

液状化による構造物被害の 予測法 (FLUSH-L法) の適用事例

福山大学工学部 柴田徹* 運輸省港湾技術研究所 井合進**
大阪市港湾局 武田弘一*** (財)沿岸開発技術研究センター 小西武****
(株)日本科学技術研修所 小堤治***** 本間高弘*****
(株)日本港湾コンサルタント 金子浩士*****

地盤が液状化した場合に構造物が受ける被害を予測する方法として、 F_L 値に基づく液状化地盤の剛性評価法 ($G/G_0 \sim F_L$ 曲線) と、これを利用した構造物の被害程度の予測法 (FLUSH-L) を既に提案した。同時に、 $G/G_0 \sim F_L$ 曲線の例として、大阪港の鋼管矢板式岸壁の置換砂と埋土の検討により得られた曲線を示した。

この曲線を用いたFLUSH-Lの方法により、当該断面や他のいくつかの断面に対して液状化を考慮した被害予測を行い、その結果を有効応力法による予測値と比較した。両者は概ね一致したので、提案した方法は地盤が液状化した場合の構造物の被害程度の予測に有効であると思われる。なおこの方法では、液状化を含めた各種要因によるトータルな剛性低減率を F_L 値のみで評価することになるので、簡便ではあるが場合によっては適切な剛性評価ができない。その対策として、要因別の剛性低減率を組合わせて地盤剛性を評価する方法を提案する。

1. はじめに

阪神・淡路大震災では液状化による港湾施設の被害が甚大であり、これを受けて各方面で岸壁・防潮堤等の液状化対策が検討されている。しかし、現状では地盤が液状化した場合の構造物の被害程度を予測するのが難しく、そのため、合理的な設計を行うことが困難である。そこで、 F_L 値による液状化地盤の剛性評価法 ($G/G_0 \sim F_L$ 曲線) とそれを用いた全応力法プログラムによる構造物の被害程度の予測法 (FLUSH-L) を別途報文で提案した¹⁾。ここでは、この予測法を大阪港の岸壁等に適用して、有効応力法と同様、構造物の被害程度の予測が可能であることを示す。またこれらの適用例に基づき、予測の基礎となる $G/G_0 \sim F_L$ 曲線の特性を検討する。さらに上

記剛性低減率 (G/G_0) は、液状化以外の種々の要因による剛性低下も含んでいるが、これらを分離して各要因別に剛性の低下を評価することにより、予測精度が向上する可能性があることを示す。

2. FLUSH-Lの方法と $G/G_0 \sim F_L$ 曲線

図-1にはFLUSH-Lの被害予測手順¹⁾を示す。この手順では、④の「 F_L 値に応じたせん断剛性 G の再評価」の際に $G/G_0 \sim F_L$ 曲線を活用する。図-2には、大阪港A岸壁の置換砂と埋土の検討で得られた $G/G_0 \sim F_L$ 曲線¹⁾を示す。

3. 各断面の検討結果

大阪港の岸壁等の断面を対象に、FLUSH-Lの方法に基づき液状化を考慮した構造物の被害予測を行った。また同じ断面を、筆者の一人が開発した有効応力法に基づき液状化を考慮する二次元振動解析プログラムFLIP²⁾を用いて解析し、両者の予測値を比較した。

(1) 入力地震動

入力地震動として、八戸波および大阪市暫定波を

キーワード：液状化解析、地震被害予測、
液状化地盤の剛性評価法

*福山大学工学部土木工学科 (0849)36-2111

**運輸省港湾技術研究所構造部 (0468)44-5028

***大阪市港湾局建設部 (06)572-5121

****(財)沿岸開発技術研究センター(03)3234-5861

***** (株)日本科学技術研修所 (03)5379-5591

***** (株)日本港湾コンサルタント(03)3792-1004

用いた。八戸波は1968年十勝沖地震(M7.9)の際に八戸港で観測された地表での記録波形から逆算した基盤での加速度波形である。ただし最大加速度は250

galとし、一部の計算では600galとした。大阪市暫定波は、大阪市の地域防災計画で暫定的に規定されている入力地震動で、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。図-3には、これら入力地震動の波形を示す。

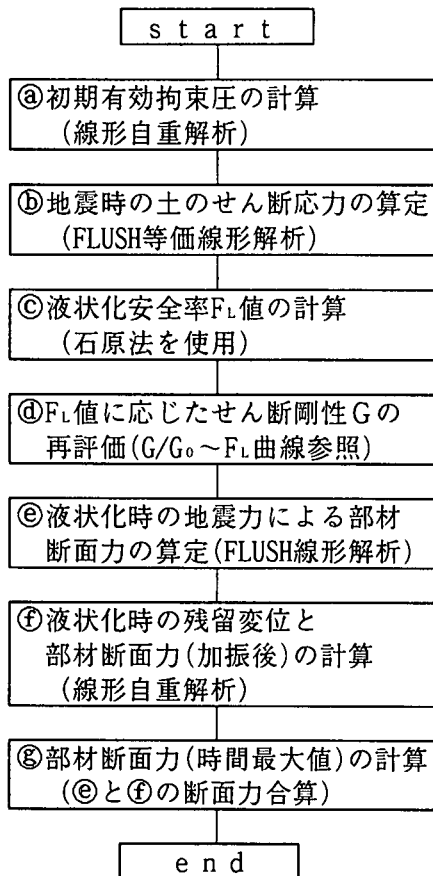
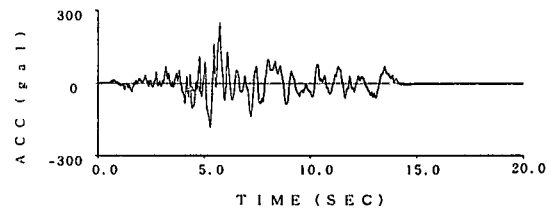


