

ライフライン解析のための地震時地盤沈下量の推定

ESTIMATION OF EARTHQUAKE INDUCED SETTLEMENTS
FOR LIFELINE ENGINEERINGS

田邊揮司良*・高田至郎**

By Kishiro TANABE and Shiro TAKADA

The present paper has proposed estimation formulae of ground settlement during earthquakes focused on lifeline earthquake engineerings. The proposed formulae were obtained by regression analysis using 404 data of the ground settlements in the past major five earthquakes. The maximum ground settlement is given by the function of height of sandy soil layer, embankment height, maximum ground surface acceleration and N -value of sandy soil layer. The estimation formulae were given for two cases of geological soil conditions; embankment and plane site. The proposed formulae were compared with following two results by other researchers to ensure the accuracy. The formula for embankment settlement was applied to other data of ground settlement observed on back fills around abutments, and also the ratio of the maximum ground settlement to the height of sandy soil layer at plane site settlement was compared with laboratory experimental results as to volumetric strain. They showed pretty good agreement.

Keywords: ground settlement, embankment settlement, earthquake, lifeline

1. 序 論

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、地すべり、液状化などの地盤変状による影響がきわめて大きいことが明らかとなっている。したがって、ガス導管耐震設計指針、共同溝耐震設計要領(案)のように、地盤変状を地震時構造物の2次の設計外力として考慮する方向が見受けられる。しかし、地震時地盤変状量については、いまだ十分にその定量化には至っていない現状にある。現在の地盤変状量推定手法は、次の2通りに分類される。第一は、過去の震害データより推定する方法、次に土質試験等により沈下量を推定しようとする方法である。

(1) 過去の震害データによる地盤変状の推定

地盤沈下・液状化・斜面崩壊・地割れ等の地盤変状については、当該地点の地盤特性がその被害に直接影響しており、過去の地震データから統計的かつ定量的に被害程度を予測することは困難とされてきた。しかし、その発生の可能性予測については、過去の震害事例を調べその原因を明らかにすることによって種々検討がなされて

きた。

栗林¹⁾は、液状化現象に注目し、地盤液状化を生ずる限界震央距離と地震マグニチュードの関係、また液状化は河成沖積地・埋立地に集中して生じ、その場合液状化地点の震度は少なくとも震度V(現行気象庁震度階級)である、さらに多くの地点で何回かの地震により繰返し液状化現象が発生したことなどを示している。

高田ら²⁾は液状化現象以外の地盤変状、すなわち地割れ、斜面崩壊、土構造物の被害を生ずる限界震央距離と地震マグニチュードの関係、および地盤変状を生じる最低震度が、地割れ・地盤の隆起・沈下・斜面崩壊に対しては震度IVの強い方、土構造物の被害に対しては震度IVであることなどを示している。

野沢ら³⁾は、日本海中部地震による国鉄盛土の被害を、水平地盤上・傾斜基盤上の盛土高さや被害率および橋台裏盛土沈下量とその頻度の関係で整理している。その結果、水平基盤上では4~6m付近の高さの盛土被害率が最も大きく、傾斜基盤上では高さが大きくなるほど、被害率が大きくなる傾向にあることなどを示している。

岡田ら⁴⁾は、鉄道橋台裏盛土の地震時沈下量について判別分析および、盛土幅、盛土高さ、盛土 N 値、地盤厚、地盤 N 値、橋台高さ、地表面加速度の要因により重回帰分析を行っている。その結果、沈下量10cm以上と

* 正会員 工博 元神戸大学大学院自然科学研究所
(〒657 神戸市灘区六甲台町)

** 正会員 工博 神戸大学助教授 工学部土木工学科(同上)

未満に対して77~86%の確率の判別式を、さらに重回帰分析により重相関係数0.51~0.64を有する回帰式を示している。しかし、重回帰分析に使用した土質諸定数などは精度がかなり悪いことを付言している。

福島ら⁵⁾は、大地震を想定した理論沈下式を中小地震の被害橋台に適用して検討している。その結果、橋台の水平移動による盛土のゆり込み沈下量を無視し、盛土の体積変化定数を $K=5.5 \times 10^{-8} \text{ gal}^{-1}$ とすることにより、実測値と対応することを示している。

