

(131) ライフライン解析のための地震時地盤沈下量の推定

神戸大学大学院 学生員 田邊揮司良
神戸大学工学部 正員 高田 至郎

1. まえがき 地震時の地中構造物被害の原因として、地震動はもちろんのこと、地盤沈下、地滑り、液状化などの地盤変状による影響が極めて大きいことが明かとなっている。しかし、地震時地盤変状量については、未だ十分にその定量化には至っていないのが現状である。そこで本研究では、地震時地盤沈下を受ける地中管路の設計あるいは被害予測を行う観点から、外力としての地盤変状量の推定を試みている。そのため、詳細な土質試験を行うことなく、せいぜい管路埋設地点のボーリング資料程度より得られる情報を基に地震時の推定沈下量を算出することを目的としている。従って、従来用いられているよりもなるべく多くの有用なデータを集めること、そして物理現象を考慮しながら、有意な推定式が得られるような形で資料整理を行っている。

2. 用いたデータの特 本研究に用いた地盤震害データは、1964年新潟地震から1983年日本海中部地震のうち、比較的地盤データが揃っている5つの地震のものである。表-1に使用した地震の特性を示す。さらに、地盤沈下量の分析に用いた発生要因を表-2に示す。ここで、最大加速度については道路橋示方書に示される推定式とSMAC型強震計の計器補正を加えた最大加速度の推定式¹⁾の両者を用いている。そこで、前者を最大加速度A、後者を最大加速度Bとする。

地盤沈下量を各要因毎に検討した結果、定性的に以下の事項が知られた。(1)約50gal以上の最大水平加速度が作用した場合に、目だった地盤沈下の被害が見受けられ、震度階が大きいほど最大沈下量も大きい傾向にある。50galは、気象庁震度階IV(25~80gal)の範囲にあり、高田ら²⁾が過去の地震被害記録より地盤沈下・地割れなどの地盤変状が生じ始める震度階はIVの強い方としている結果に近い値を示していると考えられる。また、液状化した場合の方がしない場合より大きい沈下量を示す傾向にある。(図-1)(2)平地(市街地)と埋立地では、埋立地の方が最大沈下量は大きい、あまり有意な差は認められない。(3)盛土被害において、鉄道・道路・河川盛土

表-1 データ解析に使用した地震特性

地震名	発生年月日	マグニチュード	震央位置		震源深さ(km)	沈下データ数
			東経	北緯		
新潟	1964.6.16.13:01	7.5	139°11'	38°21'	40	82
十勝沖	1968.6.16.09:45	7.9	143.42'	40.42'	20	105
根室半島沖	1973.6.17.12:55	7.4	146.00'	42.54'	40	11
宮城県沖	1978.6.12.17:14	7.4	142°10'	38°09'	30	100
日本海中部	1983.5.26.12:00	7.7	139°4.6'	40°21.4'	14	108

表-2 被害要因

要因	単位	備考
地盤沈下量	cm	被害地域における最大沈下量
地盤条件	/	1:平地,2:埋立地,3:鉄道盛土,4:道路盛土,5:河川盛土,6:その他,
地盤種別	/	道路橋示方書にある1~4種地盤
平均N値	/	深さ1.0mまでの地盤N値の平均
震度階	/	気象庁発表の値、ただし、十勝沖地震では北大の資料
沖積層厚	m	N値5.0前後を基礎とした時の沖積層厚
盛土高さ	m	
液状化有無	/	1:液状化,2:非液状化,3:不明、に分類
震央距離	km	気象庁発表
マグニチュード	/	
最大加速度	gal	地盤種別・震央距離・マグニチュードから算定
最大速度	kine	
最大変位	cm	
砂層厚	m	沖積層中に占める砂質関係(粘土・シルト以外)の全層厚
砂層N値	/	全砂層のN値の平均

