

# NMM-DDA連成解析による鉱山捨石たい積場の 地震時安定性検討

小原義之<sup>1</sup>・福嶋 繁<sup>1</sup>・堀川滋雄<sup>2</sup>・越谷 賢<sup>2</sup>・佐々木猛<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構 (〒708-0698岡山県苫田群鏡野町上斎原1550)

<sup>2\*</sup>サンコーコンサルタント(株)(〒136-8522 東京都江東区亀戸1-8-9)

\*E-mail: sasakit@suncoh.co.jp

当該捨石たい積場は、風化花崗岩を基盤とする斜面勾配が約35度の谷地形に掘削土砂を投下している。捨石たい積場末端は河川に隣接し、想定される地震が発生した場合、斜面を形成する土砂が河川内に流入することが懸念される。本稿では、地震による捨石たい積場の安定性問題の解析をManifold法とDDAを組み合わせて、地震入力基盤は連続体のManifold法に入力し、上部の崩壊土砂は回転自由度を持つDDAでモデル化して、地震による斜面の安定性を検討した。これらの結果、たい積土砂は斜面上部から中央部で円弧状に最大で約3m移動することが判明した。これらの移動を抑える対策工として鉄筋挿入工が検討され、たい積土砂の移動量を40%から70%程度低減し、当該斜面が地震時でも安定であることが判明した。

**Key Words** :NMM-DDA coupling analysis, slope stability problem

## 1. はじめに

本検討では捨石たい積場の土砂が、地震動に伴い下方へ流出した場合、その範囲や環境影響などを予測する必要がある。捨石たい積場斜面の地震時安定性を評価する代表的な手法のうち、弾性有限要素法とニューマーク法を組合わせて用いる場合、たい積物を連続体として扱うため、離散の変形を考慮しない結果となる。本地点では連続体としての基盤岩の挙動と不連続体としての捨石たい積物の挙動を同時に応答解析し、捨石土砂の大変形(弾塑性挙動)まで考慮できる手法が必要とされた。

DDA(Discontinuous Deformation Analysis)<sup>1)</sup>は地震時の崩落形状、到達時間、崩落速度などの斜面崩落現象が再現でき、NMM(Numerical Manifold Method)<sup>2)</sup>は不連続性岩盤の応力、変形を解くことが可能な解析手法である。Miki et al.<sup>3)</sup>、三木ら<sup>4)</sup>はNMMの長所と限界、すなわち基盤ブロックの局所的な変形を考慮することはできるが、崩落岩塊の大きな回転を伴った運動を再現することが困難なこと、DDAの長所と解析限界、すなわち崩落岩塊の大きな回転を伴った運動の再現は考慮することができるが、基盤を単一のブロックと仮定して基盤の局所的な変形が考慮できない部分を踏まえて、解析手法として連続体と不連続体を同時に扱える解析手法としてNMM-DDAの連成定式化を行っている。本地点での地震応答解析では対象と

する基盤岩はNMMで、捨石たい積物はDDAでモデル化した連成解析をおこなった。両者はともにHamiltonの運動方程式を陰解法で解いていることから比較的容易に連成解析が可能となる。

## 2. NMM-DDA連成解析の理論概要

### (1) 弾性体の接触問題のポテンシャルエネルギー

NMM-DDA連成問題の、複数の弾性体ブロックからなる系の接触を含む動的大変形解析における系全体のポテンシャルエネルギー $\Pi_{\text{sys}}$ は式(1)で表される<sup>3)</sup>。

$$\Pi_{\text{sys}} = \Pi_{\text{sys}}^m + \Pi_{\text{sys}}^d + \sum_{B,i} \sum_{E,j} \Pi_{i,j}^{PL} \quad (1)$$

式(1)右辺第1項はNMM要素、第2項はDDAブロックの内力・外力および接触によるポテンシャルエネルギー、第3項はDDAブロック*i*のNMM要素*j*に対する接触力のポテンシャルエネルギーである。第1項は、NMM要素のポテンシャルエネルギーで、式(2)で表される。

$$\Pi_{\text{sys}}^m = \sum_i \Pi_i^{m,E} + \sum_i \sum_j \Pi_{i,j}^{m,PL} \quad (2)$$