浜田ら^{6)~8)}は、新潟・日本海中部地震前後の航空写真測量から液状化地盤の水平方向の永久変形の測定を行っている。その結果、液状化に伴う地盤の水平方向の永久変形量を $\delta_h=0.75 \cdot \sqrt{H} \cdot \sqrt{\theta}$ (δ_h : 水平変位 (m), H : 液状化層厚 (m), θ : 地表面勾配と液状化層下面勾配の最大値 (%)) により定式化している。さらに、鉛直方向変位を $\delta_v=0.15 \cdot \sqrt{H}$ (δ_v : 鉛直変位 (m)) により定式化している。

(2) 土質試験による地盤変状量の推定

土質試験により、地盤変状量を推定する研究として、以下の研究が挙げられる。

Silver⁹⁾らは繰返しせん断試験により、地盤沈下量は相対密度、繰返しせん断ひずみの大きさ、せん断繰返しの回数の関数として表わされるとしている。

八木¹⁰⁾は、排水砂の繰返しせん断試験結果から体積ひずみはせん断応力の繰返し回数の増加とともに増大し、その増大はある繰返し回数下ではほぼ一定値に収束するとして、それらの関係を定式化している。

大岡¹¹⁾は、中空ねじり試験において体積ひずみとせん断応力およびその繰返し回数の関係を求めている。

龍岡ら¹²⁾は、中空ねじり単純せん断試験に拘束圧を調整する K_0 リングを用い、その結果得られた繰返し最大せん断ひずみ $\gamma(DA)_{max}$ と沈下指数 SI (沈下量に相対密度を乗じた値) の関係より沈下量は推定できるとしている。

永瀬・石原ら¹³⁾は、二方向独立に制御できる単純せん断試験装置を用いて砂の変形強度特性を求めた結果、載荷後の排水による体積ひずみは最大せん断ひずみと有意な関係にあることを示している。

西ら^{14)~16)}は、振動三軸圧縮試験および中空ねじり単純せん断試験により、八木、大岡の示した体積ひずみとせん断応力およびその繰返し回数の関係をさらに詳細に実験で確認している。また地盤に生じるせん断応力の時刻歴変化(一般には不規則波)を、それと等価なせん断応力と繰返し回数で表わされる規則波に置換し、それらを体積ひずみの関係に代入し、地盤内各層ごとの体積ひずみを求め層厚を乗じることにより沈下量を求めている。さらに、モデル地盤内のせん断応力を“SHAKE”

により解析し、液状化安全率 F_L を求め、その逆数の深さに対する重みつき平均値と地表面沈下量の関係について示している。また、解析より求めた過剰間隙水圧比の深さに対する重みつき平均値と地表面沈下量の関係も示している。

本論文では、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を推定することを試みている。したがって、(2)で述べたような詳細な土質試験を実施することなく、せいぜい管路埋設地点付近のボーリング資料程度より得られる情報をもとに地震時の推定沈下量を算出する目的をもって(1)で述べた手法を本解析でも採用することとなるが、それらのうち地盤沈下量の定量化に至った研究としては参考文献4), 5), 8)が、また水平方向地盤移動量に関しては参考文献6)が挙げられ、他の研究では定性的評価にとどまっている。しかし、参考文献4), 5)の地盤沈下量の定量化は、橋台裏盛土という特定された構造物付近に対してのものであるため、推定式には構造物の因子が含まれ、本研究で目的とする地盤沈下量の推定への適用は適当でない。そこで本研究では、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、そして物理的現象を考慮しながら、有為な推定式が得られるような形で資料整理を行うことを目指した。また本論文の地盤沈下量は、地盤沈下が発生した地域での最大量を表わしている。

2. 用いたデータの特性

(1) 概要

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

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
概要半島沖	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	106

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	/	道路標示方書にある1~4種地盤
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50前後を基準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、は分類
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	line	/
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

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。

(2) 被害要因

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¹⁷⁾とSMAC型強震計の計器補正を加えた最大加速度の推定式¹⁸⁾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。

(3) データの特性分析

地盤沈下量を各要因ごとに検討した結果、定性的に以下の事項が知られた。

a) 約50 gal以上の最大水平加速度が作用した場合に、め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。50 galは、気象庁震度階IV(25~80 gal)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)。