図-1 FLUSHを利用した液状化による構造物の被害程度予測手順(FLUSH-L)

八戸波(250gal他)



大阪市暫定波(693gal)

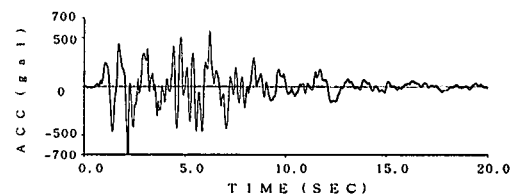


図-3 入力地震動

(2) 対象断面と計算ケース

検討の対象とした断面は、次の①~③に説明する大阪港の各施設の現況断面と、それぞれに対する液

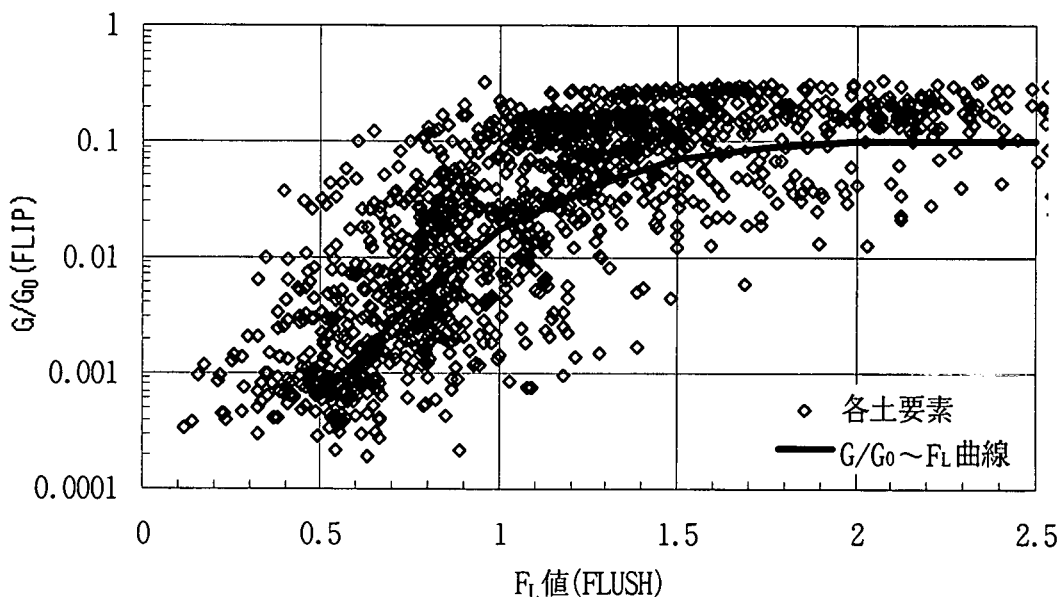
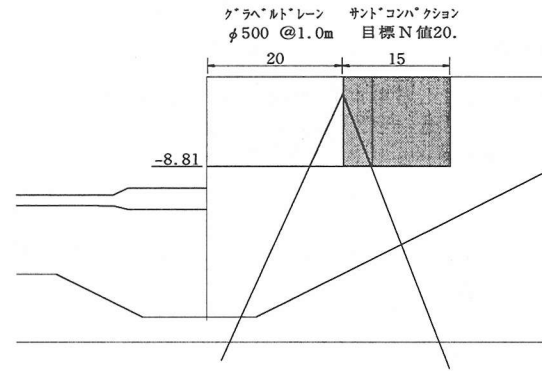
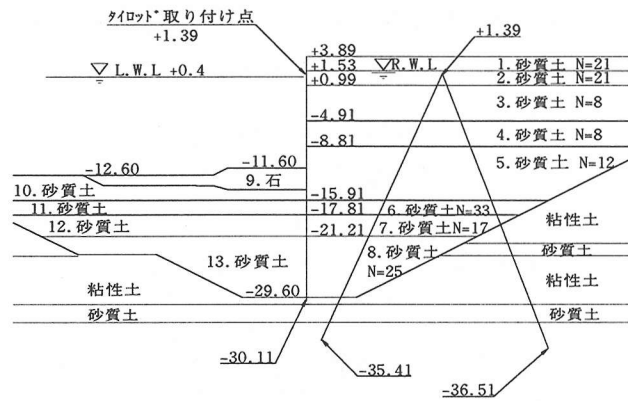
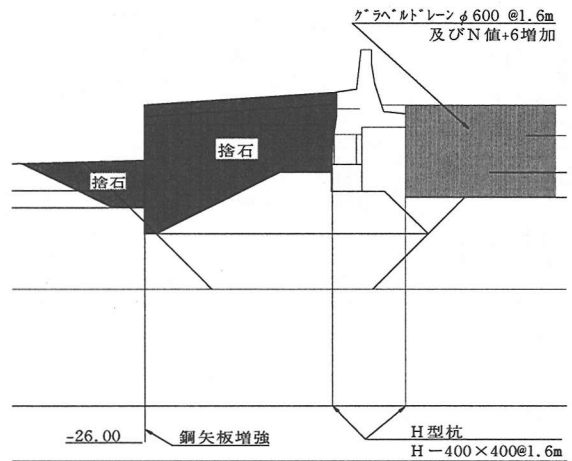
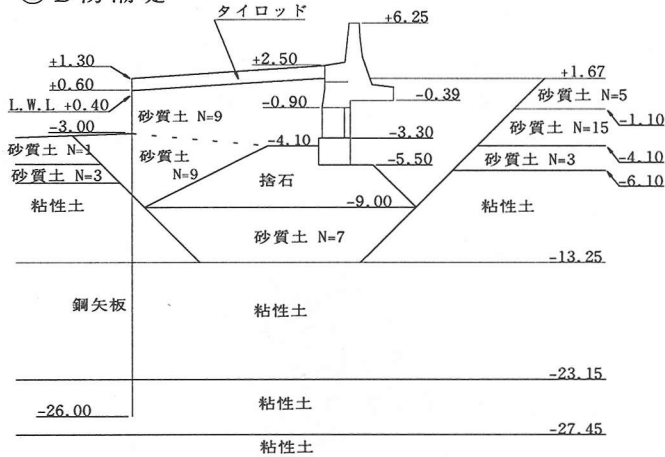