式(2)の第1項はNMM要素のひずみエネルギー、第2項はNMM要素同士の接触によるエネルギーである。

式(1) 第2項はDDAブロックのポテンシャルエネルギー

で、式(3)で表される。

$$\Pi_{\text{sys}}^d = \sum_i \Pi_i^{d,B} + \sum_i \sum_j \Pi_{i,j}^{d,PL} \quad (3)$$

式(3)の第1項はDDAブロックのひずみエネルギー、第2項はDDAブロック同士の接触によるエネルギーである。NMM-DDA連成問題では式(1)のポテンシャルエネルギーを変位に関して最小化し、変位場を後述の有限被覆の概念で空間離散化して解く。

## (2) NMM 要素とDDAブロックの変数

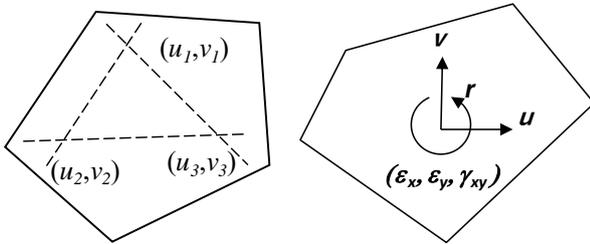
図-1 は、NMM 要素と DDA ブロックの変数を示す。NMM 要素には FEM と同様に任意形状を利用可能であるが、本論文では Shi<sup>2)</sup>の三角形の有限被覆を用いた。NMM の要素内変位は通常の三角形有限要素と同様の形状関数を用い、式(4)で示される。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = [T_i^m(x, y)][D_i^m] \quad (4)$$

$$[D_i^m] = (u_1 \quad v_1 \quad u_2 \quad v_2 \quad u_3 \quad v_3)^T \quad (5)$$

$$[T_i^m] = \begin{pmatrix} f_1 & 0 & f_2 & 0 & f_3 & 0 \\ 0 & f_1 & 0 & f_2 & 0 & f_3 \end{pmatrix} \quad (6)$$

ここに、 $[D_i^m]$  : NMM 要素頂点の変位、 $[T_i^m]$  : 三角形要素の頂点座標で定義される有限被覆関数である。



(1)NMM 要素 (2)DDA ブロック  
図-1 NMM 要素と DDA ブロックの変数

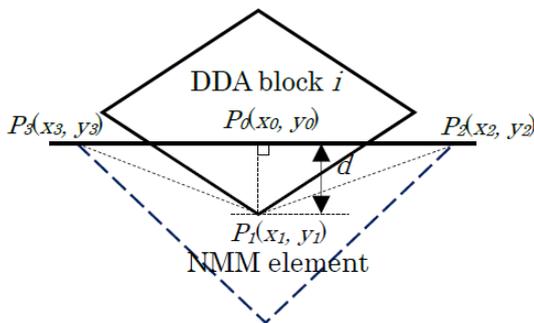


図-2 NMM 要素と DDA ブロックの接触機構

DDA ブロック内の剛体変位、剛体回転、ひずみは式(7)で示される。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = [T_i^d(x, y)][D_i^d] \quad (7)$$

$$[T_i^d] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -(y-y_0) & (x-x_0) & 0 & (y-y_0)/2 \\ 0 & 1 & (x-x_0) & 0 & (y-y_0) & (x-x_0)/2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$[D_i^d] = (u_0 \quad v_0 \quad r_0 \quad \epsilon_x \quad \epsilon_y \quad \gamma_{xy})^T \quad (9)$$

