

液状化に伴う残留変形解析方法の 河川堤防への適用

安田 進¹・吉田 望²・規矩大義²・宇田将人³

¹正会員 工博 東京電機大学教授 理工学部建設環境工学科(〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

²正会員 工博 佐藤工業株式会社 中央技術研究所(〒103-0023 東京都中央区日本橋本町 4-12-20)

³学生会員 東京電機大学大学院 理工学研究科建設工学専攻(〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

著者達は、液状化した土の変形特性を繰返しねじりせん断試験によって求め、それを用いた有限要素解析を行う事によって、液状化に伴う地盤の変形量を簡易的に求める方法について研究してきている。これまでに護岸・岸壁背後地盤に適用し、その適用性について検討してきている。これに対し、今回は液状化に伴う河川堤防の沈下問題に対してこの方法を適用し、その適用性について検討した。このため、1993年北海道南西沖地震および1995年兵庫県南部地震で被災した河川堤防を対象とし、地盤調査結果に基づいて液状化後のせん断剛性を推定し、解析を行った。そして、解析結果を実測沈下量と比較したところ、かなり適用性があることが明らかになった。

Key Words : Liquefaction, earthquake, deformation, river dike, analysis, sandy soil

1. まえがき

液状化に伴う地盤の流動量や、構造物の沈下量・浮上量などを検討する際、大変形まで解析する必要がある。この場合2次元・3次元の有効応力解析を行うことが望ましいが、解析に費用がかかることや、大きな変形まで解析できるプログラムが少ないため、簡易的に変形量を推定出来る方法の開発が望まれている。

このため、筆者達は液状化に伴うせん断剛性低下を考慮した残留変形解析(Analysis for Liquefaction-induced Deformation, 略してALIDと呼ぶ)方法を検討してきた。そして、この方法を岸壁・護岸背後地盤や緩やかな傾斜地盤に適用して、その妥当性を検討してきた¹⁾。それに引き続き、今回、河川堤防の被災事例に対しこの解析手法を適用し、その適用性について検討した。

2. 解析手法の概要

本解析方法では地震前・後のせん断剛性を用いた有限要素法を2回使う。まず、常時のせん断剛性を用いて自重解析により液状化前の地盤の変形状態を推定する。そして、次に、①液状化後のせん断剛性を用いて再度解析

により液状化後の変形状態を推定して、両者の変形量の差から流動量を推定するか(自重法)、または、②材料特性の変化により生じる不釣り合いを外力として与えて変形量を求める(応力解放法)。液状化による変形が大きい場合はどちらでも大差なく、以下の解析例ではより簡単な自重法を用いている。これらの方法は、静的な解析であるので、地震時の慣性力などによる一時的な変形は計算できないが、非線形や液状化といった材料特性の変化に伴う残留変形が求められる。

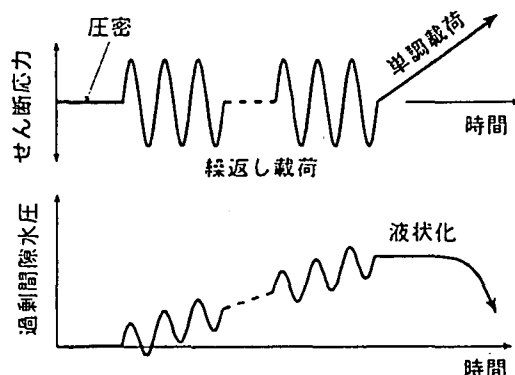


図-1 せん断応力の載荷方法

筆者達は液状化した土の性質を求めるため、図-1に示す新たな試験方法を考え出した。まず、通常の液状化試

験と同様に原位置で受けている圧力相当の等方拘束圧を加え、非排水状態で一定振幅の繰返しせん断応力を加えて液状化させる。その後、非排水状態のままで、単調載荷を行う。そして、この単調載荷時の応力-ひずみ関係を、液状化した土の応力-ひずみ関係と見なす。

