

地盤剛性低下の要因別評価法と液状化による 構造物被害予測法(FLUSH-L法)の提案

小堤治¹・平川和之²・小西武³・兪杰⁴

¹正会員 (株)日本科学技術研修所 (〒151 東京都渋谷区千駄ヶ谷五丁目10-9)

²工修 大阪市港湾局 (〒552 大阪市港区築港二丁目8-24)

³正会員 工博 (財)沿岸開発技術研究センター (〒102 東京都千代田区隼町三丁目16)

⁴理修 (株)日本科学技術研修所 (〒151 東京都渋谷区千駄ヶ谷五丁目10-9)

F_L 値による地盤が液状化するか否かの判定法は確立されているが、液状化した場合の構造物の被害程度の予測が難しく、そのため合理的な設計を行うのが困難である。有効応力法に基づく被害予測法が実用化されつつあるが、取扱いが難しい点もある。そこで F_L 値を液状化による地盤剛性の低減率と関連づける「 $G/G_0 \sim F_L$ 曲線」を導入し、この曲線を利用した全応力法プログラムによる構造物の被害予測法(FLUSH-L法)を既に提案した。この方法によれば有効応力法と整合的な予測が可能であるが、液状化以外の要因による剛性低下も含めたトータルな剛性低下を F_L 値のみで評価するので予測精度が悪い場合もあった。そこで地盤の剛性低下を各要因別に評価する方法を導入してFLUSH-L法の予測精度の向上を図った。

Key Words : Liquefaction, Earthquake Damage, Total Stress Analysis, FLUSH

1. はじめに

(1)FLUSH-L法について

F_L 値による地盤が液状化するか否かの判定法は既に確立されているが、液状化した場合の構造物の被害程度の予測は、今までは技術的に困難であった。従って、液状化するとなれば、対策は徹底的に地盤改良をして液状化させないというものになりがちであり、その結果、安全側の設計になりやすい。

これに対して、有効応力法に基づく被害予測法が実用化されつつあるが、取扱いが難しい点もある。そこで、より簡便な方法として、 F_L 値に基づく液状化地盤の剛性評価法と、これを利用した構造物の被害程度の予測法(FLUSH-L法)を既に提案した¹⁾。

(2)FLUSH-L法の概要

FLUSH-L法による構造物被害の予測手順を図-1に示す。この方法では、FLUSHを用いて F_L 値を算定し、その値から液状化やその他の要因による地盤のせん断剛性の低下を評価し、低下した地盤剛性を用いて線形の動的解析および自重解析を行う。動的解析からは、地震力の作用により液状化した地盤中の矢板等に生じる断面力が求まる。自重解析からは、液状化した地盤に重力が作用して生じる残留変形と、それに対応する矢板等の断面力が求まる。

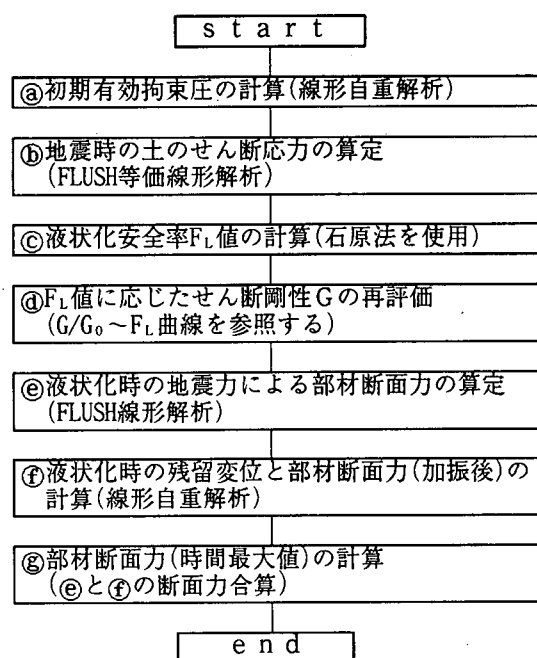


図-1 FLUSH-L法の構造物被害の予測手順¹⁾

図-1の「㉔ F_L 値に応じたせん断剛性 G の再評価」では、 F_L 値から液状化地盤のせん断剛性低減率 G/G_0 を推定するために $G/G_0 \sim F_L$ 曲線を参照する。ここに、 G_0 はPS検層のせん断波速度等から算定した初期せん断剛性、 G は液状化地盤のせん断剛性である。この曲