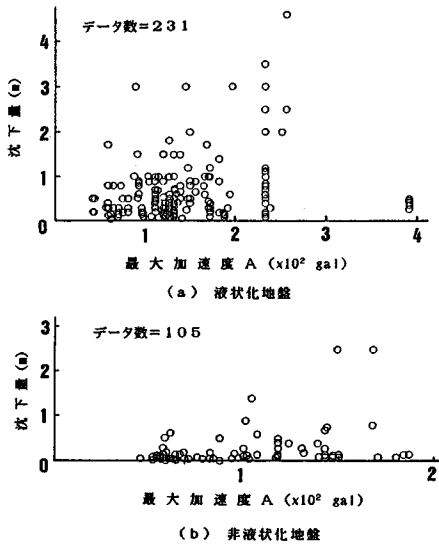


図-1 地盤沈下量と最大加速度Aの関係

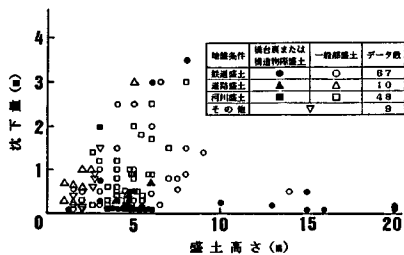


図-2 盛土沈下量と盛土高さの関係

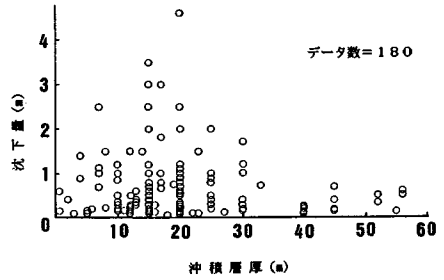


図-3 地盤沈下量と沖積層厚の関係

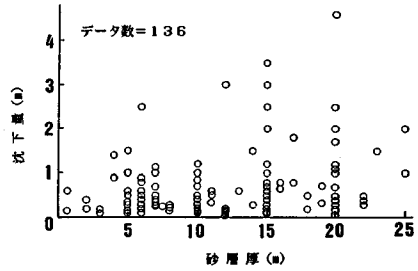


図-4 地盤沈下量と砂層厚の関係

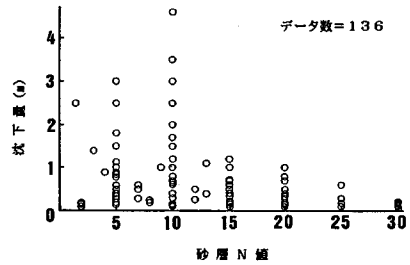
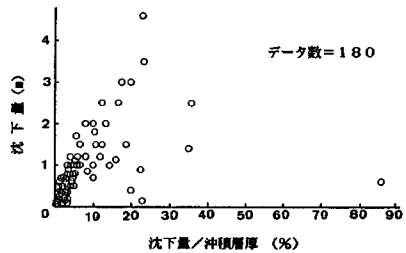
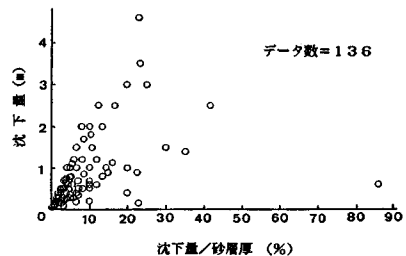


図-5 地盤沈下量と砂層N値の関係



(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

b) 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10 m以上になると逆に沈下量が減少する傾向にある。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4~6 m 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。このことより、盛土高さに対する沈下量の程度には、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。また、鉄道・道路・河川盛土の分類に関しては沈下量に大きな違いはみられない(図-2)。

c) 沖積層厚20 m 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加え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)。

d) 軟弱地盤層が厚い4種地盤で沈下量が大きい。

e) 砂層厚が厚いほど沈下量が大きくなる傾向にある(図-4)。

f) 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)。

g) 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%の範囲を取る場合が多いが、沈下量が大きくなると沈下率は増大する。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)。

いずれの場合も、地盤沈下量とその被害要因の1つ1つとを定量的に関係づ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 値と沈下量の間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。ここで、被害要因のうち最大加速度、速度および変位は、Silver ら⁹⁾が提案する沈下予測式の最大せん断ひずみ(または、最大せん断応力)およびその繰返し回数に、さらに砂層 N 値は地盤の相対密度に関係する量と考えてよい。

