

ニューマーク法を用いた港湾及び空港施設の地震時変形量の試算事例

池内 章雄*・伊藤 義将**・藤井 照久***・佐藤 秀政***・山本 修司****

* (一財) 沿岸技術研究センター 調査役

** (一財) 沿岸技術研究センター 研究員

*** 復建調査設計株式会社 防災部 部長

**** (一財) 沿岸技術研究センター 業務執行理事

レベル2地震時における盛土構造物の変形は、基礎地盤及び盛土の剛性低下に伴う変形と、盛土斜面のすべり破壊による変形が複合して発生するものと考えられる。港湾及び空港施設におけるレベル2地震動に対する性能照査は、FLIPによる変形照査によって行われるが、FLIPでは盛土斜面のすべり破壊のような変形モードを考慮することができない。本検討は、陸上の盛土構造物のすべり破壊に対する性能照査法として実績のあるニューマーク法を用いて、港湾及び空港における盛土構造物の地震時変形量に対する検討を行ったものである。

キーワード：盛土構造物、すべり破壊、ニューマーク法、滑動変位量

1. はじめに

港湾及び空港施設における斜面のすべり破壊に対する性能照査は、通常、永続状態に対しては修正フェレニウス法¹⁾²⁾による円弧すべりによって行われる。また、偶発状態（レベル2地震時）に対しては、慣性力の作用や地盤の液状化に伴う剛性低下によって大変形が発生する可能性があるため、これらが考慮可能なFLIP³⁾等の動的解析によって変形量の照査が行われている。

しかしながら、FLIP等の有限要素法は微小変形条件で構成則が定式化されているため、斜面のすべり破壊のような大変形・大ひずみが生じる場合の性能照査には適しておらず、地震時の斜面のすべり破壊に対しては、別の手法による性能照査が必要と考えられる。

そこで、理論の簡明さに対し、比較的妥当な結果を与えること、結果の解釈が容易であること等から、鉄道、道路土工、高速道路等の設計基準や指針で採用されているニューマーク法^{4),5)}を用いて、地震時の斜面のすべり破壊に対する性能照査を実施した。

本稿では、水位が有る盛土構造物として港湾の傾斜式護岸と、水位が無い盛土構造物として空港の滑走路盛土について、ニューマーク法を用いて地震時変形量を試算するとともに、FLIPによる解析結果と比較し、ニューマーク法の適用性を考察した。

2. ニューマーク法の概要

2.1 概要

ニューマーク法は、斜面の地震時破壊形態（すべり面の形状）を仮定して、安全率がちょうど1となる降伏震

度 k_y と、この時のすべり面を求め、そのすべり面上の土塊の入力地震波に対する滑動変位量を、土塊の回転に対する運動方程式を数値積分することにより算定する方法である。

ニューマーク法では、すべり土塊が剛体であり、すべり面における応力-ひずみ関係が剛塑性体であることを基本仮定としているが、現実の土は繰返し応力による変形の累積性、軟化性のために強い非線形性を示すことから、ニューマーク法は厳密な方法とは言えない。しかしながら、入力定数は円弧すべり解析と同等であり、簡便に結果が導かれるため、大規模地震時において塑性変形が生じる場合の高盛土の性能照査における指標として有効であると考えられる。

2.2 ニューマーク法の計算手順

ニューマーク法による滑動変位量は、図-1のとおりすべり面の形状を円弧と考え、モーメントに対する釣り合い式から以下の手順で回転変位量を求めた。

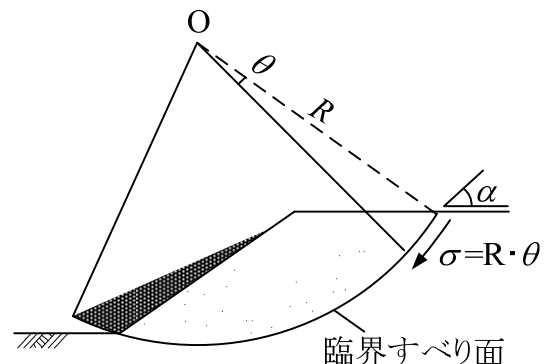


図-1 ニューマーク法の模式図

- ① 設計震度 k_h を変化させた円弧すべり法による安定計算を行い、安全率がちょうど 1 となる降伏震度 k_y と、このときの臨界すべり面を求めた。
- ② すべり土塊に作用する応答加速度を FLIP により求めた。計算に用いる応答加速度は、法肩や法尻といった盛土各部と地表面の応答値を確認して、変位量を過小評価しないよう慎重に設定した。
- ③ 臨界すべり面の回転変位量は、応答加速度に対して角加速度、角速度、角度を逐次計算により求めた。最後に、臨界すべり面に対する円弧半径 R からすべり土塊の滑動変位量 σ ($=R \cdot \theta$) を算出した。