線を定めるに当たり、実地盤の液状化時のせん断剛性は不明なので、有効応力法に基づいて液状化を考慮するFLIPプログラム²⁾の解析値で代用した。

大阪港の鋼管矢板式のA岸壁(-12m)の断面についてFLUSHにより F_L 値を求め、同一断面をFLIPでも解析し、 F_L 値とFLIPのせん断剛性低減率 G/G_0 との間の関係を調べたところ一定の関係があり、また他の断面においても同様の関係が認められたので、これまでにを行った各種断面の解析では主にA岸壁での検討で得られた $G/G_0 \sim F_L$ 曲線を用いた³⁾。

なお、FLIPは土の応力-歪関係には双曲線モデルに従う複数のバネで構成されるマルチスプリングモデル⁴⁾を、過剰間隙水圧モデルとしては井合モデル²⁾を採用している。また間隙水には非排水条件を課している。FLIPの液状化解析では初期自重解析から地震応答解析まで一貫して土の応力-歪履歴を追跡し、各段階での地盤剛性を評価することが可能である。

2. FLUSH-L法の問題点と 剛性低下の要因別評価法

地盤剛性の低下は液状化以外の他の要因によっても生じる。諸要因によるトータルな剛性低減率 G/G_0 を F_L 値のみで説明しようとする上述の方法は、簡便ではあるが、場合によっては予測精度の低下を招く。そこで、地盤の剛性低下を以下の①～③に示す要因別に評価する必要があることを既に述べた³⁾。

- ①重力の作用(主働破壊等)
- ②地震力の作用
- ③液状化

FLIPによる初期自重解析後の地盤のせん断剛性を G_1 、過剰間隙水圧を上昇させない条件での加振後のせん断剛性を G_2 、過剰間隙水圧の上昇を考慮した場合の加振後のせん断剛性を G で表すと、重力の作用によるせん断剛性低減率は G_1/G_0 、地震力の作用による低減率は G_2/G_1 、液状化による低減率は G/G_2 と表すことができる。液状化地盤のせん断剛性 G はこれらの低減率を掛け合わせた次式により表現される。

$$G = G_0 \times \frac{G_1}{G_0} \times \frac{G_2}{G_1} \times \frac{G}{G_2} \quad (1)$$

初期せん断 重力による 地震力による 液状化による
剛性 剛性低減率 剛性低減率 剛性低減率
(主働破壊等)

線形や等価線形のプログラムによる結果からこれらの低減率を推定できれば、液状化地盤のせん断剛性 G を簡便に推定できる。各低減率の評価に用いる指標を表-1に示す。これらの指標を用いた評価の方針

は大阪港A岸壁のデータに基づいて既に提案した³⁾。

表-1 地盤剛性低下要因と剛性低減率評価用の指標

剛性低下要因	低減率	評価のための指標
①重力の作用	G_1/G_0	線形自重解析結果であるせん断応力比 τ_{max}/σ_{m0}'
②地震力の作用	G_2/G_1	等価線形解析結果であるせん断剛性低減率 G_{new}/G_0
③液状化	G/G_2	F_L 値

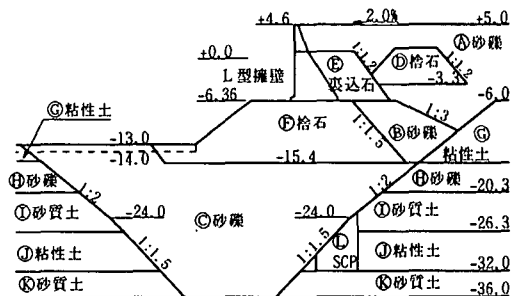


図-2 大阪港D岸壁の断面

表-2 各土層の材料定数

記号	土質	基準拘束圧 σ_{m0}' tf/m ²	せん断剛性 G_{m0} tf/m ²	パラメータ m_g	湿潤密度 ρ_t tf/m ³	せん断抵抗角 ϕ_f 度	N1=15 回での液状化 強度比
A, B	砂礫	10	11500	0.5	2.00	35	0.225
C	砂礫	10	13000	0.5	2.00	35	0.40
D, E, F	礫石等	10	18300	0.5	2.00	40	—
G	粘性土	10	1160	1.0	1.60	30	—
H	砂礫	10	9500	0.5	2.00	35	0.31
I	砂質土	10	12600	0.5	2.00	37	0.40
J	粘性土	10	1230	1.0	1.70	30	—
K	砂質土	10	13400	0.5	2.00	37	0.55
L	SCP	22	11100	0.5	1.91	34	—