図-2 FL値(FLUSH)とせん断剛性低減率G/G0(FLIP)の関係(八戸波100, 250, 600gal, 置換砂・埋土)

① A 岸壁



② B 防潮堤



③ C 護岸

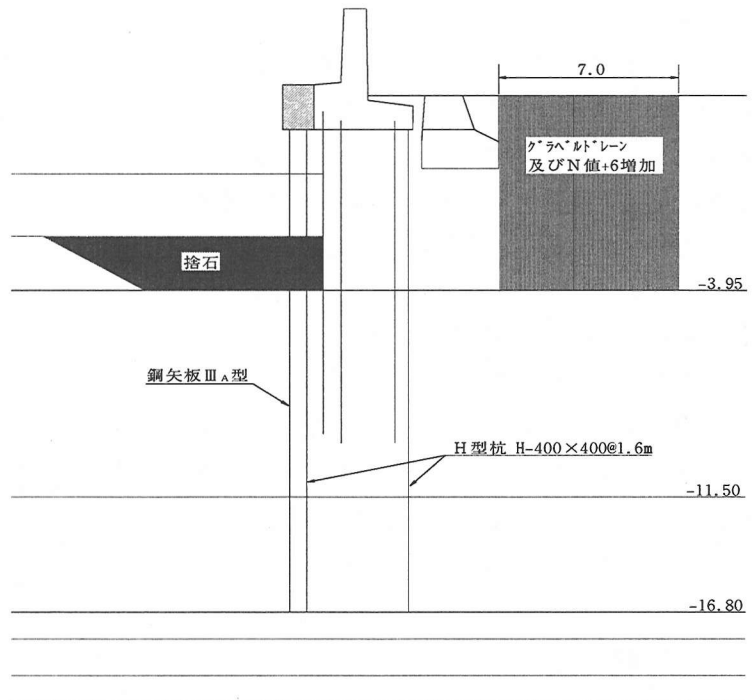
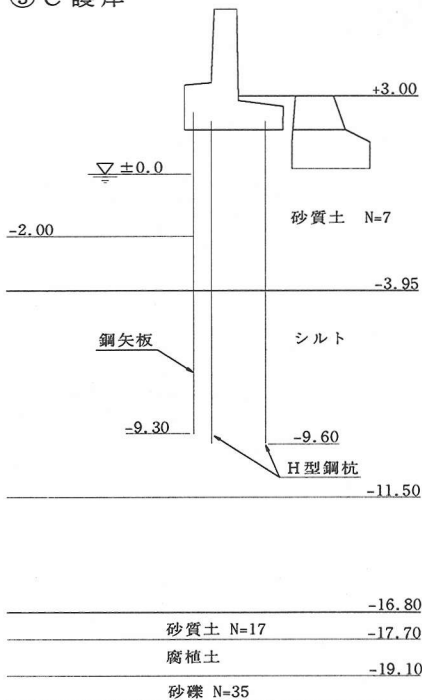