3. ニューマーク法による試算事例

3.1 港湾の傾斜式護岸における試算事例 1

(1) 検討対象施設

検討対象施設は、水深-17.0mの原地盤上に高さ18mの捨石マウンドを形成し、その上部に土留となる上部工を構築した傾斜式護岸である。原地盤条件は、表層から2m程度の沖積粘性土層(Ac1層)、5m程度の沖積砂層(As2層)、1m程度の砂礫層(Dg2層)と続き、工学的基盤(T層)は海底面から8m程度の所に出現する。標準断面図を図-2に、地盤条件を表-1に示す。検討に用いた工学的基盤における入力地震動を図-3に示す。

(2) FLIP の解析結果

FLIP の解析結果を図-4に示す。解析結果より、上部工は海側に大きく移動・傾斜し、護岸天端の位置で残留水平変形量は4.9m、残留沈下量は2.9mとなった。また、最大ひずみ分布図より、捨石マウンド内に上部工直下から捨石マウンド法先にかけて大きなひずみ分布が確認でき、マウンド内ですべり破壊が生じていることが分かる。なお、最大過剰間隙水圧比を確認した結果、As2層は液状化していた。

(3) ニューマーク法の解析結果

図-5に降伏震度に対する円弧すべり結果を示す。降伏震度は $k_y=0.104$ となり、すべり面は上部工からAc1層下端を通る円弧となった。このすべり面は、FLIP結果におけるひずみ分布とも良く一致している。また、滑動変位量を算出するための応答加速度は、ニューマーク法は全応力解析であるため、液状化を考慮しない条件のFLIP解析によって求めたものを用いた。応答加速度は、捨石マウンドの法肩と法尻位置での応答値がほぼ同等であったため、応答値の大きい捨石マウンドの法尻位置の応答加速度を用いることとした。この応答加速度を用いて、図-7のとおり滑動変位量を算出すると9.6mとなった。これを水平・鉛直方向の各成分に分解すると、水平変形量は3.5m、沈下量は8.9mとなり、FLIPに比べて大きな変形量が算出される結果となった。

本ケースのように水位があり、液状化が発生する場合、FLIPでは液状化による地盤の剛性低下が考慮できるため、地盤の剛性低下を考慮しないニューマーク法に比べて大きな変形量が算出されるものと思われたが、ニューマーク法の方が大きい変形量が算出された。これは、本ケースにおいては、地盤の剛性低下による変形よりもすべり破壊による変形の方が卓越していたことが原因と考えられる。

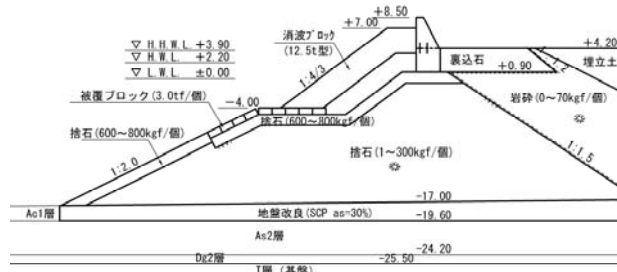


図-2 標準断面図

表-1 地盤条件

土 層	共通		ニューマーク用		FLIP用		
	γ_t (kN/m^3)	γ' (kN/m^3)	ϕ_t ($^\circ$)	c (kN/m^2)	ϕ_t ($^\circ$)	c (kN/m^2)	G_{98} (kN/m^2)
埋立土	15.6	5.6	—	-0.59 y + 13.85	—	-0.76 y + 17.72	-258 y + 6025
埋立側							
Ac1層	15.6	5.6	—	-0.46 y - 3.18	30.0	—	-1655 y + 17149
As2層	18.0	10.0	33.5	—	40.0	—	114285
Dg2層	20.0	10.0	41.9	—	45.1	—	116614
海 側							
Ac1層	15.6	5.6	—	-0.46 y - 3.18	—	-0.62 y - 4.24	-1655 y - 28138
As2層	18.0	10.0	33.5	—	40.0	—	114285
Dg2層	20.0	10.0	41.9	—	45.1	—	116614
T層(基盤)	20.0	10.0	—	500	Vs=390m/sec, Vp=1860m/sec		
基礎捨石	18.0	10.0	40.0	—	35.0	20.0	180000