ここに、 $[D_i^d]$  : DDA ブロック重心の剛体変位、剛体回転、ひずみの3成分である。

## (3) NMM 要素とDDAブロックの接触機構

図-2 は、NMM 要素と DDA ブロックの接触機構を示す。接触によるポテンシャルエネルギーは、NMM 要素と DDA ブロックの貫入量  $d$ 、ペナルティ  $k_p$  を用いて式(10)で表される。

$$\Pi_p = \frac{k_p}{2} d^2 = \frac{k_p}{2} \left( \frac{S_0}{l} + [H^d]^T [D_i^d] + [G^m]^T [D_j^m] \right)^2 \quad (10)$$

ここに、 $S_0$  : 図-2 中の貫入している三角形の面積、 $l$  : 三角形の長辺の長さ、 $[H^d]$ 、 $[G^m]$  : DDA ブロックと NMM 要素の変位関数と座標で構成される接触に関するマトリックスである。

## (4) NMM 要素の粘性境界

図-3 は、NMM 要素に与える粘性境界条件を示す。本解析では、水平および上下の入力地震加速度を基盤の NMM 要素に同時に物体力として与えた。そのため、NMM 要素の側方および下方境界に式(11)に示すポテンシャルエネルギーを持つ、P 波と S 波に比例する粘性境界<sup>6)</sup>を与えた。

$$\Pi_{vb}^m = \frac{\rho l_v [D_j^m]^T [T_j^m(x, y)]^T [C][T_j^m(x, y)][D_j^m]}{\Delta t} \quad (11)$$

$$[C] = \begin{pmatrix} C_p n_x^2 + C_s n_y^2 & (C_p - C_s) n_x n_y \\ (C_p - C_s) n_x n_y & C_s n_x^2 + C_p n_y^2 \end{pmatrix}$$

ここに、 $[C]$  : 粘性境界減衰マトリックス、 $\rho$  : 単位体積重量、 $l_v$  : 減衰の有効境界長、 $C_p$ 、 $C_s$  : P 波と S 波速度、 $n_x$ 、 $n_y$  : 境界辺の方向余弦、 $\Delta t$  : 時間刻みである。

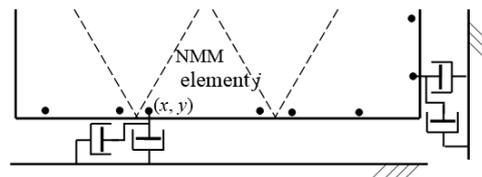


図-3 NMM 要素の粘性境界

(5) NMM-DDA 連成解析の運動方程式

NMM-DDA の運動方程式は式(12)で表される。

$$[M]\{\ddot{u}\}^{m,d} + [\tilde{C}]\{\dot{u}\}^{m,d} + [K]\{u\}^{m,d} = \{\Delta F\}^{m,d} \quad (12)$$

ここに、 $[M]$  : 質量マトリックス,  $[\tilde{C}]$  : NMM 要素, DDA ブロックの減衰マトリックス,  $[K]$  : 剛性マトリックス,  $\{\Delta F\}^{m,d}$  : 外力増分ベクトル,  $\{\ddot{u}\}^{m,d}$  : NMM 節点と DDA ブロック重心の加速度,  $\{\dot{u}\}^{m,d}$  : NMM 節点と DDA ブロック重心の速度,  $\{u\}^{m,d}$  : NMM 節点の変位と DDA ブロック重心の変位とひずみである。

これらを Newmark の  $\beta$ ,  $\gamma$  法で,  $\beta=0.5$ ,  $\gamma=1.0$  とすれば, 釣合方程式は以下のような増分形式で表される。

$$[\tilde{K}]\{\Delta u\} = \{\tilde{F}\} \quad (13)$$

$$[\tilde{K}] = \frac{2}{\Delta t^2}[M_m + M_d] + \frac{1}{\Delta t}[C_m + C_d] + \frac{\rho^c}{\rho_0}[K_{t,m} + K_{t,d} + K_{p,m} + K_{p,d} + K_{p,m,d}] \quad (14)$$

$$\{\tilde{F}\} = \alpha[M_m] + \frac{2}{\Delta t}[M_m + M_d]\{\dot{u}\} + (\{\Delta F\} - \sum \sigma dv) \quad (15)$$