図-4 検討対象断面 左側：現況断面、右側：液状化対策済断面（図中に記載の標高の単位はm）

状化対策施工後の想定断面の合計6断面である。

- ①大阪港A岸壁 (鋼管矢板式、控えは組杭)
- ②大阪港B防潮堤 (矢板式、控えは重力式)
- ③大阪港C護岸 (矢板+杭式)

これら①～③の断面図とそれぞれの液状化対策工を図-4に示す。また、これらの断面と入力地震動の組合せを表-1に示す。

表-1 検討ケース

施設	断面	入力地震動		
		従来設計	大加速度	
		八戸波 250gal	八戸波 600gal	暫定波 693gal
大阪港A岸壁	現況	○	○	—
	対策済	○	—	—
大阪港B防潮堤	現況	○	—	—
	対策済	○	—	○
大阪港C護岸	現況	○	—	—
	対策済	○	—	○

(3) $G/G_0 \sim F_L$ 曲線

本解析で採用した $G/G_0 \sim F_L$ 曲線は、原則として大阪港A岸壁(現況断面)の検討で得た図-2の曲線である。因みに他の断面でも、概ね同様の関係が得られており、例えばB防潮堤における G/G_0 (FLIP)と F_L 値(FLUSH)の関係を図-5に示す。

C護岸付近では標高-3.95m~-11.5mの範囲にシルト層がある。この層からの試料に対して非排水繰返し三軸試験が実施され、その結果、過剰間隙水圧の上昇に伴う歪の増大が見られた。ただし過剰間隙水圧比は軸歪が片振幅2.5%の時に87%であり、砂質土に比して若干低めであった。FLIPの解析では、この点を考慮してモデル化した。またC護岸の現況断面の解析モデルを利用して、シルト層の $G/G_0 \sim F_L$ 関係を見直した。その結果、図-6に示すように、 F_L 値に応じた剛性低減率 G/G_0 は砂質土よりも大きめの結果となったので、当該シルト層に関してのみ、この $G/G_0 \sim F_L$ 曲線を用いた。

(4) 被害予測の比較

各断面についてFLUSH-Lの方法により求めた次の①～⑤の諸量を、FLIPの結果と比較して図-7に示す。なおFLIP、FLUSH-Lとも前面矢板やH型鋼杭のモデル

化には線形はり要素を使用した。そのため、それらの降伏後の挙動は正確ではないが、一応の目安として、得られた値をそのまま表示した。

- ①矢板本体の縁応力(最大値)
- ②タイロッドの張力(最大値)
- ③H型鋼杭の縁応力(最大値)
- ④矢板上端/上部工の水平変位(残留値)
- ⑤矢板直背後/上部工の沈下量(残留値)