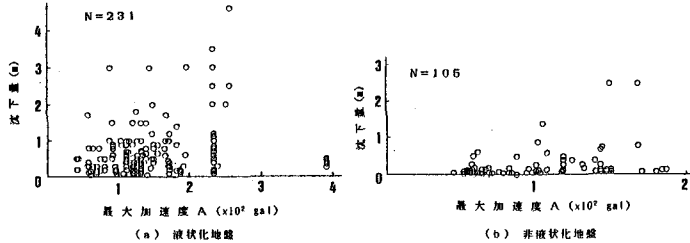


図-1 最大加速度Aと沈下量の関係

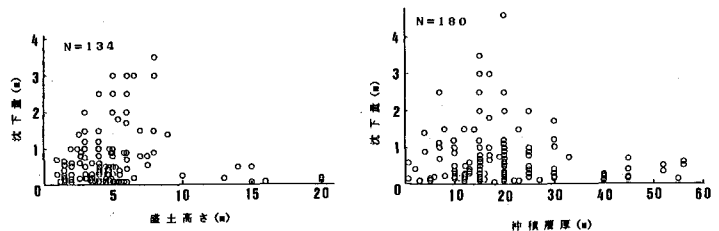


図-2 盛土沈下量と盛土高さの関係

図-3 地盤沈下量と沖積層厚の関係

の分類に関しては沈下量に大きな違いは見られない。また、最大沈下量は橋台裏盛土よりもそれ以外の盛土地の最大沈下量が大きい傾向にある。(4) 盛土高さが高いほど沈下量が大きくなる傾向にある。ただし、盛土高さが10m以上になるとさほど大きな沈下量は認められない。これは、野沢ら³⁾の日本海中部地震における

鉄道盛土被害調査で、水平基盤上では4~6m付近の高さの盛土被害率が最大という結果に近い傾向を示していると思われる。盛土の高さと被害程度には、盛土が有する固有振動数が影響しているのではないかと推察される。(図-2)

(5) 沖積層厚 20m前後に最大沈下量のピークがあり、それ以上層厚が厚いと返って沈下量が低下する傾向にある。これは、地盤層が有する固有振動数の影響があると考えられる。(図-3) (6) 軟弱地盤層が厚い4種地盤で沈下量が大きい。(7) 砂層厚が厚いほど沈下量が大きくなる傾向にある。(図-4) (8) 砂層平均N値が小さいほど沈下量が大きい傾向にある。(図-5)(9) 沖積層厚あるいは砂層厚に対する沈下量の比率は、従来から指摘されているように沖積層厚の1~2%の範囲を取ることが多いが、沈下量が大きくなるとその沈下率を上回っている。これは、沈下量が大きく観測される場合は鉛直方向の地盤沈下だけでなく、側方流動を伴った沈下量である可能性が考えられる。(図-6)

何れの場合も、地盤沈下量とその被害要因の一つ一つを定量的に関係付けることは困難である。しかし、沈下量と最大加速度、最大速度、最大変位、盛土高さおよび砂層厚の関係には全般的に右上がりの傾向が見受けられる。さらに、砂層N値と沈下量の関係には右下がりの傾向が見受けられる。そこで、次節でそれらの要因をもとに定量化を試みる。

3. 地震時地盤沈下量の定量化 沈下量の定量化を盛土がある場合とない場合、および液状化した地点だけの $\bar{\tau}$ - η (液状化 $\bar{\tau}$ - η)と非液状化地点を含んだ全ての地点での $\bar{\tau}$ - η (全般的 $\bar{\tau}$ - η)を使用する場合に分けて分析を行う。