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データ(液状化データ)と非液状化地点を含んだすべての地点でのデータ(全般的データ)を使用する場合に分けて分析を行う。

(1) 回帰分析

地盤沈下量に関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。

a) 盛土がある場合

沈下量(cm)

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

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	F-9数		
盛土 有	全般的データ	加速度A 0.088 加速度B 0.118 速度 0.919 変位 3.57	21.4 19.9 18.5 20.0	0.8788 0.8946 0.9089 0.9158	44.3 43.3 38.7 37.3	4.2		
	液状化データ	加速度A 0.092 加速度B 0.123 速度 0.926 変位 3.545	20.0 19.3 19.5 21.2	0.8610 0.8790 0.8941 0.9024	46.5 43.6 40.9 39.4		3.5	
	全般的データ	加速度A 0.250 加速度B 0.332 速度 0.237 変位 8.58	2.52 4.86 6.10 7.91	0.8006 0.8170 0.8032 0.7770	16.4 15.8 16.3 17.3			4.3
	液状化データ	加速度A 0.261 加速度B 0.339 速度 2.42 変位 8.73	0.276 3.79 5.05 7.08	0.7936 0.8087 0.7935 0.7646	16.6 16.1 16.6 17.6			

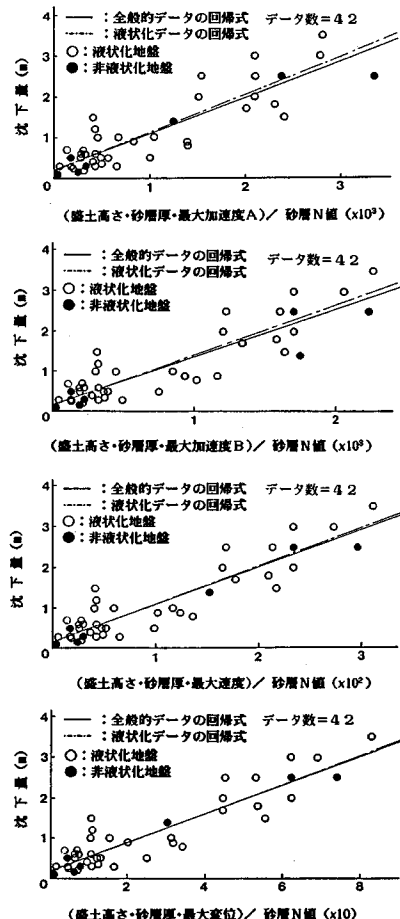


図-7 回帰分析による地盤沈下量推定結果(盛土有)

b) 盛土がない場合

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

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いずれかを示す。

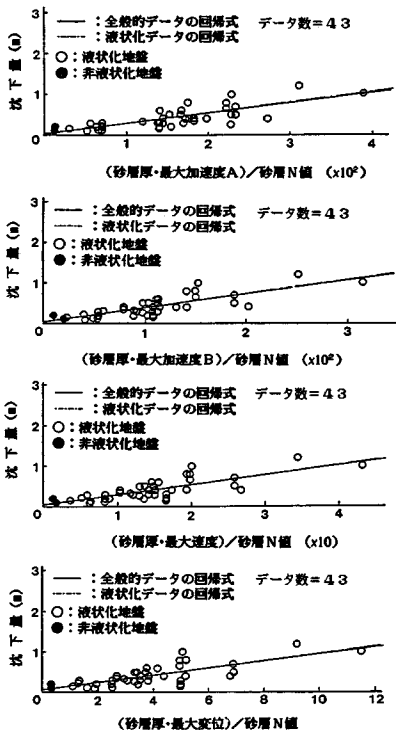
表一三には式(1)、(2)における係数 a、b の値、相関係数、条件付き標準偏差、解析対象としたデータ数を示している。表一三より、盛土有の場合は最大変位を用いた回帰式の相関係数が最も高く、データのばらつき指標である条件付き標準偏差は小さい。また、盛土無の場合は最大加速度 B が最も相関係数が高く、条件付き標準偏差も小さいことがわかった。図一七、八にその分析結果を示している。図より、全般的データと液状化のみのデータによる回帰式には、液状化以外のデータが少ないこともあるが、さほど有意な違いは認められない。これより、液状化地盤と非液状化地盤の沈下量の違いは砂層 N 値として考慮されていると考えられる。