ここに、 $\Delta u$  : 増分変位,  $[M_m]$  : NMM 要素の質量,  $[M_d]$  : DDA ブロックの質量,  $[C_m]$  : NMM 要素の減衰,  $[C_d]$  : DDA ブロックの減衰,  $[K_{t,m}]$  : NMM 要素の剛性,  $[K_{t,d}]$  : DDA ブロックの剛性,  $[K_{p,m}]$  : NMM 要素同士の接触,  $[K_{p,d}]$  : DDA ブロック同士の接触,  $[K_{p,m,d}]$  : NMM 要素と DDA ブロックの接触の各マトリックス,  $\alpha[M_m]$  : 地震慣性力である。

全体座標系の NMM 要素節点と DDA 重心の総変位とひずみは各増分の総和として, 式(16)で表される。

$$\{u\}^{t+\Delta t} = \sum \{\Delta u\}^i \quad (16)$$

3. 解析対象斜面の地質と解析モデル

図-4は捨石たい積場の地質を示す。当地周辺の地質は中生代後期に貫入した花崗岩である。斜面は主に  $\phi 10 \sim 20\text{cm}$ の垂角状の捨石からなり、基質部分は風化して細粒化した土砂からなる。それらは場所によるものの層厚 5~6.5m程度堆積している。解析用モデル区分は、捨石たい積場内で実施した2箇所のボーリング調査結果ならびに周辺部地表地質踏査結果を踏まえて作成した地質モデル区分を基本とした。捨石堆積物の地質区分はボーリングコア観察結果及び粒度試験結果から評価し、基盤岩の区分は本州四国連絡橋公団が花崗岩を対象に作成した

分類基準に従った。捨石たい積物の上部は細粒分含有率で細粒土優勢層と砂質土優勢層の2種の土層が互層状に出現したが、本来は土層に連続性を持たない投下堆積物であるため解析用モデルでは細分せずに1区分とし、両者の物性値を重み付け平均して入力物性値とした。捨石たい積物の下部は地質区分と同様に岩片優勢部とした。基盤岩は風化状況(強風化, 風化, 弱風化, 未風化)4区分とした。図-5に捨石たい積場のNMM-DDA連成解析におけるモデルと物性区分を示す。基盤斜面はNMM要素、