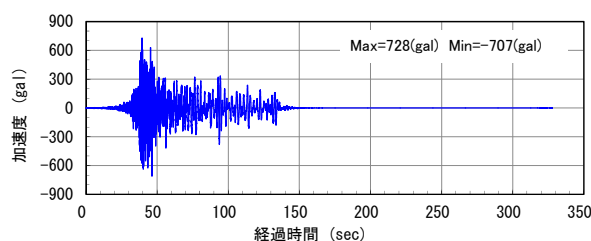
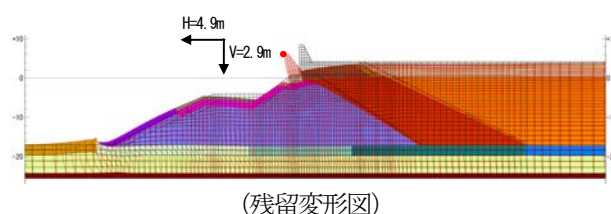
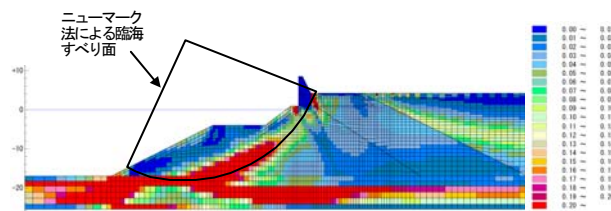


図-3 入力地震動



(残留変形図)



(最大ひずみ分布図)

図-4 FLIP 解析結果

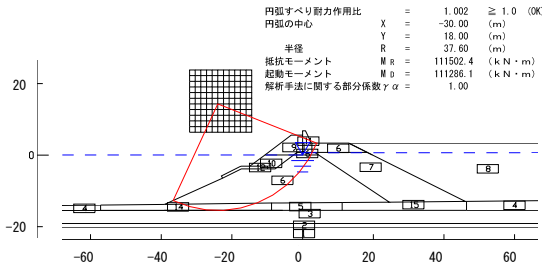


図-5 円弧（臨界）すべり結果

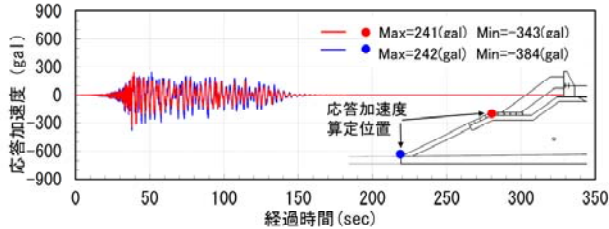


図-6 FLIP による応答加速度の算定結果

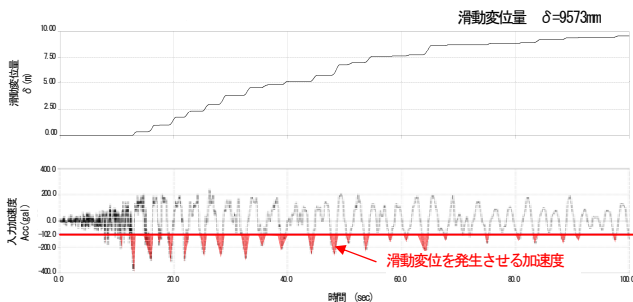


図-7 滑動変位量の算出結果

3.2 港湾の傾斜式護岸における試算事例2

(1) 検討対象施設

検討対象施設は、3.1に示した施設と同じである。本ケースは、3.1の断面では、変形量が大きく所要の耐震性能を満足しなかったため、マウンド前面に捨石マウンドの追加等の変形抑止対策を施した対策断面である。図-8に対策後の標準断面図を示す。

(2) FLIP の解析結果

FLIPの解析結果を図-9に示す。解析結果より、護岸天端の位置で残留水平変形量は1.9m、残留沈下量は1.2mと対策前の断面に比べて変形量は小さくなった。また、最大ひずみ分布図より、捨石マウンド内に見られた大きなひずみ分布は無くなっており、マウンド内のすべり破壊が抑えられていることが分かる。

(3) ニューマーク法の解析結果

図-10に降伏震度 $k_y=0.186$ に対する円弧すべり結果を、図-11に滑動変位量の算出結果を示す。滑動変位量は、0.4mと算定され、水平・鉛直変形量はそれぞれ0.3mとなった。これより、マウンド内のすべり破壊が生じないケースでは、FLIPに比べてニューマーク法による変形量の方が小さくなる結果となった。

