

シアテック銅（あかがね）通信 Vol. 13

動的有効応力解析<FLIP>のご紹介

東北地方太平洋沖地震の発生により、港湾・海岸構造物の耐震化の要求が日々高まってきております。しかし、多数ある港湾・海岸施設に対して効果的に耐震化を進めていくためには、まず耐震点検を行い優先度を定めた上で、耐震設計を実施することが必要です。

地震後も港湾施設は使用できるのか？海岸堤防は破堤しないのか？実施しようとする対策工は効果を発揮するか？

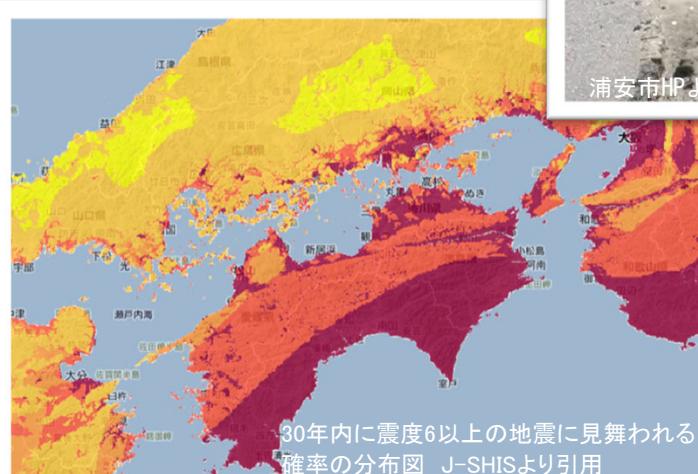
これらを確認する手段として、動的有効応力解析(FLIP)を今回ご紹介します。



国土交通省東北地方整備局HPより引用



浦安市HPより引用



豊かで潤いのある社会づくりに貢献する

総合建設コンサルタント

株式会社 シアテック

ISO9001認証：MSA-QS-706

<http://www.ciatec.co.jp>

担当：本社 土木部 調査設計一課

TEL：(0897)37-2797

FAX：(0897)32-5979

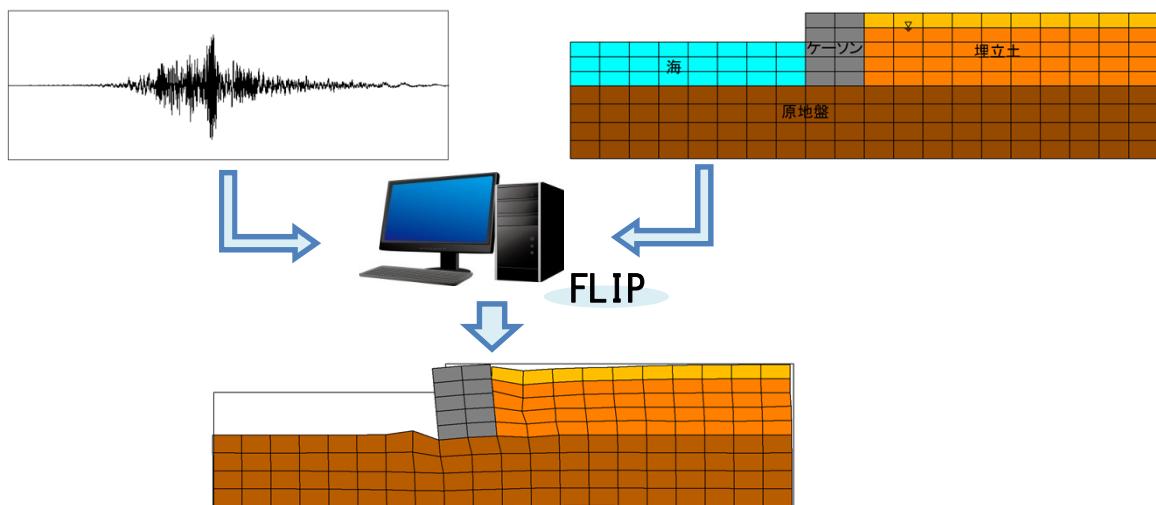
E-mail: ctl@ciatec.co.jp

1. FLIPとは？

FLIPとは、Finite element analysis program for Liquefaction Processの略で、有限要素法に基づく2次元動的有効応力解析プログラムのことです。