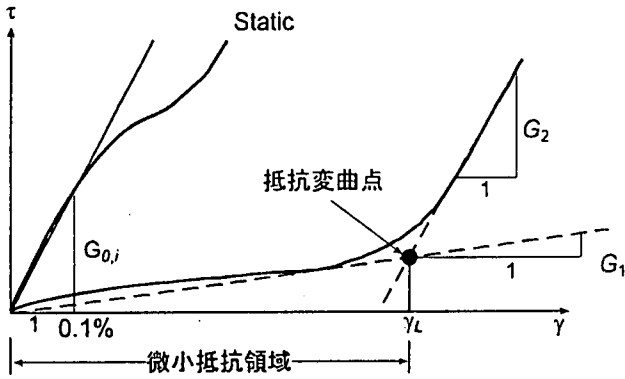


図-2 せん断応力～せん断ひずみのモデル化

繰返しねじりせん断試験装置を用い、①砂の種類、②密度、③液状化の程度（液状化に対する安全率 F_L （抵抗率）で表す）、④拘束圧、⑤初期せん断力を変えて、数多くの実験を行った。そして、図-2 に示したように応力-ひずみ関係をバイリニアで近似することを考えた。地震発生前の初期せん断剛性に対して、液状化後のせん断剛性を G_1 とし、その低下割合を“せん断剛性低下率”と呼ぶことにした。この場合、地震前のせん断応力-せん断ひずみ関係も非線形であるため、初期せん断剛性として次の2通りで試験結果を整理した。

- 1) せん断ひずみ $\gamma = 10^{-3}$ でのせん断剛性 $G_{0,i}$;
- 2) N 値から、 $E = 28N \text{ (kgf/cm}^2\text{)} = 2744N \text{ (kN/m}^2\text{)}$ の式とポアソン比 0.33 から求めたせん断剛性 G_N

豊浦砂、まさ土、イスタンブール砂と、細粒分の多い東京地区の不攪乱試料での試験結果から、 $G_1/G_{0,i}$ 、 G_1/G_N 、 F_c の関係をまとめてみると図-3 のようになった。

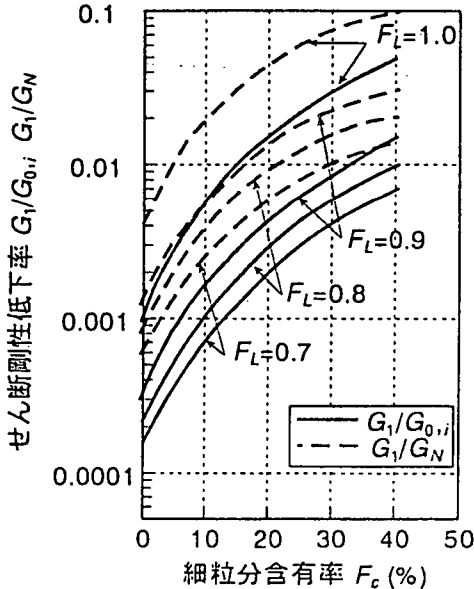


図-3 せん断剛性低下率と F_L 、 F_c の関係のまとめ

筆者たちは以上の方法をいくつかの流動事例に適用し、その適用性を検討してきている。例えば、図4 に神戸市の魚崎浜での解析例を示す。ここでは、1995 年兵庫県南部地震の際、ケーソン式護岸が 2m ほど移動し、背後地盤で流動が 100m 以上も生じた。解析結果も、ケーソン岸壁近傍を除いてこのような地盤変位分布となっている。

なお、このような流動の解析においては、兵庫県南部地震の際の逆解析などをもとに、液状化層上の非液状化層のせん断剛性低下割合を液状化層の 1/10 としている。

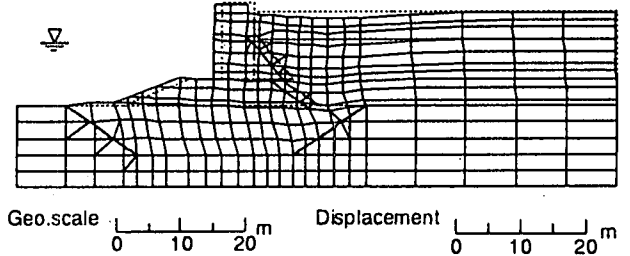


図-4 魚崎浜での解析例

3. 解析の対象とした堤防および解析条件

今回の解析は、1993 年北海道南西沖地震で被災した後志利別川および 1995 年兵庫県南部地震で被災した淀川の堤防と、その近傍で無被災だった堤防を対象とした。表-1 にそれらの地点を示す。これらの箇所では、被災状況や天端の沈下量などが詳細に調査されている。