3.1 回帰分析 地盤沈下量に關係する要因を用いて回帰分析を行った。前節での各要因に対する一般的傾向を考慮して回帰式を次式で表現する。

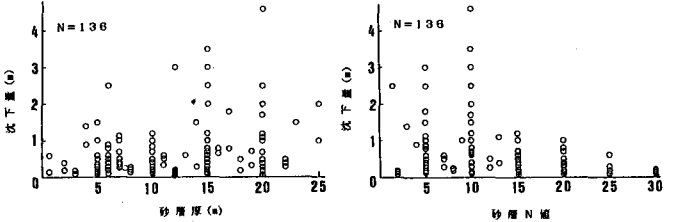


図-4 地盤沈下量と砂層厚の関係

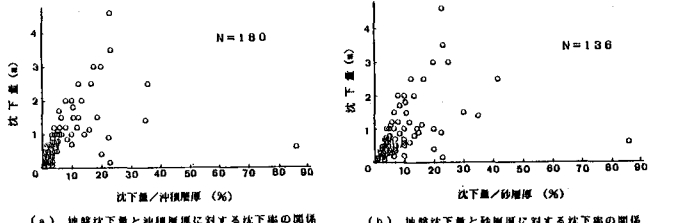


図-5 地盤沈下量と砂層N値の関係

(a) 地盤沈下量と沖積層厚に対する沈下率の関係 (b) 地盤沈下量と砂層厚に対する沈下率の関係

図-6 地盤沈下量と沖積層厚および砂層厚に対する沈下率の関係

表-3 回帰分析による諸係数

条件	地動最大値	a	b	相関係数	標準偏差	$\bar{\tau}$ - η 数	
盛土有	全般的データ	加速度A	0.088	21.4	0.8786	44.3	42
		加速度B	0.118	19.9	0.8846	43.3	
	速度	0.919	18.5	0.9089	38.7		
	変位	3.57	20.0	0.9158	37.3		
液状化データ	加速度A	0.092	20.0	0.8610	46.5	35	
	加速度B	0.123	19.3	0.8790	43.6		
盛土無	全般的データ	加速度A	0.250	2.52	0.8006	16.4	43
		加速度B	0.332	4.86	0.8170	15.8	
	速度	0.237	6.10	0.8032	16.3		
	変位	8.58	7.91	0.7770	17.3		
液状化データ	加速度A	0.261	0.276	0.7936	16.6	41	
	加速度B	0.339	3.79	0.8087	16.1		
		速度	2.42	5.05	0.7935	16.6	
		変位	8.73	7.08	0.7646	17.6	

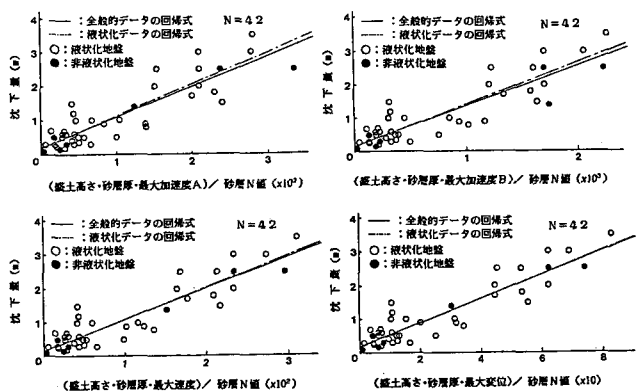


図-7 回帰分析による地盤沈下量推定結果(盛土有)

(7) 盛土がある場合

$$\text{沈下量(cm)} = a \frac{\text{盛土高さ(m)} \times \text{砂層厚(m)} \times \text{地動最大値}}{\text{砂層N値}} + b \quad (1)$$

(4) 盛土がない場合

$$\text{沈下量(cm)} = a \frac{\text{砂層厚(m)} \times \text{地動最大値}}{\text{砂層N値}} + b \quad (2)$$

ここで、地動最大値とは最大加速度、最大速度または最大変位の何れかを示す。表-3には式(1)、(2)における係数a、bの値、相関係数、条件付き標準偏差、解析対象としたデータ数を示している。表-3より、盛土有の場合は最大変位を用いた回帰式の相関係数が最も高く、データのばらつき指標である条件付標準偏差は小さい。また、盛土無の場合は最大加速度Bが最も相関係数が高く、条件付標準偏差も小さいことが分かった。図-7,8にその分析結果を示している。図より、全般的データと液状化のみのデータによる回帰式には、液状化以外のデータが少ないこともあるが、さほど有意な違いは認められない。これより、液状化地盤と非液状化地盤の沈下量の違いは砂層N値として考慮されていると考えて良い。また、同じ要因に対し重回帰分析も行ったが、相関係数、標準偏差とも回帰分析とほぼ同様の結果を示した。

3.2 適用範囲 表-4に、本研究で取り扱ったデータの範囲を示す。これより、本研究で求めた回帰式の適用範囲は盛土高さ10m以下、砂層厚さ約20m以下、砂層N値30以下、最大水平加速度50~400galとなっている。本解析に用いた加速度はアテニューエーション式から推定したものであり、式の特性が含まれることに注意を要する。ここで、沈下量の推定にどの回帰式を用いるかは重要であるが、回帰式が重回帰式かによりその結果には大差なく、また最大値として加速度、速度、変位の何れかをを用いる場合にも、その結果には大きな違いは見られない。そこで、その使用上の便を考えると、道路橋示方書で求められる最大加速度Aを用いた回帰式で、地震時地盤沈下量は十分予測できると考えられる。