またFLUSH-Lによる残留変形および矢板の断面力分布の例を、FLIPと比較して、それぞれ図-8、図-9に示す。

これらの結果を見ると、FLUSH-Lの結果は、一部でFLIPと一致しない部分もあるが、両者は概ね整合性がとれている。

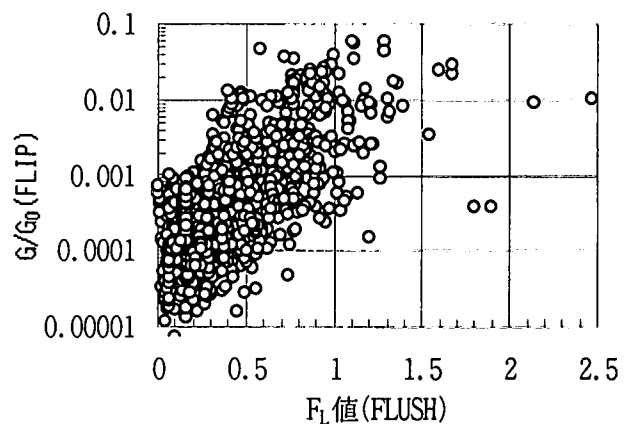


図-5 大阪港B防潮堤(現況断面)の F_L 値(FLUSH)と G/G_0 (FLIP)の関係

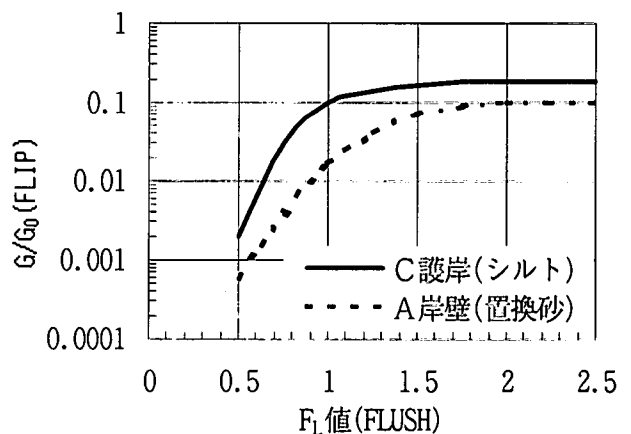
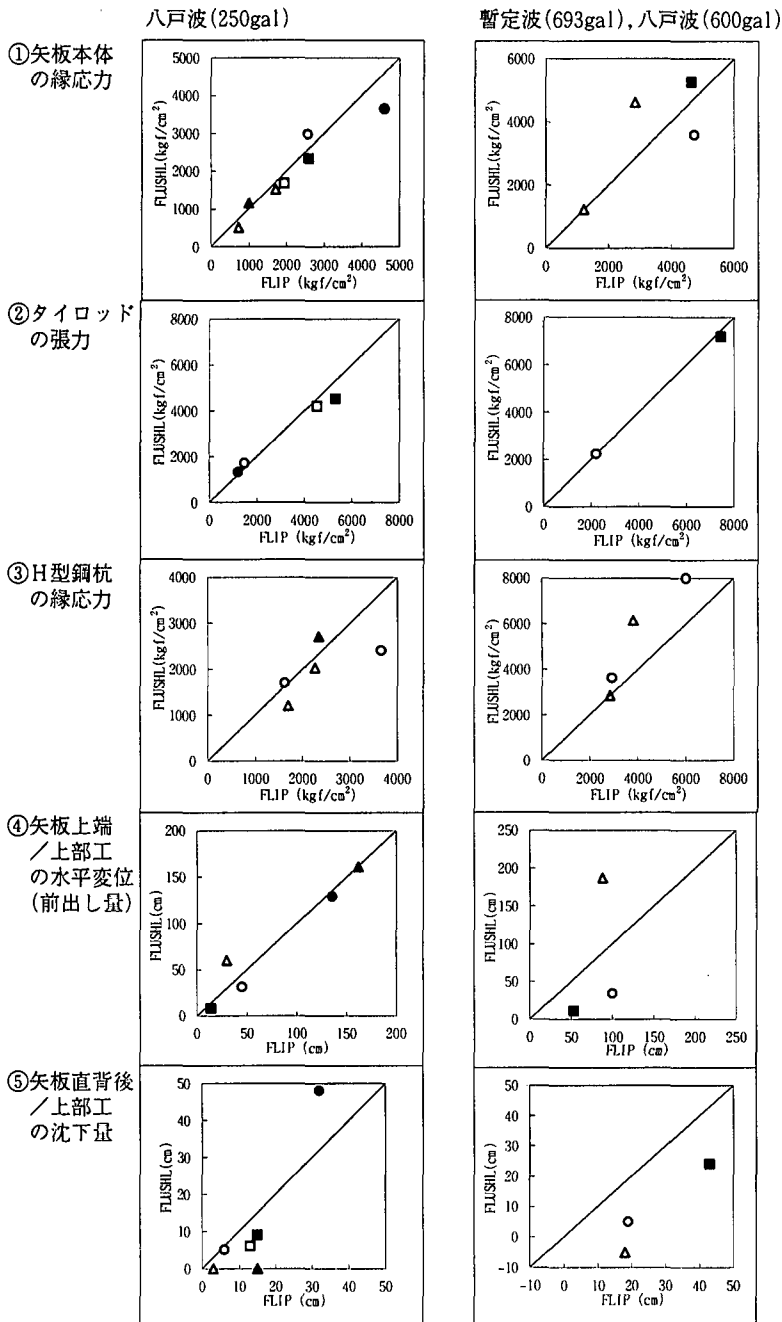


図-6 大阪港C護岸(現況断面)のシルト層の $G/G_0 \sim F_L$ 曲線



■ A岸壁 (現況断面) ● B防潮堤 (現況断面) ▲ C護岸 (現況断面)
□ A岸壁 (対策済み断面) ○ B防潮堤 (対策済み断面) △ C護岸 (対策済み断面)

図-7 FLIPとFLUSH-Lの部材応力および残留変位の比較

(5) FLIPの結果と一致しない場合の検討

FLUSH-Lの結果がFLIPと一致しない主な場合は、次の①と②である。

- ① A岸壁 (■印) と B防潮堤 (○印) ; 大加速度の場合の残留変位は、FLUSH-Lの方が小さい。
- ② C護岸 (△印; 対策済断面) ; 断面力、残留変位はFLUSH-Lの方が大きめの場合がある。