※1 任意の平均有効応力 σ_m' に対する初期せん断剛性 G_0 は次式により算定される。 $G_0 = G_{m0} (\sigma_m' / \sigma_{m0}')^{m_g}$

ここでは、その方針に基づき改良されたFLUSH-L法をA岸壁とは形式の異なる大阪港D岸壁に適用して、この方法の有効性を示す。

3. 適用例

(1)対象断面と入力地震動

大阪港D岸壁(栈橋式)の断面を図-2に示す。なお、ここでは栈橋杭と床版は無視し、L型擁壁による重力式護岸を検討対象とした。また、表-2には図-2の各土層の材料定数を示す。

入力地震動として大阪市暫定波を用い、補助的に八戸波も用いた。大阪市暫定波は、以前に大阪市の地域防災計画で暫定的に規定された入力地震動で、

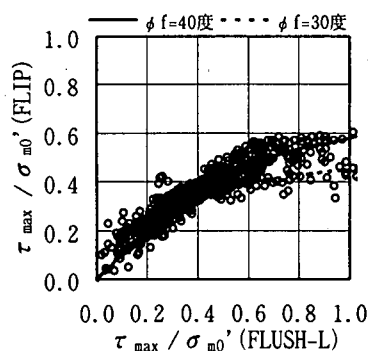


図-3 せん断応力比(τ_{max}/σ_{m0}')のFLIP(初期自重解析)と線形自重解析の比較(D岸壁)

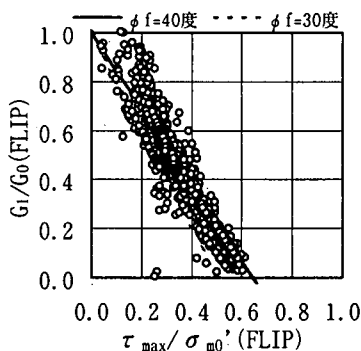


図-4 せん断応力比(τ_{max}/σ_{m0}')と G_1/G_0 の関係(D岸壁) 両者ともFLIPの結果

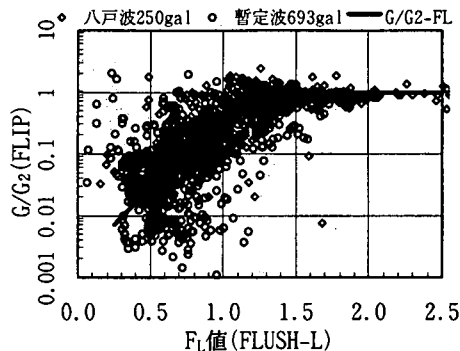
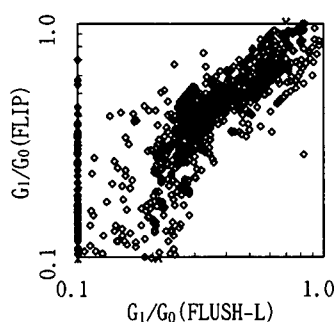
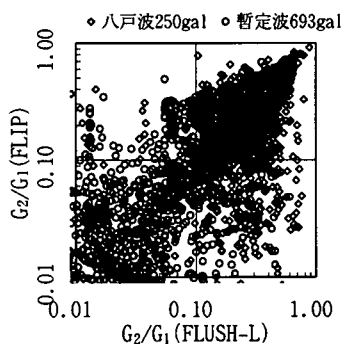