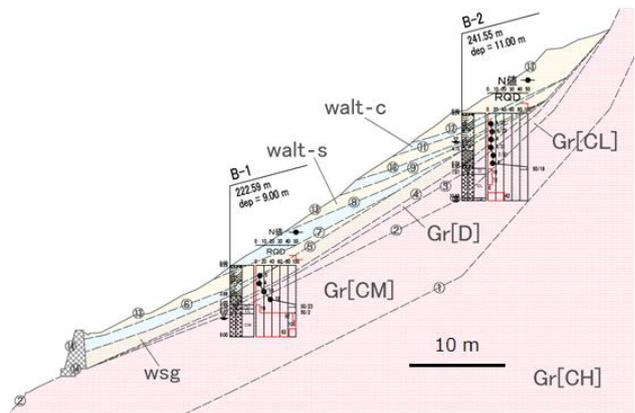


図-4 捨石たい積場の地質

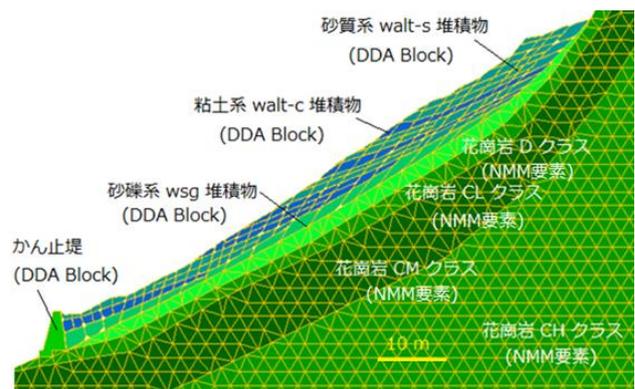


図-5 捨石たい積場のNMM-DDA連成解析物性区分

表-1 入力物性値一覧

	捨石堆積物				花崗岩		
	walt-c 15.7	walt-s 20.1	wsg	swGr	wGr	wwGr	Gr
湿潤密度 $\rho_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	18.3		20.6	21.0	22.0	24.0	25.0
粘着力 $c$ (kN/m <sup>2</sup> )	41	12	12	160	350	580	980
内部摩擦角 $\phi$ (deg.)	13.2	36.0	35	35.0	37.5	40.0	42.5
	22.0						
変形係数 $E_s$ (kN/m <sup>2</sup> )	9,900	15,600	73,500	176,000	323,000	585,000	
静水アソシ 比 $\nu_s$	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
P波速度 (m/sec)	430	1,140	1,500	2,000	2,400	3,000	
S波速度 (m/sec)	128	214	400	450	700	1,000	
動水アソシ 比 $\nu_d$	0.451	0.482	0.462	0.473	0.454	0.438	
動的せん断変形係数 $G_d$ (MN/m <sup>2</sup> )	30	90	340	450	1,200	2,500	
動弾性係数 $E_d$ (MN/m <sup>2</sup> )	89	270	1,000	1,330	3,450	7,300	

捨石はDDAブロックでモデル化している。表-1は解析に用いた物性値を示す。

### 3. 入力地震波の設定

耐震性評価に用いるレベル2地震動は、本モデルが鳥取県内に位置しているため、鳥取県(2015)が公表している断層型地震のうち鹿野・吉岡断層(1943年鳥取地震)と倉吉南方の推定断層で発生する地震<sup>7)</sup>による地震動を採用した。今回は最大応答加速度を示した、鹿野・吉岡断層について示す。図-6は水平方向加速度を示す。最大水平加速度は約400galである。図-7は上下方向加速度を示す。本波の最大上下加速度は約300gal、継続時間は75秒である。図-8は水平方向加速度のフーリエスペクトル(gal\*sec)を示す。スペクトルの

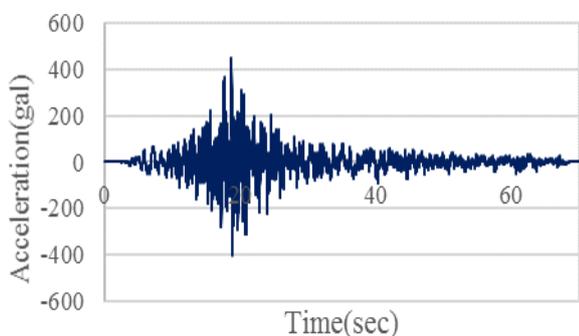


図-6 入力加速度 (水平方向)

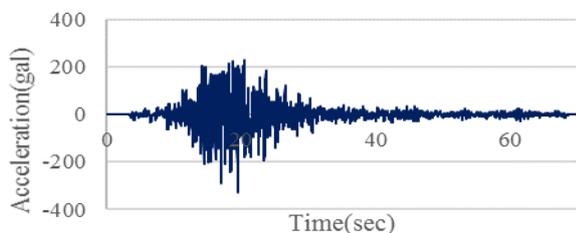


図-7 入力加速度 (上下方向)

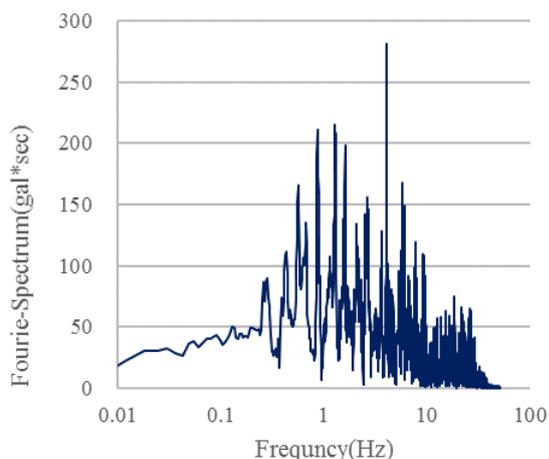


図-8 フーリエスペクトル (水平方向)