(2) 重回帰分析

前節の回帰式に用いた要因に対し重回帰分析を行う。その重回帰式を以下に示す。

a) 盛土がある場合

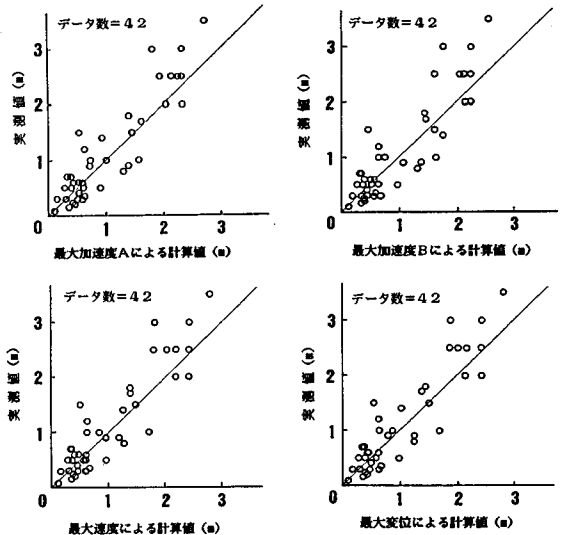
沈下量(cm)



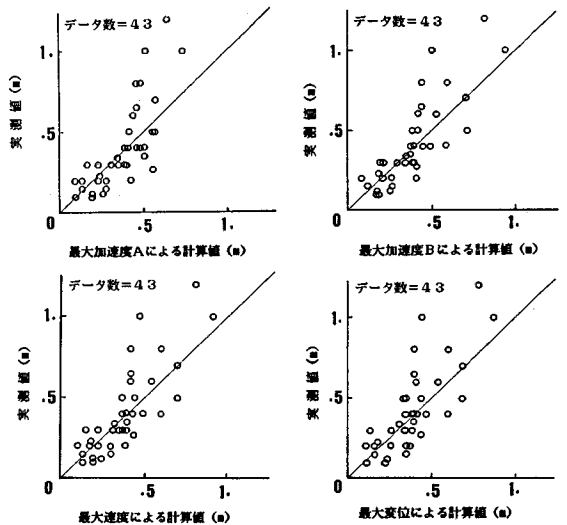
図一八 回帰分析による地盤沈下量推定結果(盛土有)

表一四 重回帰分析による諸係数

条件	地動最大値	a	b	c	d	e	重相関係数	標準偏差	
盛土有	全般的データ	加速度A	-1.648	0.580	0.493	1.523	0.626	0.8599	41.1
		加速度B	-0.844	0.449	0.684	1.184	0.654	0.8556	45.1
		速度	0.192	0.482	0.576	1.280	0.678	0.8621	41.5
		変位	1.044	0.525	0.547	1.168	0.692	0.8595	40.9
盛土無	液状化データ	加速度A	-1.734	0.556	0.428	1.515	0.423	0.8290	44.3
		加速度B	-0.968	0.489	0.551	1.203	0.442	0.8219	46.6
		速度	0.111	0.511	0.477	1.253	0.459	0.8294	44.4
		変位	0.929	0.531	0.452	1.163	0.464	0.8290	43.8
盛土有	全般的データ	加速度A	-0.207	-----	0.591	0.737	0.427	0.7810	18.3
		加速度B	-0.560	-----	0.642	0.971	0.490	0.8142	15.5
		速度	0.361	-----	0.541	1.100	0.491	0.7987	16.2
		変位	1.004	-----	0.475	0.955	0.452	0.7595	17.3
盛土無	液状化データ	加速度A	-0.495	-----	0.961	0.820	0.708	0.8006	16.0
		加速度B	-0.745	-----	0.777	1.033	0.574	0.8354	15.1
		速度	0.263	-----	0.703	1.028	0.593	0.7988	15.9
		変位	0.924	-----	0.651	0.967	0.567	0.7456	17.0



図一九 重回帰分析による地盤沈下量推定結果(盛土有, 全般的データ)



