~H20.7.1 (半年間)	H20.7.1~H21.7.1 (1年間)	備考
高町2丁目	▲10.3%	▲8.8%	0	▲1.5%	震災影響大
高町4丁目	▲10.3%	▲8.1%	0	▲1.5%	震災影響大
乙吉町	▲8.0%	▲1.9%	▲1.9%	▲2.6%	震災影響大
鉢伏町	▲3.5%	▲2.5%	▲0.5%	▲2.5%	震災影響小

H16.10地震

柏崎市の被災箇所は2~3倍程度の下落率

表5 新潟県中越沖地震後の柏崎市における固定資産評価額の時点修正率

H19.7 災害	H17.1.1~H17.7.1 (半年間)	H17.7.1~H18.7.1 (1年間)	H20.1.1~H20.7.1 (半年間)	H20.7.1~H21.7.1 (1年間)	備考
山本	▲1.5%	▲1.7%	▲4.0%	▲4.8%	震災影響大
橋場町	▲1.5%	▲2.0%	▲5.0%	▲4.8%	震災影響大
松波2丁目	▲2.0%	▲2.2%	▲5.0%	▲7.6%	震災影響大
緑町	▲1.7%	▲2.5%	▲2.0%	▲4.0%	震災影響小

H19.7地震

※固定資産評価の時点修正率は、(財)資産評価システム研究センターの全国地価マップによる。

<http://www.chikamap.jp/search/search.asp>

3

事前評価が
必要な理由

被災後の負担と補償(3)

危険宅地の継承(負の遺産相続)



平成7年1月



平成20年5月

仮に、阪神淡路大震災で変動した宅地を、整地しただけで、特別な安全対策せず建売し、その住宅が次の地震で同じ被害を受けた場合、いったい誰が悪いのか？

左は、1995年に盛土の滑動崩落現象により大きく変動した宅地であるが、約10年後には同じ場所に分譲住宅が建てられている。手続き上は、地耐力さえ満たされれば無対策でも建築できる場所である。

仮に無対策だった場合には次の大地震時に1995年と同様の被害を受ける確率が高いといえる。

谷埋め盛土の滑動崩落現象とは



OHTA-GEO

あさひ団地A地区(福島市)



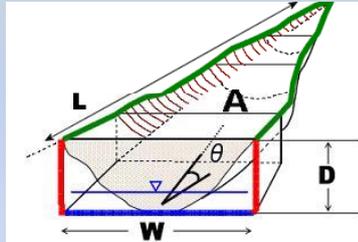
(大規模)造成地の谷埋め盛土部のみが強震動をきっかけに滑動する現象



容易に得られる情報のみで 事前予測できなければ意味が無い！

- 容易に得られる情報とは盛土の外形的特徴

1. 平面積
2. 幅
3. 長さ
4. 深さ(開発前地形と開発後地形との差)
5. 地山傾斜角(開発前地形図より)



学問的に厳密であっても
事前評価の実現性が乏し
ければ意味がない

事前予測に有望な3つの診断方法

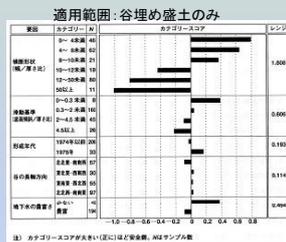
以下の3手法は、入力データ(外形情報)がほぼ同じ項目かつ同じ精度

国交省ガイドライン
点数法

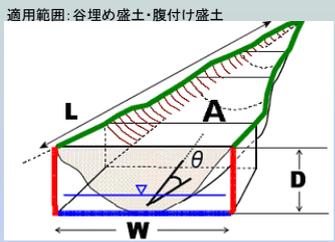
適用範囲: 谷埋め盛土のみ

盛土高さ(m)	盛土幅(m)	盛土幅/盛土高さ	築地山の形状(度)	地下状況
3以下	2以下	0.5以下	5以下	5 あり
3~6	20~30	3	5~10	4 なし
6~12	30~50	5	10~15	2
12以上	120以上	10	15以上	0