地震波形と地盤・構造物のデータを入力として、地震中の時々刻々と変化する構造物の挙動や液状化の程度・発生範囲を計算し、予測することができます。

旧運輸省港湾技術研究所で開発されたFLIPは、過去に発生した港湾構造物の被害の再現性確認が多数行われおり、現在では、港湾・海岸構造物の設計において最も精度の高い計算方法として使用されています。



FLIPによる解析が必要とされる背景

近年のレベル2地震に対する設計では、施設が地震後もすぐに供用できる程度に変形が留まるのか、あるいは、軽微な修復で機能が回復するのかを確認することが求められています。この確認は、地震によって施設にどれくらいの変形が生じるかを計算により予測し、評価することで行われます。

従来の設計手法では、「もつ(倒壊しない)」か「もたない」かを確認することが主で、変形量を知ることはできませんでした。今回ご紹介するFLIPは、地盤の液状化計算が可能な有限要素法に基づく手法であるため、液状化の影響を受ける構造物と地盤の変形を詳細に予測することができ、地震後の施設の性能を確認することができます。

港湾の施設の技術上の基準の基準(平成19年)場合

主たる作用	施設の性能確認方法
船舶の衝突、 津波、 レベル2地震動、 偶発波浪、火災	数値解析法(変形量や損傷の程度を具体的に評価できる方法) 模型実験、又は現地試験に基づく方法



2. FLIPが“可能”にすること

液状化予測の精度向上

FLIPは、地点ごとに異なる地震波形と地盤条件を入力とし、施設を含む断面で液状化の発生・発展過程を計算できます。そのため、これまで、「点」の情報であった液状化予測を「(断)面」で行えるようになり、より詳細に液状化の影響を把握することができます。

合理的な液状化対策

FLIPは、対策工を行った場合の計算も可能です。いくつかの液状化対策についてシミュレーションを行い、液状化の程度や範囲に応じた最も合理的な対策工の選定を行うことができます。

性能設計への対応

レベル2地震動に対する設計では、地震による施設の変形量を計算し、その状態を評価することで、施設の性能が判断されます。

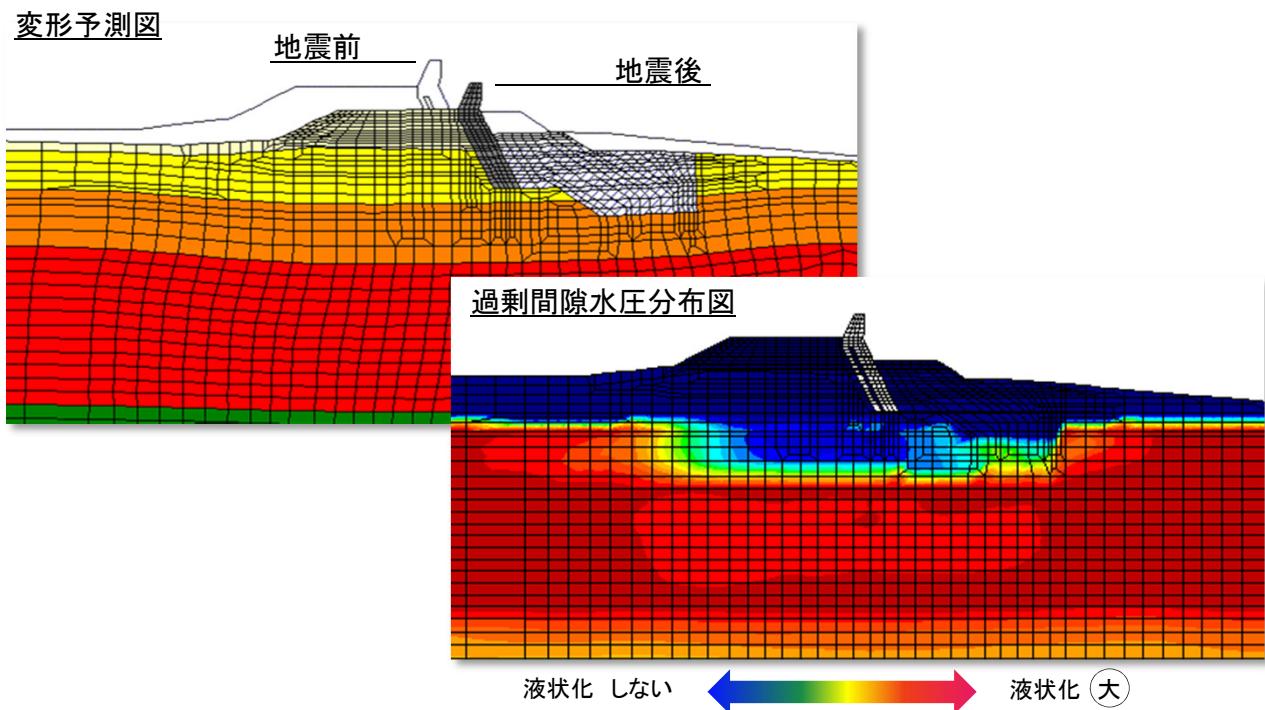
FLIPは、地盤-構造物の相互作用を考慮した施設変形量を計算できますので、レベル2地震動に対する性能設計を可能にします。