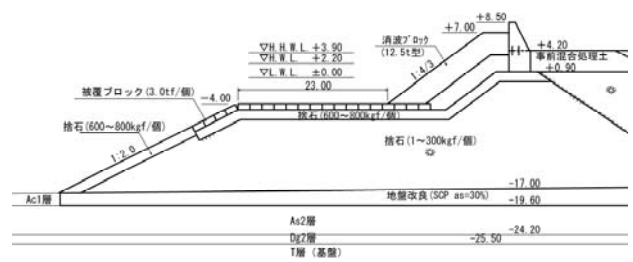
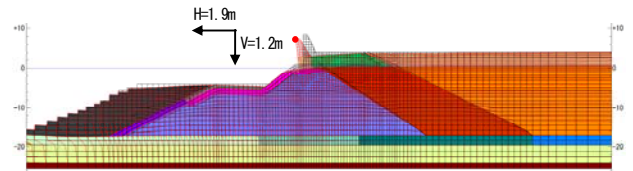
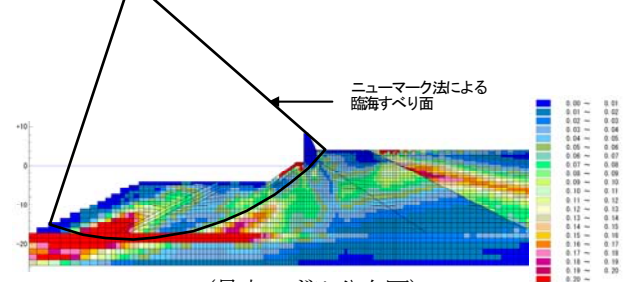


図-8 標準断面図（対策後）



(残留変形図)



(最大ひずみ分布図)

図-9 FLIP 解析結果

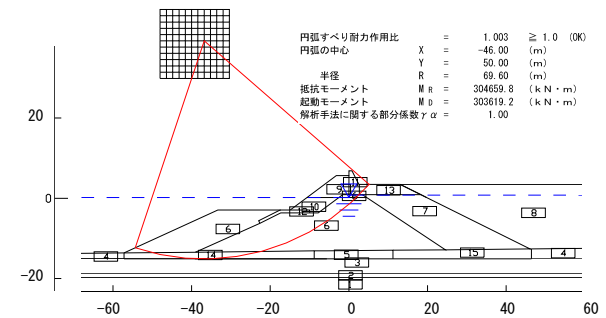


図-10 円弧（臨界）すべり結果

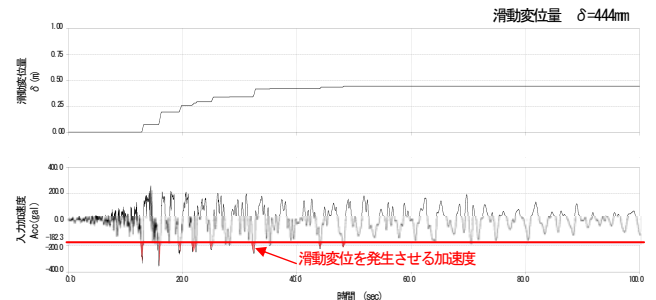


図-11 滑動変位量の算出結果

3.3 空港の滑走路盛土における試算事例

(1) 検討対象施設

検討対象施設は、盛土高約12mの空港滑走路の陸上盛土である。盛土は、転圧締固めが行われており、原地盤条件は、表層より火山灰質の粘性土(1m層)、火砕流堆

積物 (Aso 層) が 5m 程度堆積し, その下部に溶岩層の風化部 (TLw 層) が 5m 程度と続き, 工学的基盤 (TL 層) は地表面より 10m 程度の所に出現する. 断面図を図-12 に, 地盤条件を表-13 に示す. また, 検討に用いた工学的基盤における入力地震動を図-14 に示す.

(2) FLIP の解析結果

FLIP の解析結果を図-15 に示す. 盛土の法肩位置における残留水平変形量は 5cm, 残留沈下量は 4cm となった. また, 最大ひずみ分布図より, 盛土斜面部に 1% 程度のせん断ひずみ分布が確認でき, 盛土内ですべり面が形成されていることが分かる. なお, 本検討断面はすべての地層が水位よりも上であるため液状化の発生は無い条件である.