解析するにあたって、まずのり尻付近のボーリングデータから N 値および細粒分含有率 F_c を求め、道路橋示方書の方法で液状化層およびその F_L 値を推定した。また、 N 値から G_N を推定した。そして、図-3 のせん断剛性低下率 G_1/G_N 関係を用いて G_1 を推定した。

なお、後志利別川では F_L が全段面とも 0.7 より少し小さく、淀川では 0.7 程度であった。一方、図-3 に示されている提案曲線では $F_L = 0.7$ 以下の低下率は同一と見なしている。これは実験データがないことと、0.7 程度以下ではせん断剛性の低下率はあまり変化しないと考えられたためである。そこで、これを考慮して、後述する実測値との比較では、全地点とも $F_L = 0.7$ の解析結果を用いた。ただし、比較検討のために、 $F_L = 1.0, 0.9, 0.8, 0.7$ の条件でも解析を行った。

液状化層上の非液状化層のせん断剛性の低下割合は、前述した岸壁・護岸背後地盤の解析と同じように、液状化層の低下割合の 1/10 とした。つまり液状化層が、1/100 なら、非液状化層は 1/10 とした。また、堤体のせん断剛性低下率については以下の4通りで解析を行なった。

- ・ケース A：液状化層上の非液状化層と同じせん断剛性低下率と仮定
- ・ケース B：せん断剛性は低下しないと仮定
- ・ケース C：非液状化層を想定した実験結果²⁾から、堤体の地盤材料は豊浦砂とまさ土の中間的な性質と考え

$G_1/G_N=1/5$ と仮定

・ケース D: 堤体にはクラックがはいったりするため、ケース C より少し剛性が低下すると考えて、 $G_1/G_N=1/10$ と仮定

なお、前述したように、 F_L の値はのり尻部付近のボーリング資料に対して計算したが、堤体下では F_L は少し大きくなる。そこで、天端下での F_L も求め、堤体下の液化化層だけにはその値を適用した解析も行った。この解析ケースを A~D に対応させて A'~D' と呼ぶ。

また、液化化前後の解析に用いるポアソン比は、液化化前後で等体積であるように G_1/G_N の値に応じて、液化化後の ν を決定し、解析を行なった。

iii) 堤体のせん断剛性はケース B が最も大きく、次いで C, D, A となっている。この違いをみるために、例えば $F_L=0.7$ の変形図を比較してみると、ケース B では堤体は地震前の形状とほぼ保ったまま沈下しているのに対し、ケース A では堤体の形が崩れながら沈下している。ケース C, D ではその中間の変形状態になっている。また、天端の沈下量自体もケース B が最も小さく、C, D, A と順に大きくなっている。したがって、堤体のせん断剛性の低下割合によって沈下量や変形モードが大きくなるようである。

iv) A~D の沈下量に対し、A'~D' の沈下量は少し大きくなった。

表-1 解析断面と天端沈下量

地点		地点 No.	実測沈下量 (m)	天端沈下量の解析結果(m)							
河川	距離			A	B	C	D	A'	B'	C'	D'
後志利別川 真栄橋	左岸4k440	9	2.6	3.56	1.26	1.82	2.18	3.47	1.22	1.76	2.11
	左岸5k000	10	0	1.74	1.03	1.24	1.43	1.63	0.96	1.16	1.34
	左岸1k700	11	1.3	0.73	0.14	0.63	0.81				
後志利別川 兜野橋	右岸2k000	12	0	0.54	0.38	0.5	0.6	0.52	0.37	0.49	0.58
	左岸2k490	13	0.6	2.37	0.62	1.01	1.29				
淀川	左岸1.4k	15	2.7	1.79	0.68	1.05	1.31	1.32	0.5	0.78	0.96
	左岸3.55k	17	0.3	0.49	0.29	0.35	0.42	0.27	0.23	0.25	0.26