図-5 G/G_2 (FLIP)と F_L 値 (FLUSH-L)の関係(D岸壁) 実線はA岸壁の検討で得られた $G/G_2 \sim F_L$ 曲線

(a) G_1/G_0



(b) G_2/G_1



(c) G/G_2

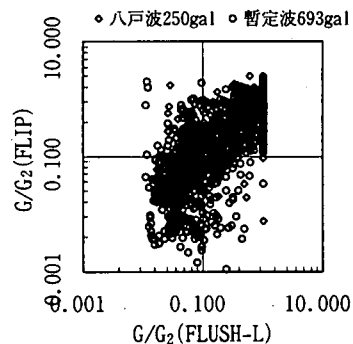


図-6 各種剛性低減率のFLIPとFLUSH-Lの比較

これは兵庫県南部地震クラスの地震が大阪市の直下で発生した場合を想定して策定されたものである。本検討では、大阪市埋立地盤の天満砂礫層上端で規定される波(2E波、最大加速度693gal)を用いた。

(2) せん断剛性低減率

a) 重力の作用によるせん断剛性低減率

D岸壁の断面に対するFLIPの初期自重解析結果およびせん断剛性として G_0 を用いた線形自重解析結果のそれぞれに基づき各土要素のせん断応力比(τ_{max}/σ_{m0}')を算定した。両者の関係を図-3に示す。同図によれば、せん断応力比が0.3~0.4程度(静止土圧係数 ≈ 0.5 の水平成層地盤相当)までは、FLIPと線形自重解析は同程度のせん断応力比であり、その後は、FLIPのせん断応力比は $\sin \phi_i$ に漸近する。同様の関係は形式の異なる大阪港A岸壁についても得られていて、この種の関係をある程度一般的な関係と見なして良さそうであると思われるので、FLUSH-Lにおいては、最初の線形自重解析結果のせん断応力比から、図中に示した曲線を用いて、FLIP相当のせん断応力比に変換することとした。

FLIP相当のせん断応力比が分かると、双曲線モデル

ルの仮定に基づき G_1/G_0 が評価できる。参考までに、FLIPの初期自重解析結果であるせん断応力比と剛性低減率 G_1/G_0 の関係を図-4に示す。なお、図中の直線は双曲線モデルに基づく次式を表示したものである。

$$G_1/G_0 = 1 - (\tau_{max}/\sigma_{m0}')/\sin \phi_i \quad (2)$$

この方法で推定した低減率 G_1/G_0 の値とFLIPの G_1/G_0 の関係を図-6(a)に示す。

b) 地震力の作用によるせん断剛性低減率

FLIPの G_2/G_1 を推定するパラメータとしてFLUSHの等価線形解析結果であるせん断剛性低減率 G_{new}/G_0 を用いることが考えられる。本来 G_{new}/G_0 が G_2/G_1 に相当するとは限らないが、実際に両者の関係を見ると良い相関がある。剛性低減率 G_{new}/G_0 をそのまま G_2/G_1 の推定値としても良さそうであるが、ここでは若干修正して $(G_{new}/G_0)^{1.3}$ を G_2/G_1 推定値であるとした。このようにして評価した G_2/G_1 とFLIPの G_2/G_1 の比較を図-6(b)に示す。なお、FLUSHによる等価線形解析での $G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ 曲線は双曲線モデルに基づく曲線を使用した。

c) 液状化によるせん断剛性低減率

大阪港D岸壁の断面に対するFLIPの液状化による

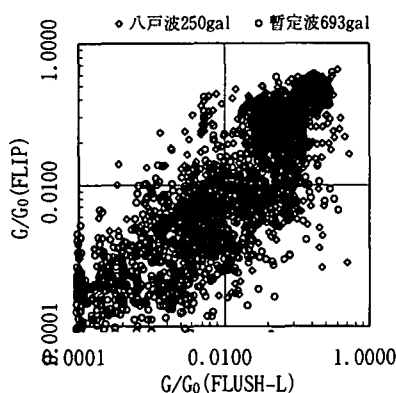


図-7 トータルな剛性低減率(G/G_0)のFLIPとFLUSH-Lの比較

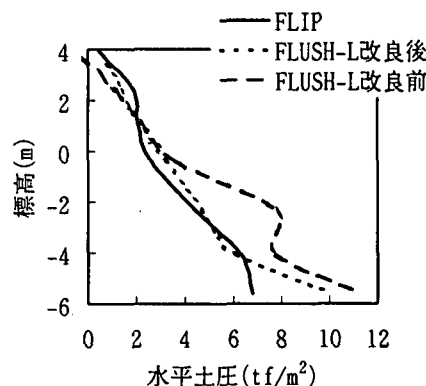


図-8 L型擁壁背面の水平土圧分布(加振後)