(3) ニューマーク法の解析結果

図-16 に降伏震度に対する円弧すべり結果を示す. 降伏震度は $k_f=0.338$ となった. すべり面は, 港湾の試算事例と同様に FLIP 結果のひずみ分布と良く一致している. 滑動変位量を算出するための応答加速度は, 盛土の法肩位置で FLIP 解析によって求め, この応答加速度を用いて, 図-17 のとおり滑動変位量を算出すると 12cm となった. これを水平・鉛直方向の各成分に分解すると, 水平変形量, 沈下量ともに 10cm 程度となり, FLIP に比べてやや大きな変形量が算出される結果となった.

本ケースのように水位がない場合でも, すべり破壊面が形成され始めているような場合には, FLIP に比べてニューマーク法の方が大きい変形量が算出される可能性がある.

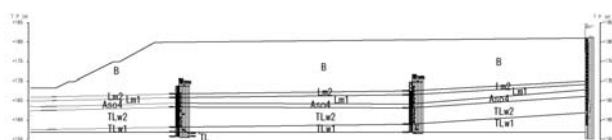


図-12 断面図

表-13 地盤条件

	B	Lm2	Lm1	Aso	TLw2	TLw1	TL
c (kN/m ²)	30	31	25	38	63	0	0
ϕ'_f (deg)	10	0	0	0	0	43	44
ρ (kN/m ³)	14.0	13.0	13.5	14.5	17.0	18.5	21.0
N 値	-	5	4	6	10	-	-

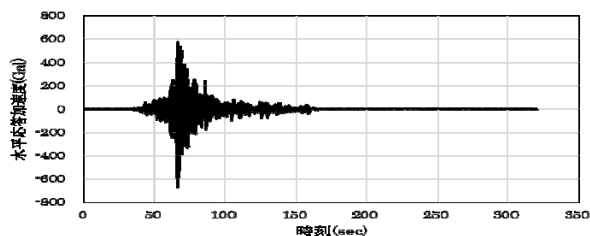


図-14 入力地震動

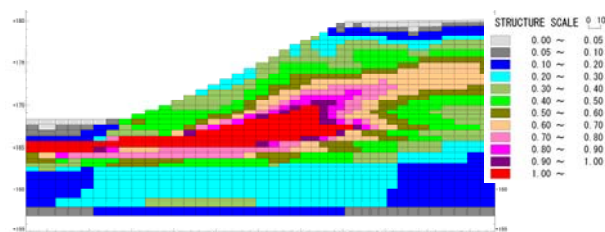


図-15 FLIP 解析結果 (最大ひずみ分布図)

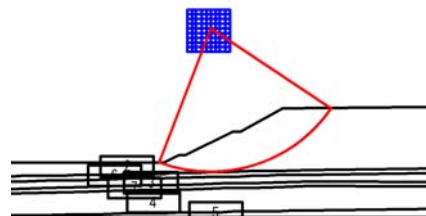


図-16 円弧 (臨界) すべり結果

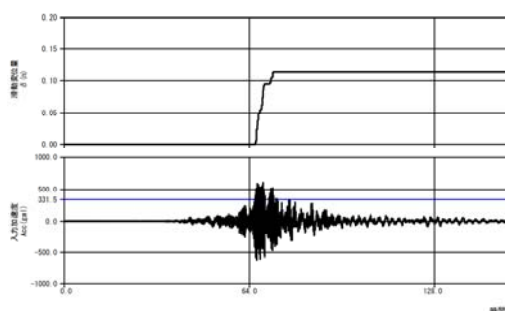


図-17 滑動変位量の算出結果

5. おわりに

港湾及び空港の盛土構造物を対象にニューマーク法による地震時変形量の検討を行った. 検討の結果, すべり破壊が生じるような条件では, FLIP とニューマーク法によるすべり面はよく一致し, 変形量はニューマーク法の方が大きくなった. 少ない検討事例からであるが, 港湾及び空港の盛土構造物でもすべり破壊が生じることが想定される場合には, FLIP に加え, ニューマーク法による変形照査を実施することが望ましいと考えられる.

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局監修, (社) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2007.
- 2) 国土交通省航空局, 国土交通省国土技術政策総合研究所監修, (財) 港湾空港建設技術サービスセンター: 空港土木施設耐震設計要領及び設計例, 平成 20 年 7 月 (平成 22 年 4 月一部改訂)
- 3) 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.
- 4) Newmark, N.M.: Effect of earthquake on dams and embankments, Geotechnique Vol. 15, No. 2, pp. 139-160, 1965.
- 5) 渡辺啓行・馬場恭平: フィルダムの動的解析に基づくすべり安定計算手法の一考察, 大ダム, No. 97, pp. 25-38, 1981.