図一〇 重回帰分析による地盤沈下量推定結果(盛土無, 全般的データ)

表一五 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 (cb)	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

(注)：砂層 N 値には、静的コーン貫入試験結果から換算した N 値を含む。

$$= 10^a \frac{\text{盛土高さ}^b (\text{m}) \times \text{砂層厚}^c (\text{m}) \times \text{地動最大値}^d}{\text{砂層 N 値}^e} \dots\dots\dots (3)$$

b) 盛土がない場合

$$\text{沈下量 (cm)} = 10^a \frac{\text{砂層厚}^c (\text{m}) \times \text{地動最大値}^d}{\text{砂層 N 値}^e} \dots\dots (4)$$

表一四より重相関係数が高く、条件付き標準偏差が小さくなるのは回帰分析のときと同じ傾向となった。また、図一九、一〇に全般的データにおける盛土有、無の分析結果を示している。

(3) 適用範囲

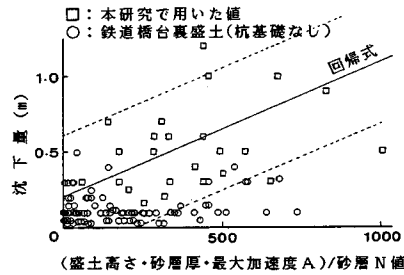
表一五に、本研究で取り扱ったデータの範囲を示す。これより、本研究で求めた回帰式の適用範囲は盛土高さ 10 m 以下、砂層厚さ約 20 m 以下、砂層 N 値 30 以下、最大水平加速度 50~400 gal となっている。本解析に用いた加速度はアテニュエーション式から推定したものであり、式の特性が含まれることに注意を要する。

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、回帰式か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、変位のいずれかを用いる場合にも、その結果には大きな違いはみられない。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〔式(1)、(2)〕で、地震時地盤沈下量は十分予測できると考えられる。

4. 従来の研究との比較

(1) 盛土地盤の沈下量予測式の検討

盛土有の地盤沈下量の回帰式の妥当性を検討するため、岡田ら⁹⁾の鉄道橋台裏盛土沈下量との比較を行った。図一〇にその比較結果を示している。実線は本提案式の値を、点線はその標準偏差による値のばらつき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、地盤厚さが大きいまたは地盤平均 N 値が小さい傾向にあった。本予測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、参考文献 4) の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



図一〇 提案式と既往の研究データとの比較

提案式の条件で取り扱えば、地盤厚さはさらに小さく、地盤平均 N 値はさらに大きくなり、本提案式の沈下量の分布範囲に入るものと考えられる。以上の結果より、本提案式は他の研究者のデータに対しても比較的良好な沈下量予測値を与えるものと思われる。

(2) 地震時地盤沈下量予測式の土質工学的検討

本論文で提案する盛土無の地盤沈下量の回帰式による結果と、西ら¹⁰⁾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量を比較することで、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。

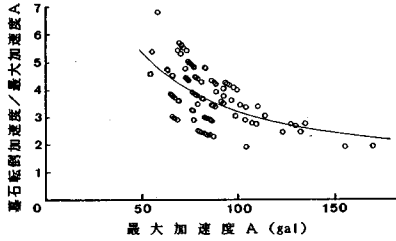
西らは、せん断応力 (τ) と有効平均応力 (σ_m') およびせん断応力の繰返し回数 (N_r) で地盤の体積ひずみ (V_a) を次式で予測している。

$$V_a = m^* \sigma_m' \left(\frac{\tau}{\sigma_m'} \right)^n \frac{N_r}{N_r + A} \dots\dots\dots (5)$$