3. 海岸堤防への適用事例

海岸堤防の耐震点検で実施した解析事例をご紹介します。解析結果を見ると、地震により堤防が移動する様子や堤防下の地盤が液状化(赤色)していることが分かります。

この他にも、地盤中のひずみ分布や応力分布などを図化し、地震時の状態を評価します。

変形予測図



4. 解析に必要な地盤調査

FLIPの解析において必要なパラメータは、表に示すように多数あります。

FLIPの解析に必要なパラメータ

	記号	パラメータ	必要な調査・試験
物理試験結果	ρ_t	湿潤密度	密度試験
	n	間隙率	密度試験
動的変形特性	σ'_{ma}	Gma、Kmaに対応する平均有効応力(基準拘束圧)	PS検層
	G_{ma}	初期せん断剛性	//
	K_{ma}	体積弾性係数	//
	m_G	初期せん断剛性G0の有効応力依存性	//
	m_K	体積せん断弾性係数K0の有効応力依存性	//
	ϕ'_{f}	せん断抵抗角	圧密非排水三軸圧縮試験
	C	粘着力	//
	h_{max}	履歴減衰の上限値	動的変形特性試験
液状化特性	ϕ'_{p}	変相角	圧密非排水三軸圧縮試験
	w_1	液状化特性全体を規定するパラメータ	非排水繰返し三軸試験
	p_1	液状化特性の前半を規定するパラメータ	//
	p_2	液状化特性の後半を規定するパラメータ	//
	c_1	液状化特性の下限値を規定するパラメータ	//
	S_1	液状化の終局状態を規定するパラメータ	//

この中で特徴的なパラメータは、**液状化特性**に関するもので、液状化の発生・進展を左右する重要な役割をもちます。

液状化特性に関するパラメータは、「繰返し非排水三軸試験」によって得られる液状化強度を再現するように設定されます。そのため、解析以前の**地盤調査及び室内土質試験**が非常に重要となります。

室内土質試験に用いる試料は、解析モデルを見据えた地盤調査を計画してサンプリングします。地層構成が不明な場合は、事前ボーリングを実施し、地層構成を明らかにした上で、解析モデルを想定しながらサンプリング位置を決めることが必要となります。

下表に示すように、パラメータを得るための地盤調査や室内土質試験は多数ありますが、要求される精度に応じて都度選択して実施します。N値と細粒分含有率からパラメータを設定する方法もありますが、場所ごとに異なる地盤固有の特性を十分にモデルに反映できないため、解析精度が劣るとされています。

FLIPの解析に必要な地盤調査・室内試験

分類	項目	FEM動的解析(FLIP)		
		これだけあれば完璧	結果の精度が期待できる	解析可能な最低限
土質調査・試験	原位置試験	標準貫入試験 ○	○	○
	物理	PS検層 ○	○	
室内試験	密度試験	○	○	
	粒度試験	○	○	○
土質試験	液性限界・塑性限界	○	○	
	せん断	圧密非排水三軸圧縮試験 ○	○	
動的試験	繰返し非排水三軸試験	○	○	
	動的変形特性試験	○		

5. FLIPに関連するご提案

対策工のご提案

今回ご紹介したFLIPを使用し、液状化や被害の程度、構造物の特徴に応じた効果的な対策工の計画・設計をご提案します。

地盤調査計画・実施のご提案

FLIPの解析には、様々な地盤調査や土質試験が必要であり、かつ高度な調査技術を必要とするものが含まれています。当社には、解析に必要な地盤調査の経験がございます。解析だけでなく、地盤調査の計画・実施についてもご相談ください。