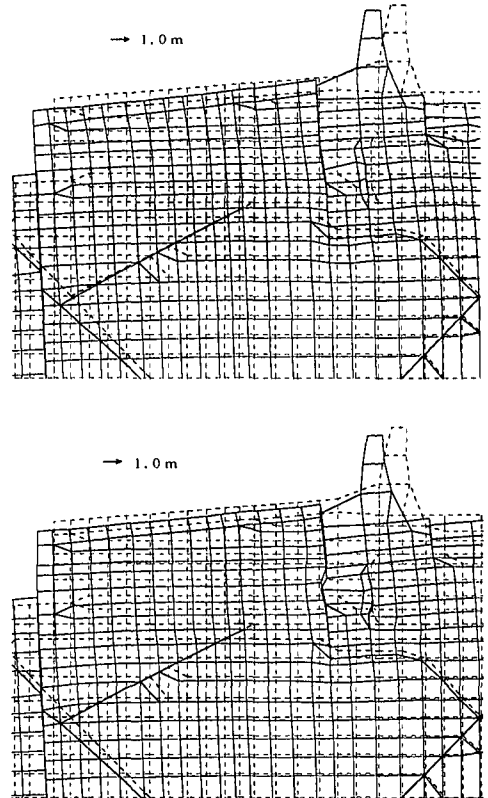


図-8 B防潮堤 (現況断面) : 残留変形の比較 上段 FLIP、下段 FLUSH-L

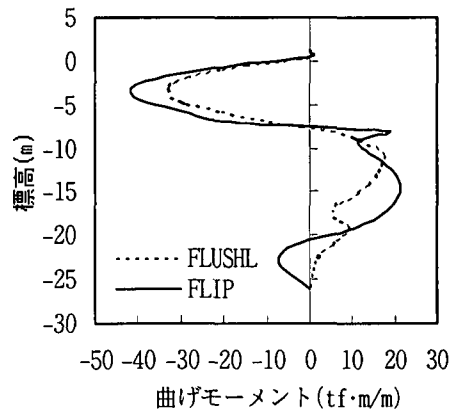


図-9 B防潮堤 (現況断面) : 矢板の断面力分布の比較 (時間最大値)

上記①は、大加速度の場合に粘土層の剛性評価に食違があるためである。FLIPの解析では粘土層の応力-歪モデルは、砂質土と同様、双曲線モデルを拡張したマルスプリングモデル³⁾を使用した。このため、一定以上のせん断応力が加わろうとすると大歪が生じやすい。他方FLUSH-Lの場合は、標準的なG/G₀~γ曲線⁴⁾を用いた等価線形解析の結果として得られるせん断剛性を使用したので、あまり剛性

が低下しない。

同様の問題は、液状化する可能性のある層でも起こりうる。すなわち、液状化抵抗が小さい場合と大きい場合を考えると、同一の F_L 値を与えるためには、前者は小さな地震加速度でよく、後者では大きな地震力が必要になる。この状態をFLIPで再現すると、後者の剛性低減率 G/G_0 には、液状化以外にも地震力による寄与が含まれていると考えられる。従って、同一の F_L 値に対する剛性低減率は、液状化強度が大きければ、低減の度合いも大きくなるが、これを F_L 値のみで評価しようとするが無理が生じる。大阪港A岸壁の置換砂・埋土の液状化抵抗は、それほど極端な値ではなく(0.24から0.42の範囲)、B防潮堤、C護岸の地盤も概ね同程度の液状化抵抗なので、A岸壁の検討で得た $G/G_0 \sim F_L$ 曲線が適用できたと考えられる。

上記②は、C護岸の液状化対策済断面において、矢板近傍のシルト層の剛性を正しく評価できなかったためである。液状化対策によって、堤体下の前面矢板やH型鋼杭は大幅に補強された他、矢板等の根入れが深くなっている(図-4の③)。この結果、主働・受働破壊ゾーンが改良・軽減され、シルト層の剛性低下が抑えられたと考えられる。

FLIPでは、この効果は自動的に算入されるが、FLUSHの F_L 値には影響を与えない。従ってこの種の影響が著しい場合は、 F_L 値だけで剛性低減率を評価

するのは無理がある。A岸壁の検討で $G/G_0 \sim F_L$ 曲線を決める際に、 F_L 値が1.0以上の領域では G/G_0 の値を低めに決めたのも、この主働・受働破壊に対応させるためであった。

4. 剛性低下の要因別の評価法

地盤剛性の低下は、液状化のみならず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無理がある。

FLUSH-Lの手順の中の自重解析を、これまで通り線形解析として行うことを前提に、剛性低下を要因別に評価することが可能か検討する。

(1) 液状化による剛性低減率

A岸壁の現況断面の解析モデルを利用して、FLIPにより液状化によるせん断剛性低減率(G/G_2)を求め、それをFLUSHによる F_L 値と関連づけた。この関係を図-10に示す。図中のプロット点は、解析モデルの各土要素に対応する。図の縦軸は、FLIPによる液状化解析の結果である加振後(地震が終わって重力のみが作用している状態)のせん断剛性 G を、地盤を液状化させない条件で求めたせん断剛性 G_2 で割ったものであり、純粹に液状化による剛性低減率と考えられる。