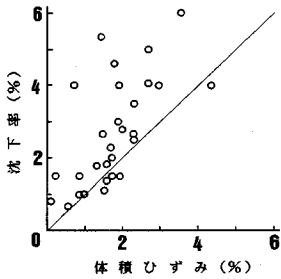
ここに、m*, n, A は定数である。西らは σ_m' = 1 kgf/cm² のもとでの豊浦砂の繰返し三軸圧縮試験から n = 3, また A および m* は砂の相対密度 (D_r) に関係しているとしている。式(5)と本研究で用いたデータを比較するため、本研究で用いた砂層 N 値を Meyerhof¹⁹⁾により提案されている式(6)により相対密度に変換し、最大水平加速度を Seed ら²⁰⁾が提案している式(7)によりせん断応力に変換している。また、式(5)中の定数 A と繰返し回数の項は、繰返し回数に対し A が小さいとして、N_r / (N_r + A) ≒ 1 としている。さらに、アテニュエーション式で求めた最大水平加速度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、図一〇に示すような墓石転倒から得られた最大水平加速度とアテニュエーション式から得られた最大水平加速度の関係を導入している。また、西らの実験と比較するために、その実験条件である有効平均応力が得られる砂層厚さ 3.4 m 以上のデータを用いており、砂層平均 N 値は砂層厚さの中央部の値である。

$$D_r = 21 \sqrt{\frac{N}{\sigma_v' + 0.7}} \dots\dots\dots (6)$$

$$\tau = \gamma_a \sigma_v \frac{a_{max}}{g} \dots\dots\dots (7)$$



図—12 最大加速度 A と基石転倒加速度の関係



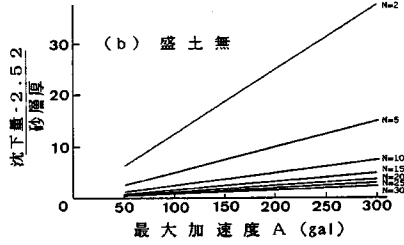
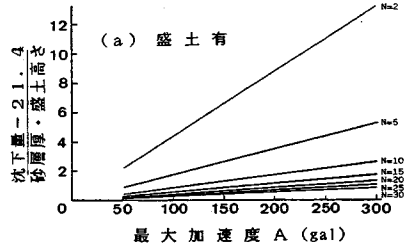
図—13 沈下率と体積ひずみの関係

ここで、 σ_v^0 :鉛直有効応力、 σ_v :鉛直応力、 γ_a :通減係数 ($=1-0.015 \cdot H$)、 H :地表面からの深さ、 α_{max} :地表面最大加速度、 g :980 gal、である。

図—13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、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る。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もあり、その影響とも考えられる。ここで、式(5)に用いる土質定数は、被害発生場所での N 値、深度、層厚、加速度のみから推定したものであり、土質試験によるものと比較してデータの精度はかなり悪いと思われる。しかし、土質試験による沈下率と本研究でのものがオーダー的にも等しい範囲にあることは沈下予測式の土質工学的妥当性のある程度説明していると考えられる。さらに、式(6)に本研究のデータを適用した結果、相対密度の範囲は44~99%にあり、永瀬・石原ら¹³⁾の研究で得られている、相対密度47~93%の範囲での最大体積ひずみが約1~4%である結果と、本研究の沈下率はほぼ一致している。

(3) 地盤沈下量推定式の特性

地盤沈下量推定式の特性を図—14に示す。式の特性を一枚の図面により表わせれば、その特性を把握するには便利である。そこで、縦軸に沈下量を回帰式の第2項の値で引いたものを単位当たりの砂層厚および盛土高で除した値を、横軸に最大水平加速度をとり、砂層平均 N 値をパラメーターとして回帰式を図に示している。



図—14 地盤沈下量推定式の特性

図より砂層 N 値が小さい場合は地盤沈下量に鋭敏であることが知られた。すなわち、土質柱状図から砂層平均 N 値を評価する場合、小さい N 値に対しては細心の注意が必要である。

5. 結 論

本研究は、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ため、外力としての地盤沈下量を管路埋設地点付近のボーリングデータ程度から得られる資料をもとに推定することを目的として行った。そのため、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もとに、地震時地盤沈下量に関する諸量の要因分析を行うとともに、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。結果は以下に示すとおりである。

(1) 地盤沈下量に与える各要因の定性的傾向は次のとおりである。

- a) 地震時地盤沈下量がめだってくるのは、最大加速度約50 gal以上を受ける場合と考えられる。
- b) 盛土高さおよび沖積層厚が大きくなると地盤沈下量は増加するが、ある程度以上大きくなっても、地盤沈下量が大きくならない。これは、それら自体が有する固有振動数の影響があると考えられる。
- c) 地盤沈下量が従来いわれている沖積層厚の1~2%を上回る場合は、側方流動を伴っている可能性が大きいと考えられる。