レベル2 地震動の設定

FLIPの解析には、外力として基盤層に時刻歴加速度波形を入力します。港湾施設におけるレベル2地震動の波形作成には、対象地点のサイト増幅特性を考慮する必要があります。この手法の一つとして、常時微動観測結果を用いる方法があります。常時微動観測については次号でお伝えします。

精度向上への取り組み

液状化予測の分野は、学術的にも日進月歩です。解析精度向上のために、常に新しい情報に基づいて解析や評価が行えるように努めています。

港湾・海岸施設の減災対策をより一層効果的なものにするために、
是非 FLIP をご活用ください。

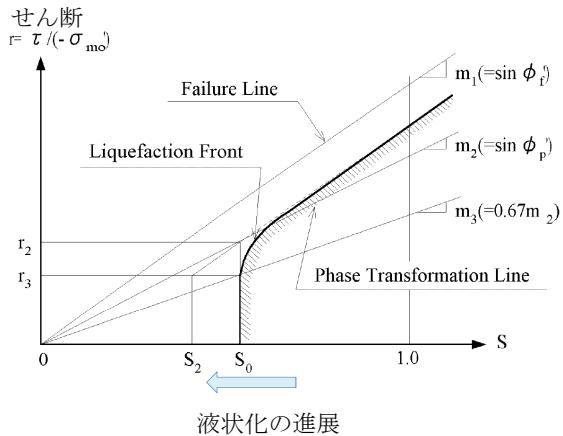
少し詳しく～FLIPの特徴的な計算モデル～

過剰間隙水圧モデル

過剰間隙水圧モデルは、地震の作用によって累積するせん断仕事(=せん断力×せん断ひずみ)から過剰間隙水圧を求める際に使用されます。

これは東畠らの実験により明らかにされた「土に作用しているせん断応力の状態に応じて、その時の過剰間隙水圧は単位体積の土になされたせん断仕事の累積値と密接な関係がある」ということを基に、井合らがモデル化したものです。

右図は、モデルの概念図です。累積せん断仕事Wsに関して横軸のSが動くことにより、過剰間隙水圧による土の変化が表現されます。

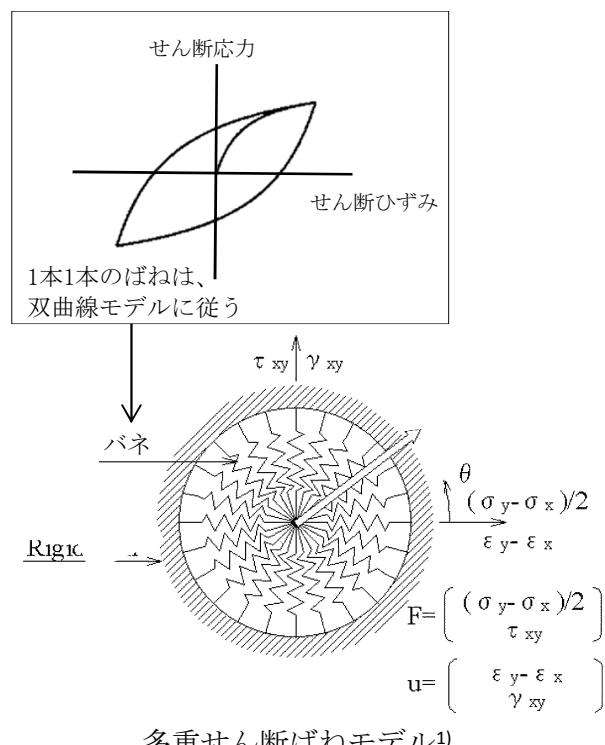


過剰間隙水圧モデルの概念図(一部加筆)¹⁾

多重せん断ばねモデル

地盤の応力－ひずみ関係は様々なモデルが提案されていますが、代表的なものに双曲線モデルがあります。1次元の動的解析を行う場合には、これで問題ないのですが、多次元になると土の異方性を考慮することができません。

FLIPでは、東畠らによって提案された「多重せん断ばねモデル」が使用されています。これは、双曲線モデルに従うバネを円周上に多数配置することにより、土の異方性を考慮できるようにされています。



多重せん断ばねモデル¹⁾

注意点

- ・非排水条件での解析であるため、地震後の過剰間隙水圧の消散による沈下は直接計算できず、別途計算が必要。

参考文献

- 1) FLIP 研究会14年間の検討成果のまとめWG:FLIP 研究会14年間の検討成果のまとめ