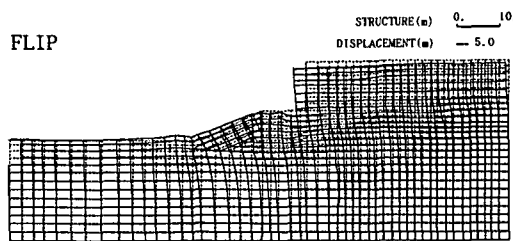
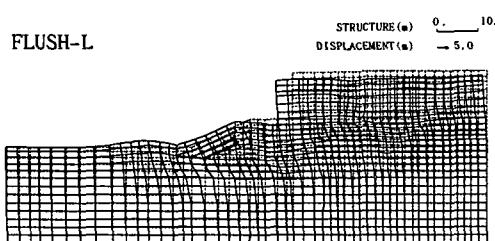


図-9 残留変形図(D岸壁：大阪市暫定波)

せん断剛性低減率 G/G_2 と等価線形解析結果に基づく F_L 値の関係を図-5に示す。ほぼ同一の関係は大阪港A岸壁の検討でも得られていて³⁾、 F_L 値と G/G_2 の間には一定の関係があると予想される。ここでは図-5に実線で示すA岸壁の検討で得られた $G/G_2 \sim F_L$ 曲線を用いて G/G_2 を推定することとした。このようにして評価した G/G_2 とFLIPの G/G_2 の関係を図-6(c)に示す。

d) トータルな剛性低減率

図-7には、上述の方法で推定した3つの剛性低減率を掛け合わせて得たトータルな剛性低減率 G/G_0 の推定値とFLIPによる G/G_0 の比較を示す。

(3) 応答値の比較

大阪市暫定波を入力した場合のFLIPとFLUSH-Lの応答値の比較を以下に示す。

a) L型擁壁背面の土圧分布

図-8にはFLIPおよび改良前後のFLUSH-L法による加振後のL型擁壁背面の水平土圧分布を示す。改良前のFLUSH-Lでは裏込石等の剛性評価が不正確で、FLIPとは異なる傾向を示す。

b) 残留変形

FLIPおよび改良後のFLUSH-Lによる加振後の残留変形の比較を図-9に示す。L型ブロック頂部の前出し量は共に5m程度で、変形パターンも概ね一致している。なお、改良前のFLUSH-Lの前出し量は約2mであった。

4. 結論

FLUSH-Lは液状化等の各種要因によるトータルな地盤剛性の低下を F_L 値のみで評価していたが、重力の作用、地震力の作用、液状化の3つの要因別に評価するように改良した。その結果、液状化による構造物の被害予測が精度よく行えるようになった。

今後の課題としてFLUSH-Lで使用した以下の3つの関係の妥当性を理論面から検討する必要がある。

- ①線形自重解析とFLIPの τ_{max}/σ_{mo}' の関係
- ② G_2/G_1 (FLIP)と G_{new}/G_0 (等価線形)の関係
- ③ G/G_2 (FLIP)と F_L 値 (等価線形)の関係

また、改良されたFLUSH-Lは常時の土圧の計算等にも適用できる可能性があり、今後実証する必要がある。

参考文献

- 1) 柴田徹, 井合進, 木山正明, 上藺晃, 鈴木孝幸, 小堤治, 兪杰: "FL値による地盤の剛性評価法と構造物被害の予測法(FLUSH-L法)", 第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集(土木学会), 1997年1月
- 2) Iai, S., Matsunaga, Y., Kameoka, T.: "Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility", 港湾技術研究所報告 第29巻4号, pp. 27-56
- 3) 柴田徹, 井合進, 武田弘一, 小西武, 小堤治, 本間高弘, 金子浩士: "液状化による構造物被害の予測法(FLUSH-L法)の適用事例", 第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集(土木学会), 1997年1月
- 4) Touda, I., Ishihara, K.: "Modelling soil behaviour under principal stress axes rotation", Proc. 5th International Conference on Numerical Method in Geomechanics, Nagoya, pp. 523-530, 1985