

FLIP を用いた函渠耐震解析に関する一考察

株式会社ニュージェック ○ 石村 勝 伸
水口 尚 司
井上 雅 晴
中園 康 平
松山 彰 宏

論文要旨

地盤内の函渠は地震時に地盤と一体となって挙動すると考えられていることから、その函渠の規模や周辺地盤の堆積状況等に応じて耐震設計法を選定・採用している。耐震設計法としては、応答変位法や応答震度法が考えられるが、地層構成が変化している場合に設計モデルの設定によって解析結果が左右されることがある。そこで近年では、地層構成の変化を考慮できる動的二次元 FEM 解析が採用されるようになってきている。しかし、動的解析に採用される解析プログラムは設計者によってさまざまであり、確立されていないのが現状である。本論文では既設函渠について有効応力解析プログラム (FLIP) を用いた熊本地震の再現計算を行い、FLIP の函渠の耐震解析への適用性を考察した。なお、従来の手法である応答震度法との応答値の比較も行った。

キーワード：FLIP, 応答震度法, 熊本地震, 函渠, 再現解析

まえがき

一般的に地下構造物の横断方向の耐震設計法は、応答変位法や応答震度法等が地盤条件や構造条件等に応じて適宜採用されている。しかし、地層構成が変化する場合や掘削状況を考慮する必要がある場合など、技術者の判断によるばらつきが大きく、解析結果に差異が生じることがある。このため、近年では地盤の傾斜や掘削状況などを考慮できる動的二次元 FEM 解析法も採用されるようになってきた。

本論文は、動的二次元 FEM 解析法として FLIP¹⁾を採用した場合の適用性について、当該地盤条件における熊本地震の再現解析を実施し、その解析結果を踏まえて評価・考察するものである。

なお、FLIP (Finite element analysis of LIquefaction Program) は平成9年度に運輸省港湾技術研究所より公開された有効応力解析や液化化による影響解析も可能な動的二次元 FEM 解析法である。

1. 検討条件

(1) 検討対象函渠

解析対象とした函渠を図-1に示す。解析対象とした函渠は、1層1径間(幅9.6m×高さ6.5m)の現場打ち鉄筋コンクリート造である。躯体構築時の掘削はオープン掘削により行っており、躯体側壁部ならびに頂版部の周辺は埋戻し土となっている。なお、舗装を含めた土被りは3.9mである。

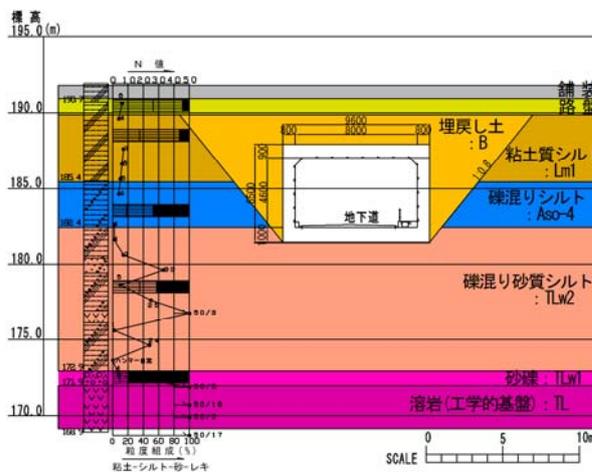


図-1 検討断面図

(2) 検討手法

検討ケースを表-1に示す。ケース1では、動的二次元 FEM 解析法(解析コード: FLIP)により耐震解析を行った。また、ケース2・3では静的二次元 FEM 解析法(応答震度法)による耐震解析を参考比較として実施した。応答震度法に使用する応答加速度は一次元地盤応答解析(解析プログラム: SHAKE)により算出した。

なお、FLIPの地層のモデル化についてはオープン掘削による埋戻し形状を考慮した。応答震度法の地層のモデル化については、一次元地盤応答解析は成層地盤を対象とした解析であることから、地震時における地盤の変状