A~D': 堤体のせん断剛性低下率のタイプ

4. 解析結果

解析結果のうち、代表的なものとして後志利別川の真栄橋左岸上流 4K440 の断面についてケース C, $F_L=1.0, 0.7$ で行った解析の変形図を図-5, 6 に示す。これらに示されるように、全体の傾向は次のようになった。

i) いずれのケースも堤体が沈み込み、それにともないのり尻付近の地盤は外側に押し出され、外側の地表面が少し盛り上がる形状となった。

ii) 図-7 に F_L ごとの地表面沈下量分布を示す。これに見られるように、各ケースで F_L が小さくなる程度沈下量は大きくなった。したがって、液化化したと言ってもその激しさも堤防の沈下量に関係してくると言えそうである。

ただし、堤体下とのり尻下で F_L 値にあまり差がなかったため、沈下量もあまり差が生じなかった。

次に、解析結果の妥当性を検証するため天端の沈下量について実測値と解析値を比較してみた。ただし、第一段階の自重解析自体で沈下が少し発生する。したがって、この値を差し引いた値を沈下量とした。このようにして解析による天端沈下量を求め、実測値と比較したのが表-1, 図 8, 9 である。これを見ると、ばらつきが大きいものの断面ごとの実測値との対応はかなり良い傾向があると言えそうである。また、実測沈下量はケース A とケース D の間にあるようである。

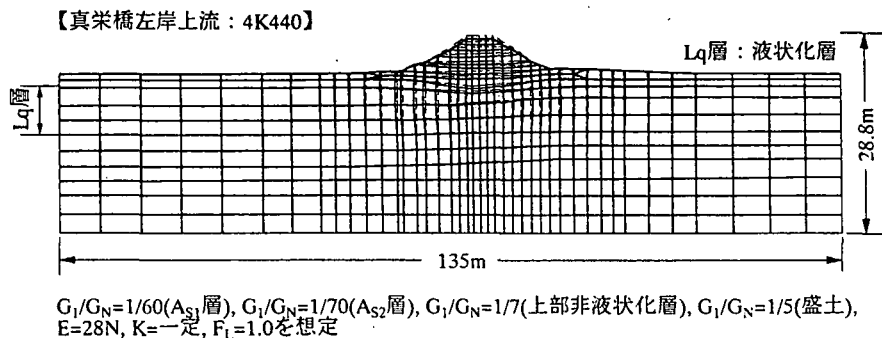


図-5 真栄橋左岸 4K440 地点の解析結果(タイプ C, $F_L=1.0$)

【真栄橋左岸上流：4K440】

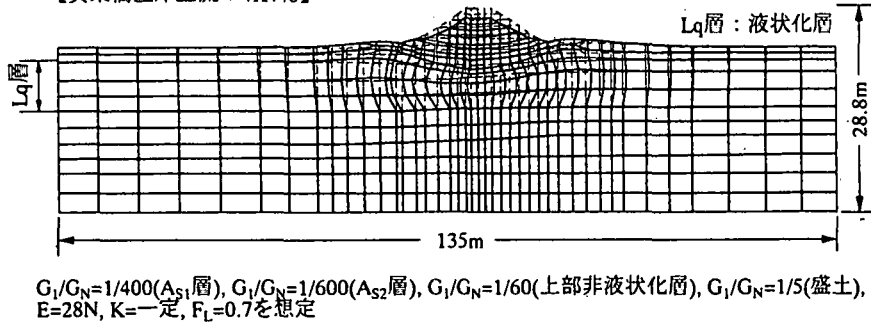


図-6 真栄橋左岸4K440地点の解析結果(タイプC, $F_L=0.7$)