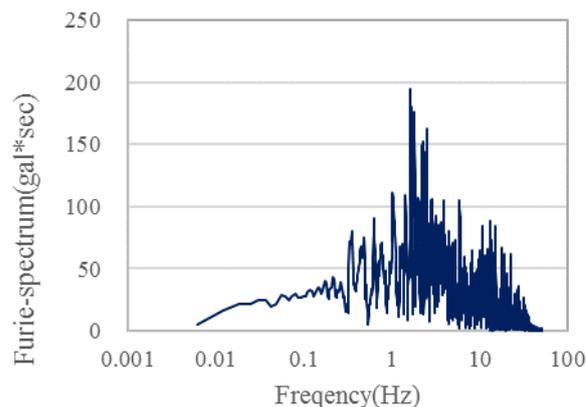


図-9 フーリエスペクトル (上下方向)

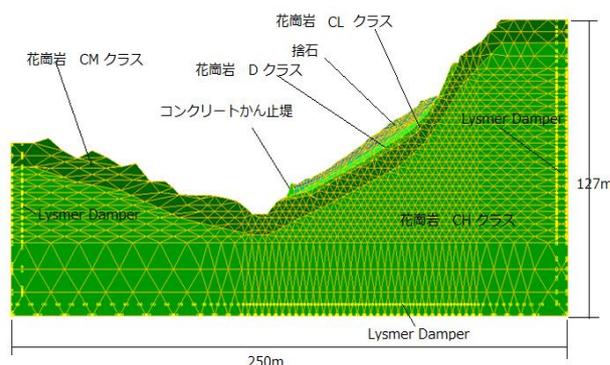


図-10 解析領域と境界条件

値は、0.5Hzから10Hzの間が大きく、10Hzから40Hzの高周期成分も見られる。図-9は上下方向加速度のフーリエスペクトルを示す。スペクトルの値は1Hzから30Hzの間で大きく、これは水平方向と比較してやや、高周期成分が大きくなっている。

### 4. NMM-DDA連成解析モデルの解析領域と境界条件

図-10はNMM-DDA連成解析モデルの領域および境界条件を示す。解析領域は水平方向が250m、上下方向が127mである。側方境界は、境界から5m内側に粘性境界を与えている。下方境界は、下端から5m内側に粘性境界を与えた。捨石たい積場斜面は、河川の上部に水平距離で約80mとなっている。斜面の勾配は、下部付近で約20度、中央部で約30度、上部で約40度である。NMM要素とDDAブロック間の法線方向の接触によるペナルティ係数(式10)は、動的解析では変形に物理的な意味を持つため、接触直交方向は動弾性係数と同じ値とし、接線方向のせん断剛性は接線方向ペナルティ係数の1/100にしている。計算に用いた時間刻みは0.002秒である。応答計算は、0秒から4秒までを、初期応力解析区間とした。