を考慮し、自然地盤のみの場合(ケース2)と埋戻し+自然地盤の場合(ケース3)とを検討した。

表-1 検討ケース

ケース	解析手法	地盤モデル
1	動的二次元 FEM 解析 (FLIP)	自然地盤+埋戻し土 (埋戻し形状を考慮)
2	静的二次元 FEM 解析 (応答震度法)	自然地盤 (埋戻しを未考慮)
3	※参考解析	埋戻し土+自然地盤 (埋戻しを考慮)

(3) 地盤条件

地盤条件を表-2に示す。地層地盤は、工学的基盤は高遊原溶岩(TL)、その上層は高遊原溶岩の風化帯、阿蘇火砕流堆積物が堆積している。表層は火山灰土と植物の腐植土とからなる赤ぼく(ローム)で覆われている。函渠周辺の埋戻し土は全体的に軟らかく平均N値は2程度となっている。地下水位は工学的基盤面以下となっている。なお、解析に用いた物性値は、現地試験結果(PS 検層)や土質試験結果(粒度、繰り返し三軸試験等)に基づき設定している。

表-2 地盤条件

土質	記号	単位体積重量 (kN/m ³)	せん断波速度 (m/s)	内部摩擦角 (°)	粘着力 (kN/m ²)
埋戻し土	B	13.0	100	30.0	0.0
路盤	-	20.0	300	43.0	0.0
粘土質シルト	Lml	14.0	150	30.0	0.0
礫混りシルト	Aso-4	14.0	160	30.0	0.0
礫混り砂質シルト	TLw2	17.0	270	30.0	0.0
砂礫	TLw1	18.5	270	43.0	0.0
溶岩 (工学的基盤)	TL	21.0	540	44.0	0.0

(4) 函渠の損傷状況

平成 28 年度熊本地震後に実施した現地調査の結果、函渠の地震による損傷は認められなかった。そのため、熊本地震時の構造部材の発生断面力は許容耐力以下だったことが想定される。しかし、構造部材の発生断面力は不明確な状態にあることから、「許容耐力上限値=再現解析結果」となることが最も安全かつ最適であると再現解析において想定した。

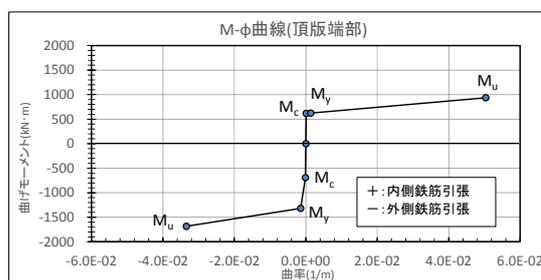
(5) 函渠の構造条件

函渠の構造部材モデルを図-2に、構造部材の非線形特性(M-φ曲線)を図-3に示す。函渠の構造部材は、要

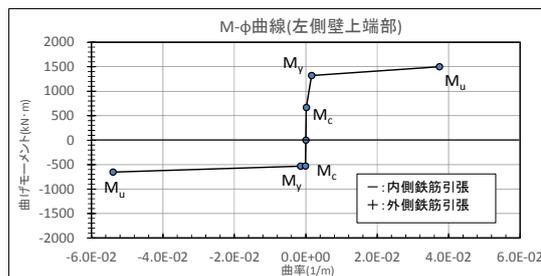
素ごとに非線形特性(コンクリートのひび割れ、鉄筋の降伏)を考慮した非対称トリニアモデルにより評価した。



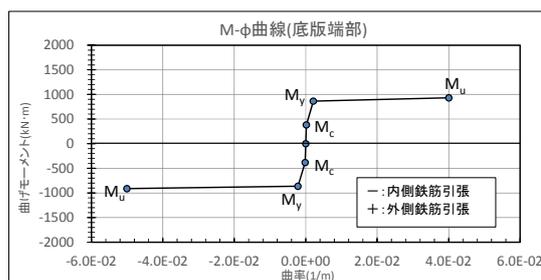
図-2 構造部材モデル図(梁要素)



(a) 頂版端部



(b) 側壁上端部



(c) 底版端部

図-3 非線形特性図(M-φ曲線)