(2) 地震時地盤沈下量は以下に示す式によって推定し得る(データの適用範囲は本文中、表—5を参照)。

- a) 盛土のある場合

$$\text{沈下量 (cm)} = 0.088 \frac{\text{盛土高さ (m)} \times \text{砂層厚 (m)} \times \text{最大加速度 } A (\text{gal})}{\text{砂層 } N \text{ 値}} + 21.4 \quad (\text{相関係数} = 0.8786)$$

b) 盛土がない場合

$$\text{沈下量 (cm)} = 0.250 \frac{\text{砂層厚 (m)} \times \text{最大加速度 } A (\text{gal})}{\text{砂層 } N \text{ 値}} + 2.52 \quad (\text{相関係数} = 0.8006)$$

(3) 鉄道橋台裏盛土被害データを本沈下量予測式に適用したが、ほぼ本提案式の分布範囲にそれらのデータは収まった。また、本提案式の土質工学的検討を行ったが、本データの沈下率は体積ひずみに比べやや大きめの値を示すが、オーダー的にはほぼ等しい結果が得られた。

参 考 文 献

- 1) 栗林栄一・龍岡文夫・吉田精一：明治以降の本邦の地盤液状化履歴，土木研究所彙報，第30号，1974.
- 2) 高田至郎・大広 始：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) 野沢大三・那須 誠・岡田勝也：日本海中部地震による国鉄の被害，土と基礎，Vol.32，pp.21~25，1984.9.
- 4) 岡田勝也・福島弘文・小笠原令和：地震時における橋台裏盛土の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，pp.1001~1002，1986.11.
- 5) 福島弘文・岡田勝也・小笠原令和：中小地震に対する橋台裏盛土の沈下量の算定式に関する一考察，土木学会第41回年次学術講演会第1部門，pp.1003~1004，1986.11.
- 6) 浜田政則・安田 進・磯山龍二・恵本克利：液状化による地盤の永久変位と地震被害に関する研究，土木学会論文集，第376号/Ⅲ-6，pp.221~229，1986.12.
- 7) 浜田政則・磯山龍二・佐藤 修：液状化による鉛直方向の地盤の永久変位，第19回地震工学研究発表会，pp.181~184，1987.7.
- 8) 地震予知総合研究振興会：「地下構造物の地盤変状対策」に関する調査研究報告書，1987.10.
- 9) Silver, M.L. and Seed, H.B. : Volume Changes in Sands During Cyclic Loading, J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE, Vol.97, No. SM9, pp.1171~1182, Sept., 1971.
- 10) 八木則男：繰り返し荷重を受けた砂の力学特性とその応用に関する研究，京都大学学位論文，1974.10.
- 11) Oh-oka, H. : Drained and Undrained Stress-Strain Behavior of Sands Subjected to Cyclic Shear Stress Under Nearly Plane Strain Condition, Soils and Found., Vol.16, No.3, pp.19~31, Sept., 1976.
- 12) Tatuoka, F., Sasaki, T. and Yamada, S. : Settlement in Saturated Sand Induced by Cyclic Undrained Simple Shear, 8th World Conf. on Earthquake Eng., Vol. III, pp.95~102, July, 1984.
- 13) 永瀬英夫・石原研而・田部元太：多方向の不規則荷重を受ける砂の沈下特性，第21回土質工学研究発表会，pp.615~618，1986.6.
- 14) 西 好一・金谷 守・久保田博：砂地盤の地震時沈下量の簡易推定法，第21回土質工学研究発表会，pp.623~624，1986.6.
- 15) 西 好一・梶谷卓美・西 剛整：不規則繰返し荷重下における砂の体積変化特性，第20回土質工学研究発表会，pp.595~598，1985.6.
- 16) 西 好一・金谷 守・松井家孝・当麻純一：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.
- 17) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V耐震設計編，日本道路協会，1980.5.
- 18) 川島一彦・相沢 興・高橋和之：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，pp.20~25，1984.2.
- 19) Meyerhof, G.G. : Discussion for Session 1, Proc. 4th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Vol.3, p.110, 1957.
- 20) Seed, H.B. and Idriss, I.M. : Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential, J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE, Vol.97, No. SM9, pp.1249~1273, Sept., 1971.

(1987.5.27・受付)