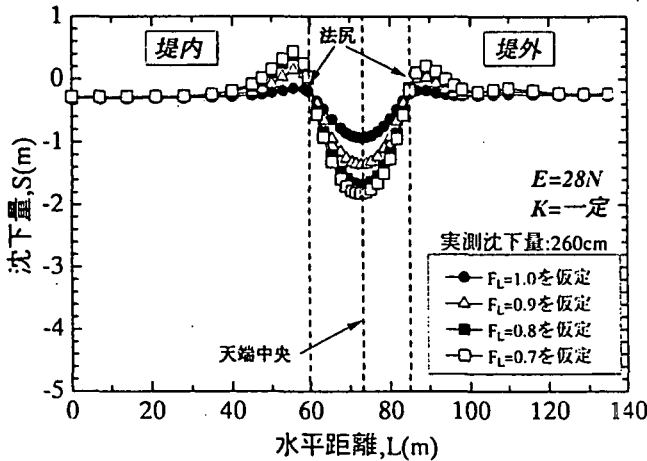


図-7 地表面沈下量の分布(真栄橋左岸4K440, タイプC)

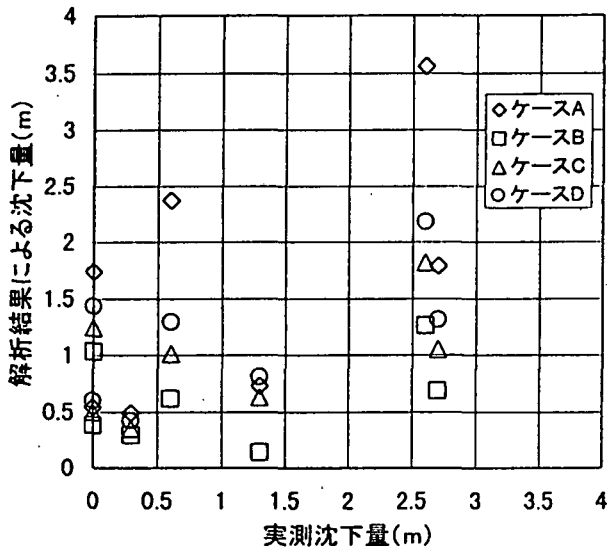


図-8 各地点の天端沈下量の比較

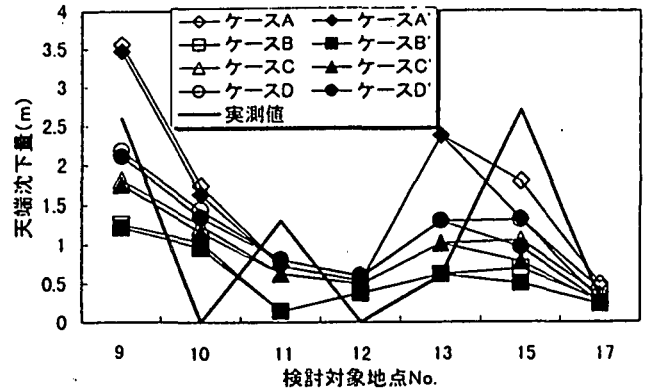


図-9 実測沈下量と解析結果の比較

- 1) 2m にもおよぶ天端沈下量に対しても、残留解析の適用が可能なようである。
- 2) 堤体のせん断剛性の低下割合で沈下量が大きく異なるので、この値の設定方法等について、今後更に検討が必要である。

なお、本解析は(財)国土開発技術センターの研究活動の一環として行い、堤防・地盤のデータも提供していただいたものである。また、解析に当たっては元東京電機大学大学院学生(東京ガス) 森本弘光氏に大変お世話になった。これらの方々に感謝する次第である。

参考文献

- 1) 安田進・吉田望・安達健司・規矩大義：液状化にともなう地盤の大変形の簡易予測方法 土と基礎 Vol. 47, No.6, pp.29-32, 1999.
- 2) 安田進・森本光弘・宇田将人：液状化層上部の非液状化層における強度・変形特性 第34回地盤工学研究発表会講演集 1999 (投稿中)。

5. まとめ

液状化に伴う河川堤防の沈下量を解析する方法として残留解析方法の適用を考え、その適用性について検討してみた。その結果、以下のような結果が得られた。