2. 熊本地震について

検討地点の再現波形を図-4に、応答スペクトルを図-5に示す。想定地震は平成28年熊本地震の本震を対象とし、野津²⁾により提唱された再現波により検討を行った。最大加速度は541 gal、地盤の固有周期は0.3sec(自然地盤)~0.8sec(埋戻し土+自然地盤)であることから応答スペクトルによる応答値は1,000~1,800gal程度となる。

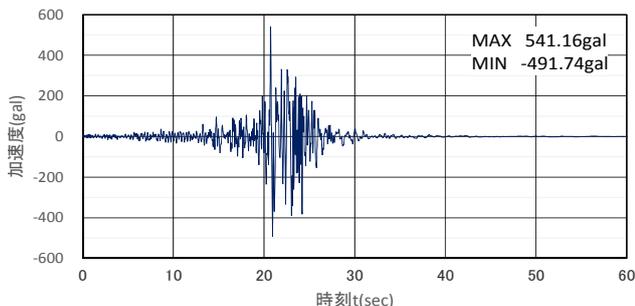


図-4 再現波形(工学的基盤面)

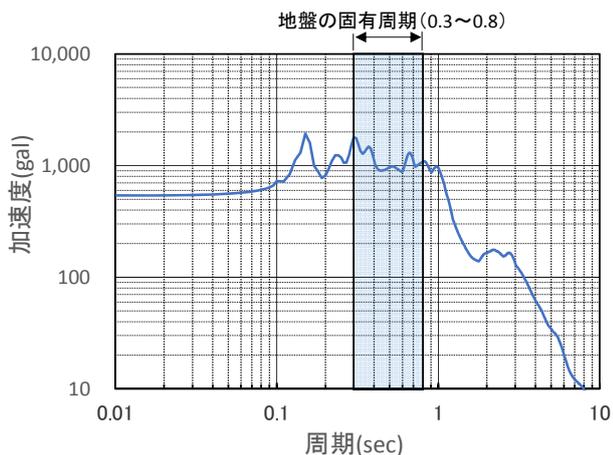


図-5 想定地震動の応答スペクトル図(工学的基盤面)

3. 再現解析

(1) 照査条件

熊本地震における函渠構造部材の耐力限界値(許容耐力上限値=再現解析結果)を再現する必要があることから、断面照査に用いる断面耐力の安全率や材料係数を1.0(余裕が無い状態)として実施した。

(2) 再現解析結果

FLIP 解析結果(最大せん断ひずみ)を図-6に示す。再現解析の結果、ケース1(FLIP)の頂版上部の埋戻し土は自然地盤と比較して最大せん断ひずみが大きくなっており、頂版上部の埋戻し土の評価によっては構造物の発生断面力が変動する可能性が高いと考えられる。また、側壁部の埋戻し土については自然地盤とのひずみ差は見られないことから、影響は小さかったと考えられる。

応答震度解析結果を図-7に示す。ケース2は地盤の最大せん断ひずみが1.2%、ケース3は3.7%となっている。一次元の等価線形解析は、地盤の最大せん断ひずみが1%以下の場合に信頼性が高い³⁾と言われており、ケース2ならびにケース3については、今回の地盤においては解析の信頼性は高くないと考えられる。