3.3 砂層N値と地盤特性の関係 求めた回帰式を適用する場合、想定地震の大きさと位置、および被害予想地点の位置、地盤種別、盛土高さ、砂層厚、および砂層N値を知る必要がある。これらの要因のうち砂層N値として用いる値の決定は、他の要因に比較して困難である。そこで、砂層N値を何らかの

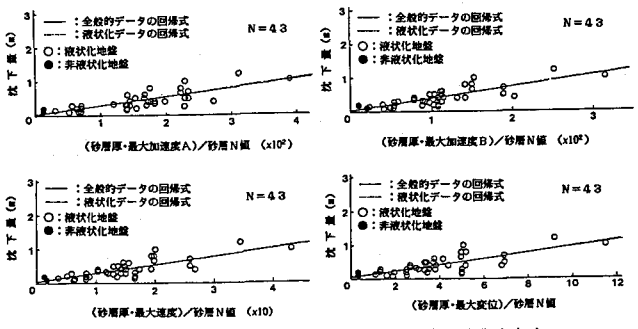


図-8 回帰分析による地盤沈下量推定結果(盛土無)

表-4 諸回帰分析に用いたデータ範囲

条件	沈下量 (cm)	盛土高さ (m)	砂層厚さ (m)	砂層N値	最大水平加速度 (gal)
盛土有	10~350	1~9	0.7~23	1.5~25	92~258
	10~350	1~9	4~23	1.5~25	104~258
盛土無	10~120	-----	2~22	2~30	42~392
	10~150	-----	2~22	2~30	42~392

表-5 回帰分析による諸係数

条件	a	b	c	重相関係数	標準偏差		
盛土有	盛土考慮式(3)	全般的	-0.773	1.366	0.621	0.8364	4.01
		液状化	-0.661	1.274	0.566	0.8833	3.22
	盛土無視式(4)	全般的	-0.554	-----	0.620	0.5027	0.897
		液状化	-0.499	-----	0.567	0.5785	0.702
盛土無	全般的データ	-0.801	-----	0.693	0.6302	0.467	
	液状化データ	-0.310	-----	0.277	0.5538	0.446	

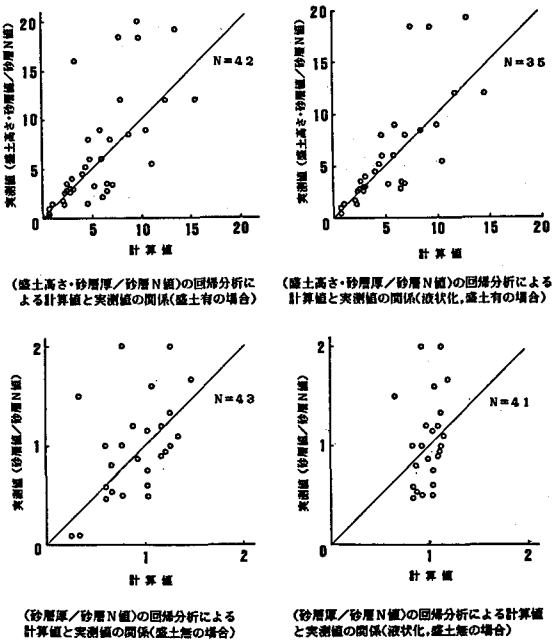


図-9 砂層N値予測のための種々の分析結果

形で推測しておけば、沈下量の予測がさらに容易になると思われる。そこで、砂層N値を次に示す回帰式により砂層厚、盛土高さとの関係で予測を試みる。

(7) 盛土有の場合(盛土高さ考慮)

$$\frac{\text{盛土高さ(m)} \times \text{砂層厚(m)}}{\text{砂層N値}} = 10^a \times \text{盛土高さ}^b \text{(m)} \times \text{砂層厚}^c \text{(m)} \quad (3)$$

(1) 盛土有の場合(盛土高さ考慮しない)および盛土無の場合

$$\frac{\text{砂層厚(m)}}{\text{砂層N値}} = 10^a \times \text{砂層厚}^c \text{(m)} \quad (4)$$

表-5に回帰式の諸数値を、図-9に分析結果の一部を示す。図および相関係数からように、予測式として高い精度を有するとは言いがたい。しかし、砂層N値がわからない地点では一つの目安となると考えられる。