釜井ら数量化解析法
(一種の点数法)



太田・榎田の
側方抵抗モデル



阪神・淡路大震災のデータセットでの正答率は87~89%

他地域(柏崎市)に適用して診断精度を検証

う〜ん... (X)

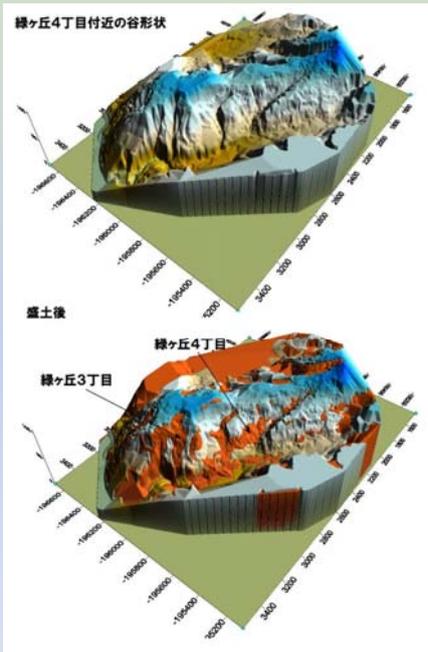
いまいち... (△)

GOOD! (◎)

東日本大震災の予測結果でも同じ傾向になった

“写真測量技術を使った大規模造成宅地の地盤脆弱性評価”(2009, 写真測量学会投稿中)小荒井・中埜・星野・吉武(国土地理院)・太田(太田ジオリサーチ)より

事前予測と実際の現象の比較



仙台市太白区緑ヶ丘周辺の予測結果一覧表 (1) (2) (3)

盛土ユニット	変動有無	ポイント法 変動確率	数量化解析法 変動確率	側方抵抗モデル 変動指数	備考
1 緑ヶ丘3丁目北側	変動	4%	28%	1.19	1978年地震で大変動対策あり(柱・井戸)
2 緑ヶ丘3丁目南側	変動	2%	28%	0.88	1978年地震で大変動対策あり(柱)
3 緑ヶ丘4丁目	大変動	68%	92%	0.61	1978年地震で大変動対策なし
4 青山2丁目	大変動	-	-	-	盛土が掘出されていなし、1978年は変動せず
5 大トヤ町	変動せず	16%	41%	1.11	1978年は変動せず
6 恵和町上部	変動	6%	28%	1.00	
7 恵和町中部	変動	16%	13%	1.01	1978年地震で変動せず
8 恵和町最下部	大変動	22%	64%	0.86	
9 松が丘	大変動	-	-	-	盛土が掘出されていなし、1978年は変動せず
10 青山1丁目上部	変動	-	-	-	盛土が掘出されていなし、1978年は変動せず
11 青山1丁目中部	変動	7%	13%	1.15	
12 青山1丁目下部	変動	41%	92%	0.84	1978年地震で変動せず
13 緑ヶ丘1丁目上部	変動せず	7%	21%	1.13	3/27~30調査
14 緑ヶ丘1丁目下部	変動	2%	21%	2.07	1978年地震で大変動対策あり(柱)
15 砂押町上部	変動せず	4%	35%	1.08	3/27~30調査
16 砂押町下部	変動	7%	21%	1.30	1978年地震で変動せず
17 緑ヶ丘2丁目上部	変動せず	7%	28%	1.10	3/27~30調査
18 緑ヶ丘2丁目下部	変動	10%	28%	1.50	1978年地震で大変動