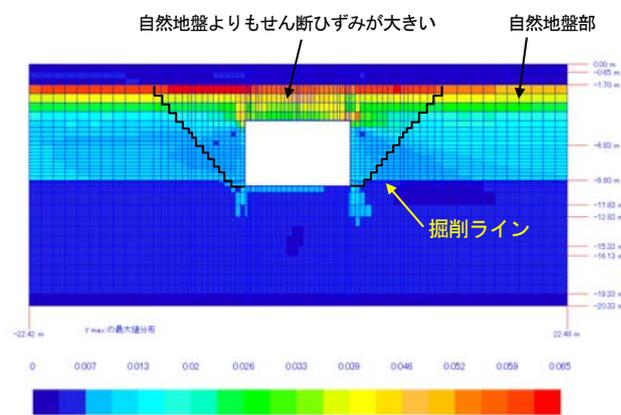
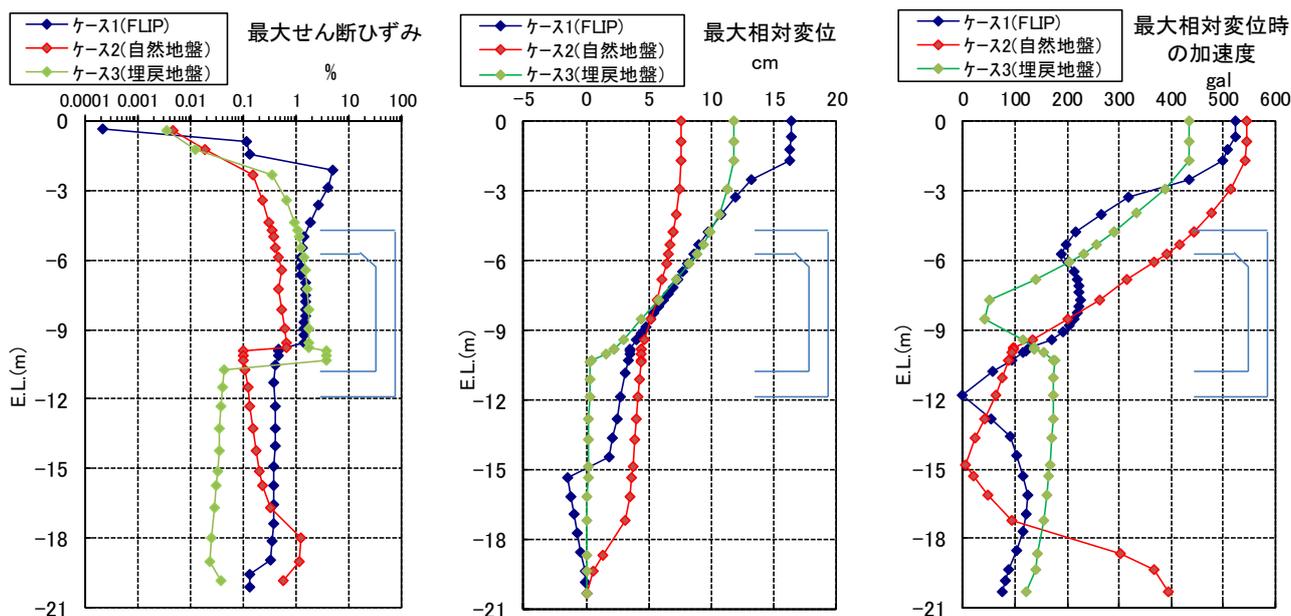