4. 従来の研究との比較

4.1 盛土地の沈下量予測式の検討

杭基礎のない鉄道橋台裏盛土の被害データ⁴⁾を本研究の予測式に適用することで式の妥当性を調べた。図-10にその結果を示している。実線は提案式の値を、点線はその標準偏差の範囲を示している。図よりほとんどのデータは点線の範囲内に入り、かつ予測式より小さい値の範囲にデータは多くばらついている。ここで、標準偏差の範囲外にあったデータの詳細を調べたが、地盤厚が大きいかまたは地盤平均N値が小さい傾向にあった。提案式が地盤データを砂質系のものだけに限っているのに対し、鉄道の被害データは粘性土も含めた条件でのものであることを考え合わせると、分布範囲から外れているデータを本提案式の条件で取り扱えば、地盤厚さは更に小さく、地盤平均N値は更に大きくなり、本提案式の沈下量の分布範囲に入るものと考えられる。

4.2 地震時地盤沈下量予測式の土質工学的検討

盛土無の地盤沈下量の回帰式による結果と、現在までに西ら⁵⁾が行った土質試験から求められている砂質地盤の沈下予測(せん断応力とその繰返し回数で地盤の体積ひずみを予測)を比較することで、本研究で提案する沈下予測式の土質工学的妥当性を検討する。本研究で用いた砂層N値を相対密度に変換し、最大水平加速度をせん断応力に変換している。この時、フェニウエーション式で求めた最大水平加速度Aを実地盤で実際に発生したであろう最大加速度に変換するため、墓石転倒から得られた最大水平加速度と最大水平加速度Aの比を最大水平加速度Aの関係求めて使用している。その関係を図-11に示している。また、図-12に地盤沈下量を砂層厚さで除した沈下率(%)(本研究での提案式)と体積ひずみ(%)(西らの提案式)の関係を示している。その結果、ほぼ同じオーダーの値が得られたが、やや沈下率の方が体積ひずみより大きい値を示す傾向にあり、実地盤では鉛直方向の沈下だけではなく横方向の地盤移動の影響があったものと考えられる。

5. 結論

過去の5つの地震の際における404地点の沈下震害資料を基に、地震時地盤沈下量に関する諸量の要因分析を行うと共に、回帰分析手法を用いて沈下量推定式を誘導した。また、他の研究者による沈下データとの比較および土質工学的検討を加えた。その結果、本提案式を用いて地震時の地盤沈下量の推定ができる。

参考文献

- 1)川島他:強震記録の重回帰分析による地震動の最大加速度,最大速度および最大変位の推定式,土木技術資料,Vol.26,1984.2.
- 2)高田他:地震災害資料による地盤変動の特性解析,建設工学研究所報告, No.19,1977.5.
- 3)野沢他:日本海中部地震による国鉄の被害,土と基礎,Vol.32,1984.9.
- 4)岡田他:地震時における橋台裏盛土沈下量の統計的予測,土木学会第41回年次学術講演会第1部門,1986.11.
- 5)西他:地震時における基礎地盤の安定性評価(その1),電力研究所研究報告,U86002,1986.9.

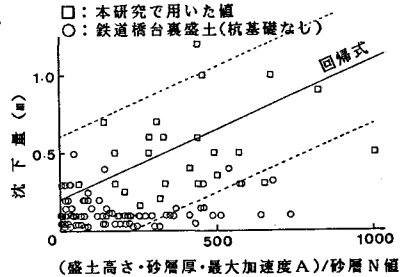


図-10 提案式と既往の研究データとの比較

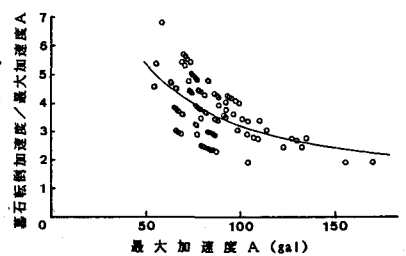


図-11 最大加速度Aと墓石転倒加速度の関係

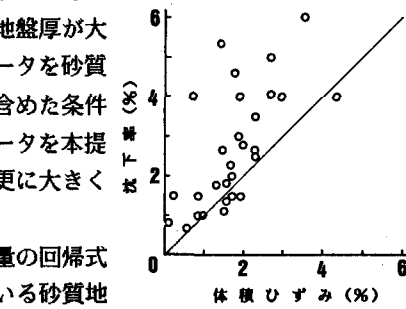


図-12 沈下率と体積ひずみの関係