表示区分

大変動	50%以上	1.0未満
変動	30~50%	1.0~1.2
変動せず	30%未満	1.2以上

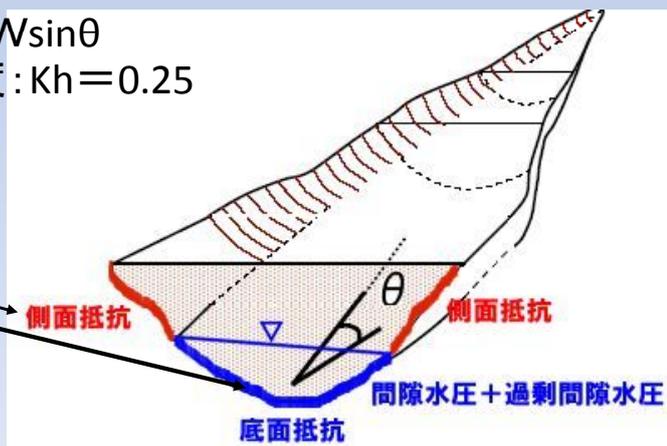
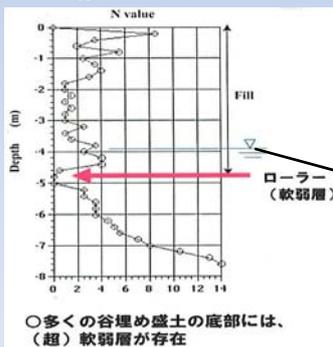
- ①「大規模盛土造成地の変動予測調査ガイドラインの解説」の点数法
- ②『斜面防災都市』釜井・守隨の数量化解析モデル
- ③側方抵抗モデル(太田・榎田モデル)＝国土地理院モデル＝ガイドラインにも参考として記載

事後評価でない初の事例

側方抵抗モデル(ローラスライダーモデル)とは 一種の3次元安定計算

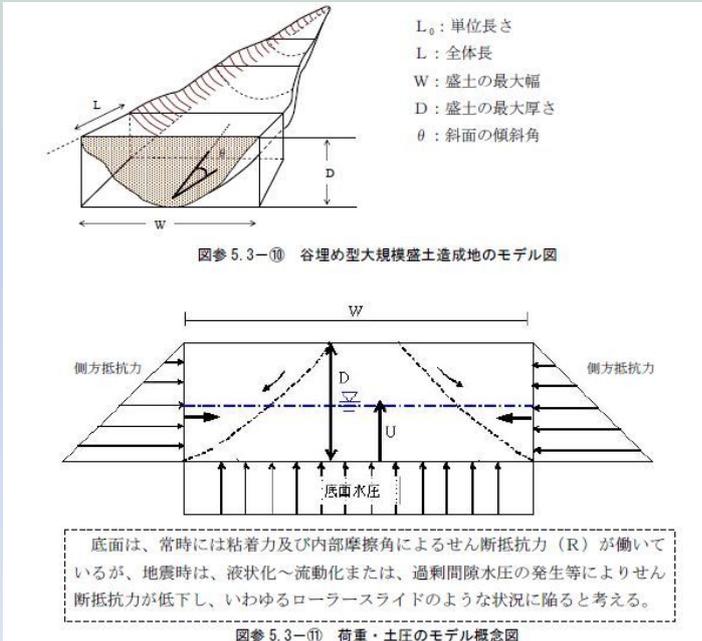
- Σ 抵抗力:
 - ①底面抵抗力: 過剰間隙水圧が作用する
 - ②側面抵抗力: 過剰間隙水圧の影響は小さい
- Σ 滑動力:
 - ①重力による接線力: $W \sin \theta$
 - ②地震による水平震度: $Kh = 0.25$