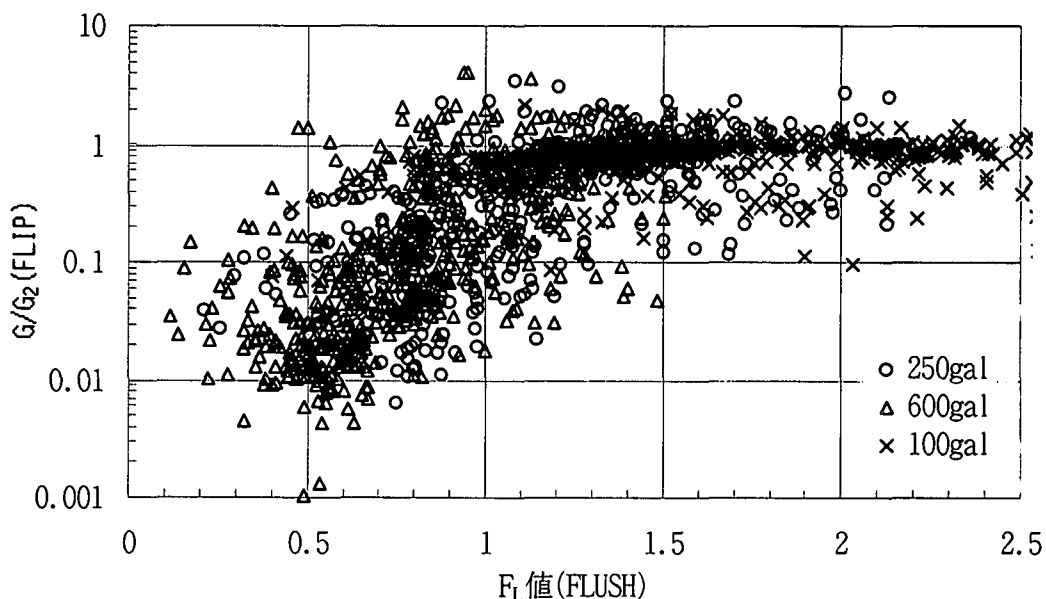


図-10 大阪港A岸壁(置換砂・埋土) : F_L 値(FLUSH)と G/G_2 (FLIP)の関係

図-10に見られるとおり、 F_L 値が1.0より大きい範囲では、せん断剛性低減率は概ね1.0に等しいが、 F_L 値が1.0より小さくなると、剛性低減率も1.0より小さくなる。

(2) その他の要因による剛性低減率

図-2と図-10を比較すると、全般的に前者のトータルな剛性低減率が後者の液状化による剛性低減率と比べて、約1桁小さい。この差は、液状化以外の要因による剛性低下によるものである。この要因を、

- ①重力の作用 (主働破壊等)
- ②地震力の作用

と考え、これらも適当な力学的指標により評価できるか検討した。

(a) 重力の作用に伴うせん断剛性の低減率

図-11には、A岸壁 (現況断面) のFLIPによる自重解析結果に基づく、せん断応力比(τ_{max}/σ_{m0}')とせん断剛性低減率(G_1/G_0)の関係を示す。 G_0 は初期せん断剛性であり、これはPS検層結果に基づく水平成層地盤のせん断剛性に相当する。すなわち、微小な γ_{xy} に対する τ_{xy}/γ_{xy} に相当する。 G_1 は自重解析後の τ_{max}/γ_{max} を表し、主働・受働破壊領域ではかなり小さくなる。 τ_{max} と γ_{max} は次式により定義されるが、自重解析結果であるので、共に軸差成分が支配的であると考えられる。

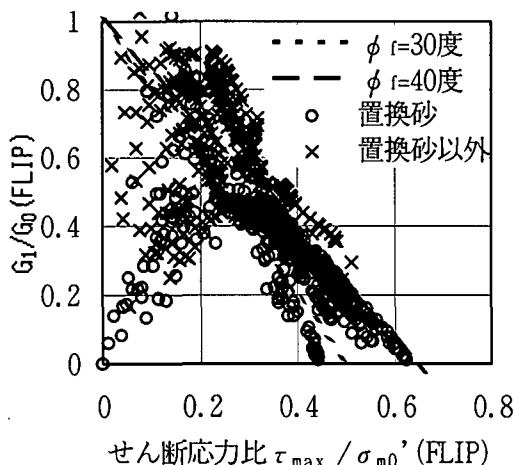


図-11 大阪港A岸壁：せん断応力比(τ_{max}/σ_{m0}')と剛性低減率(G_1/G_0)の関係 (両者ともFLIPの初期自重解析結果に基づく) 図中の直線は $y=1-x/\sin\phi_r$ (y :縦軸、 x :横軸)

$$\tau_{max} = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 / 4 + \tau_{xy}^2}$$

$$Y_{max} = \sqrt{(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + Y_{xy}^2}$$

ところでFLUSH-Lの初期自重解析は、線形弾性解析として実施する。その結果に基づく各要素のせん断応力比(τ_{max}/σ_{m0}')とFLIPのせん断応力比の関係を図-12に示す。この図は次に述べるように、せん断応力比の線形自重解析とFLIP解析とを結びつけるために用いられる。

以上の説明に基づき、次の手順で重力の作用に伴うせん断剛性低減率を評価することが可能である。

- ①FLUSH-Lの線形自重解析により、せん断の応力比(τ_{max}/σ_{m0}')を求める。
- ②図-12により、FLIPでのせん断応力比に変換する。
- ③図-11により、自重の作用に伴うせん断剛性低減率(G_1/G_0)を評価する。