図-6 FLIP 解析結果(函渠拡大図): 最大せん断ひずみ



※FLIPについては、参考として自然地盤のみを対象とした一次元FLIP解析結果を示している。

図-7 応答震度法(一次元地盤応答解析)による再現解析結果

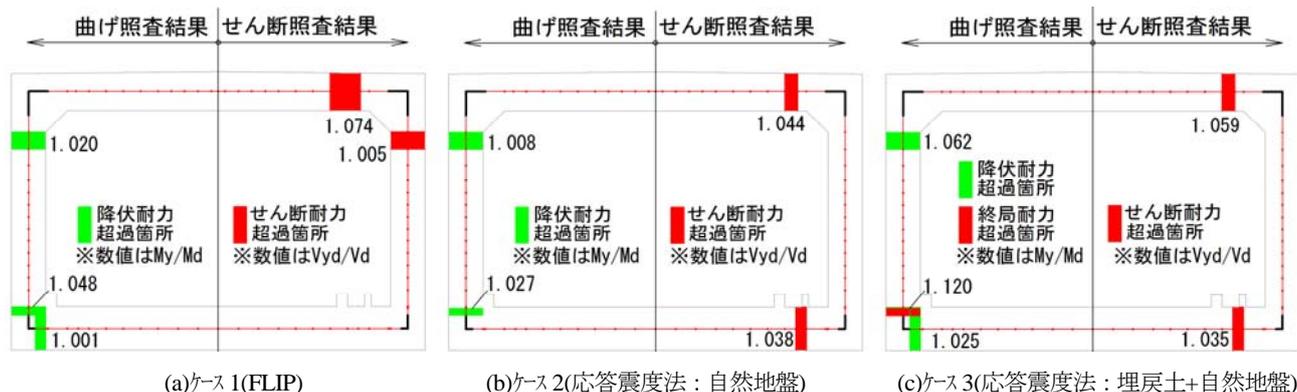


図-8 耐震照査結果図

表-3 耐震照査結果一覧表(安全率等を1.0とした場合)

ケース	応答値	頂版	側壁	底版
1 FLIP (自然地盤+埋戻し土)	曲げ (Md/My)	0.992	1.048	1.001
	せん断 (Vd/Vyd)	1.074	1.005	0.985
2 応答震度法 (自然地盤)	曲げ (Md/My)	0.863	1.027	0.900
	せん断 (Vd/Vyd)	1.044	0.901	1.038
3 応答震度法 (埋戻し土+自然地盤)	曲げ (Md/My)	0.994	1.120	1.025
	せん断 (Vd/Vyd)	1.059	0.885	1.035

M_d : 発生曲げモーメント(kN・m) , M_y : 降伏曲げモーメント(kN・m)
 V_d : 発生せん断力(kN) , V_{yd} : せん断耐力(kN)
 着色: 黄色は降伏耐力を超過, 赤色は終局耐力を超過

(3) 断面照査結果

耐震照査結果図を図-8に示す。耐震照査の結果、ケース1 (FLIP) とケース2 (応答震度法・自然地盤)・ケース3 (応答震度法・埋戻し土+自然地盤) とは、曲げモーメントおよびせん断力に違いが生じた。その違いは埋戻し土の形状によるものと考えられる。

耐震照査結果一覧表を表-3に示す。ケース1においては、許容耐力と同程度となり、実際の地震時の構造部材の応力状態を再現できていると考えられる。今回のような地盤において FLIP による計算は耐震照査方法として適していると判断できる。応答震度法では、ケース2はケース1に近似する結果となったが、ケース3については、ケース1およびケース2と比較して曲げモーメントが終局耐力を超過する結果となった。よって、ケース3は構造部材の応力状態を再現しているとは言い難い。上記より、応答震度法については、地層のモデル化には留意が必要である。

4. 結論

動的二次元FEM解析法としてFLIPを用いた場合の適用性について考察した。今回の解析結果から以下のことが確認できた。

- ・再現解析の結果、今回の地盤においては、FLIPは現状を再現している結果となった。応答震度法につい

ては、地盤のひずみが小さい場合は信頼性が高いと考えられる。

- ・FLIPは地盤定数以外の地盤条件(地層の傾斜や変化、埋戻しのモデル化など)に個人差が出にくいことから、解析結果のバラツキは小さいと考えられる。
- ・応答震度法は対象地盤のモデル化によっては解析結果が異なるため、地盤のモデル化には留意する必要がある。

今回の解析は、非液状化地盤であるため、液状化が発生する地盤の適用性について確認できていない。今後は液状化地盤や複雑な地層モデルなどさまざまな地盤においても適用性を確認して行く必要がある。

あとがき

本論文の作成に当たり、資料提供ならびに助言を頂きました国立研究開発法人 港湾空港技術研究所の野津様、国土交通省 九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所の関係者様に心より感謝申し上げます。

参考文献 (または引用文献)

- 1) Iai,S., Matsunaga,Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, *Report of the Port and Harbour Research Institute*, Vol.29, No.4, pp.27-56,1990.
- 2) 野津厚: 特性化震源モデルによる地震動推定, (http://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bsi/taisin/sourcmodel/somodel_2016kumamoto.html), 国立研究開発法人 港湾空港技術研究所
- 3) 一般財団法人 港湾空港総合技術センター, 空港土木耐震設計要領及び設計例,P.付 10,H20.7