$$F_s = \frac{\Sigma \text{抵抗力}}{\Sigma \text{滑動力}}$$



側方抵抗モデルのパラメータ

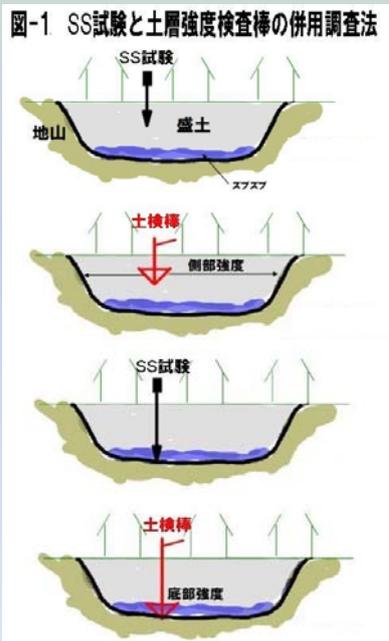
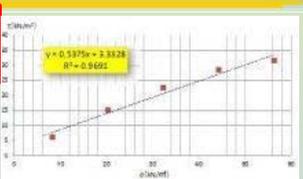
阪神地域・柏崎市・長岡市の事例でキャリブレーションされた値



過剰間隙水圧高(m)	3.0
水の単位重量(kN/m ³)	9.8
単位体積重量(kN/m ³)	18.0
側面粘着力(kN/m ²)	39.0
側面内部摩擦角(°)	35.0
底面粘着力(kN/m ²)	0.0
底面内部摩擦角(°)	25.0
側方土圧係数	0.5
水平震度kh	0.25

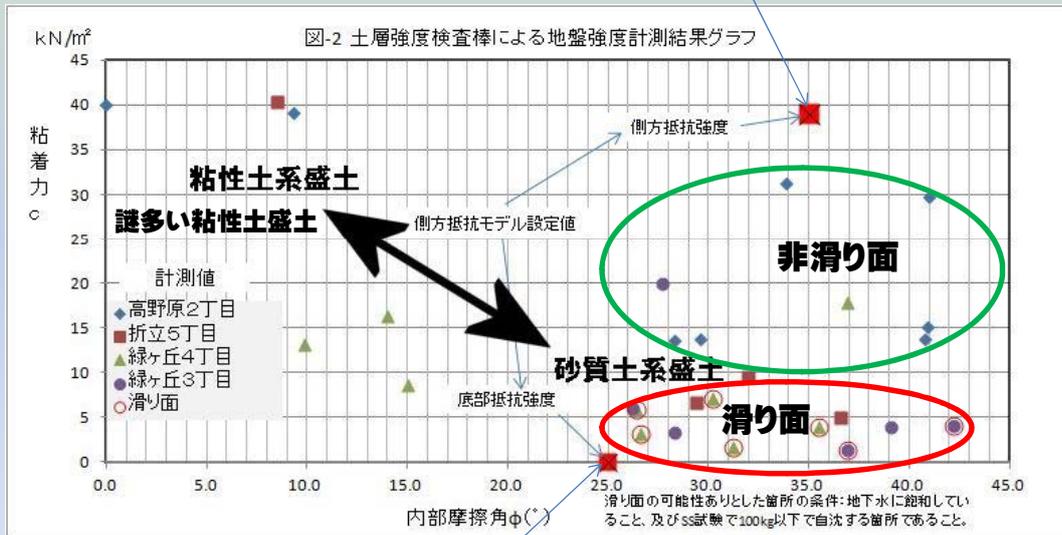
重要！
このパラメータは統計値であり、盛土の土質強度と対応するのかわからない。

実際に計測してみる (土層強度検査棒; 土研開発)



測定結果

側面粘着力(kN/m ²)	39.0	(10~30kN/m ²)
側面内部摩擦角(°)	35.0	(28~41°)



	統計値	実測値
底面粘着力(kN/m ²)	0.0	(0~7kN/m ²)
底面内部摩擦角(°)	25.0	(26~42°)

**滑動崩落滑り面の特徴
粘着力が失われていること**

13

まとめ

- 谷埋め盛土の地震時滑動崩落に対する危険度予測は、事前に得られる簡易な情報で行わなければならない。
- 上記は、東日本大震災における仙台市の滑動崩落事前評価結果から、側方抵抗モデルで可能であることがわかった。
- 側方抵抗モデルの統計的土質強度パラメータは、実測値でも妥当性が確かめられた。
- 滑動崩落の滑り面となる箇所の土質的特徴は、「粘着力が失われていること」と考えられる。

14