なお言うまでもなく、線形自重解析の代わりに非線形自重解析を行えば、直ちに G_1/G_0 が求められる。

(b) 地震力の作用に伴うせん断剛性低減率

地震力の作用に伴うせん断剛性低減率は G_2/G_1 と表現できる。ここで G_1 、 G_2 は、前述のとおり、それぞれ自重解析後のせん断剛性、および地盤を液状化させない条件で得られた加振後のせん断剛性であり、共にFLIPの結果である。

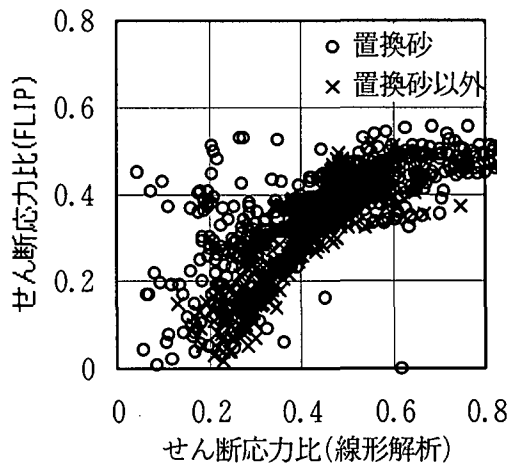


図-12 大阪港A岸壁：FLIPおよびFLUSH-Lのせん断応力比(τ_{max}/σ_{m0}')の比較 (両者共に初期自重解析結果)

このせん断剛性低減率 (G_2/G_1) は、FLUSHの等価線形解析結果である剛性低減率と関係づけることができると思われる。ただ、応力-歪関係はFLIPでは基本的に双曲線モデルであるので、FLUSHで標準的な $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線¹⁾を用いたのでは、地震力による剛性低下の評価に差が生じる。検討には、 $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線として双曲線モデルに対応する曲線を使用する必要がある。

(3) せん断剛性の評価法

以上の関係を利用して、次式により剛性低下の要因を考慮したせん断剛性 G を評価することができる。

$$G = \frac{G_1}{G_0} \times \frac{G_2}{G_1} \times \frac{G}{G_2} \times G_0$$

自重による
剛性低減率
(主働破壊等)

 地震力による
剛性低減率

 液状化による
剛性低減率

 初期せん断
剛性

液状化しない土要素に対しては、液状化による剛性低減率 (G/G_2) を1.0とおけばよい。残りのファクターにより、液状化以外の要因による剛性の低減率を評価することができる。

5. おわりに

大阪港A岸壁(現況断面)の置換砂と埋土の検討で得られた $G/G_0 \sim F_L$ 曲線を用いたFLUSH-Lの方法により、この断面や他のいくつかの断面に対して、液状化を考慮した被害予測を行い、その結果を有効応力法プログラムFLIPの予測値と比較検討した。その結果を見ると、FLUSH-Lの方法は概ね有効であると思われる。ただし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 値のみで評価しているため、場合によっては地盤剛性の適切な評価が出来ない。その対策として、要因別の剛性低減率の評価法を提案した。今後は、この評価法を具体例に則して実証する必要がある。またシルト層に対して、別途 $G/G_0 \sim F_L$ 曲線を導入したが、地盤土の種類に応じてどのような曲線を用意すべきかは、今後の検討課題である。

6. 謝辞

本検討は、著者の一人である柴田徹福山大学教授を委員長とする「大阪港港湾施設の液状化問題調査検討委員会」(平成6年度と7年度に開催)における調査の一環として実施したものである。末尾ながら、各委員ならびに関係者に対して謝意を表する。

【参考文献】

- 1) 柴田徹, 井合進, 木山正明, 上蘭晃, 鈴木孝幸, 小堤治, 兪杰: "F_L 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) 井合進: "FLIPによる解析", 地盤と土構造物の地震時の挙動に関するシンポジウム発表論文集, (社)土質工学会編集, pp.94-103, 平成元年1月
- 3) Touhata, I. and Ishihara, K.: "Modelling soil behaviour under principal stress axes rotation", Proc. 5th International Conference on Numerical Method in Geomechanics, Nagoya, pp. 523-530, 1985
- 4) 運輸省港湾局監修, (財)沿岸開発技術研究センター発行: "埋立地の液状化対策ハンドブック", 平成5年3月

Examples of application of the method of predicting damage to structures with the method of estimating the shear modulus of soil based on F_L values

Toru Shibata, Susumu Iai, Koichi Takeda, Takeshi Konishi,
Osamu Ozutsumi, Takahiro Homma, Hiroshi Kaneko

The authors have already proposed the method which estimates the shear modulus of liquefied soil based on F_L values ($G/G_0 \sim F_L$ curves) and the methods of predicting damage to structures using this estimation method (FLUSH-L). By means of the methods, the predictions of damage to some sections of facilities in port of Osaka are given in consideration of liquefaction. Those results are compared with predicted values by the effective stress analysis. Since the two almost agree with each other, it seems that the proposed methods are effective in predicting damage to structures when liquefaction occurs in soil.