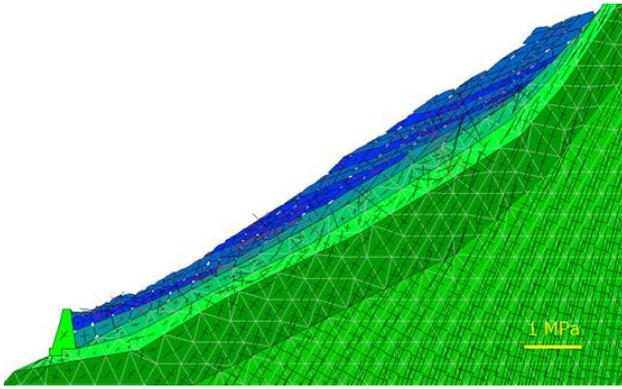


図-11 初期主応力分布

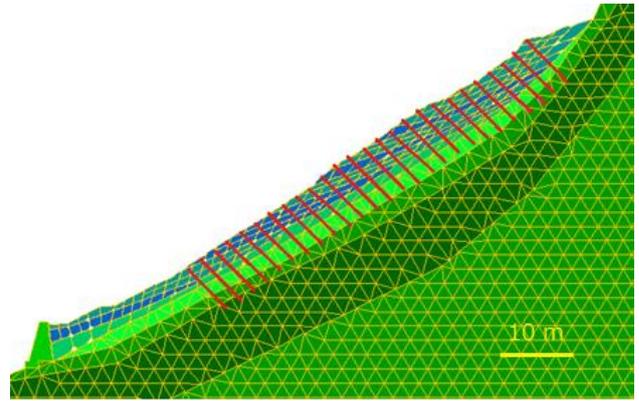


図-15 鉄筋挿入工モデル

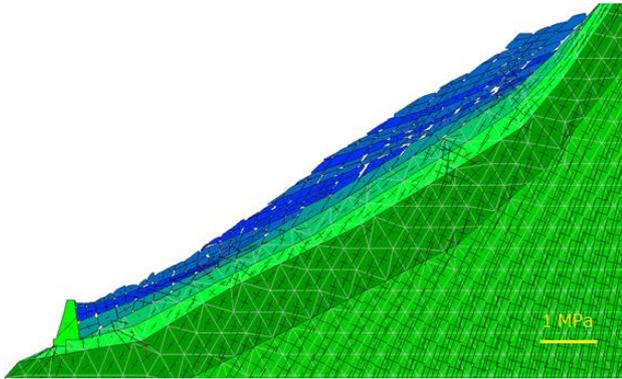


図-12 主応力分布(80秒後)

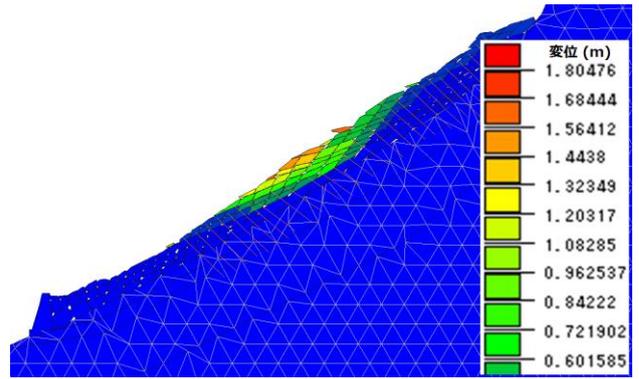


図-16 鉄筋挿入工対策後の変位分布 (80秒後, 最大1.80m)

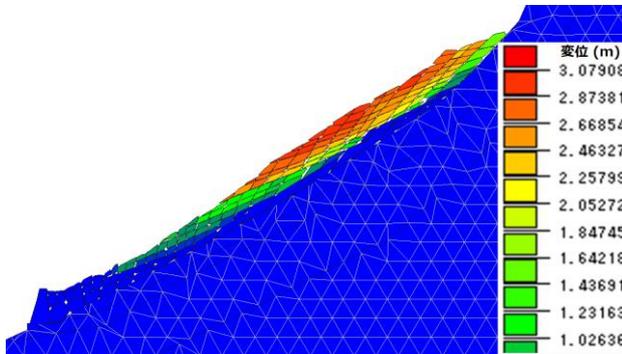


図-13 変位分布 (80秒後, 最大3.08m)

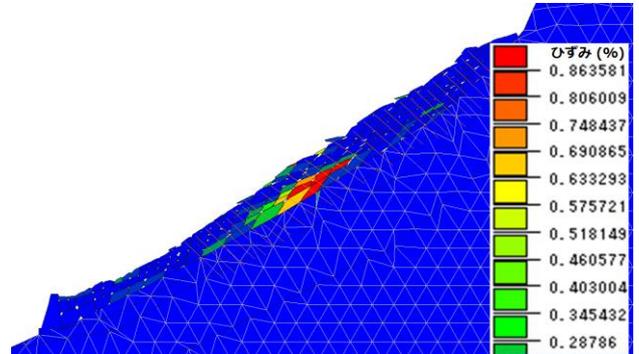


図-17 最大せん断ひずみ分布 (80秒後, 最大0.86%)

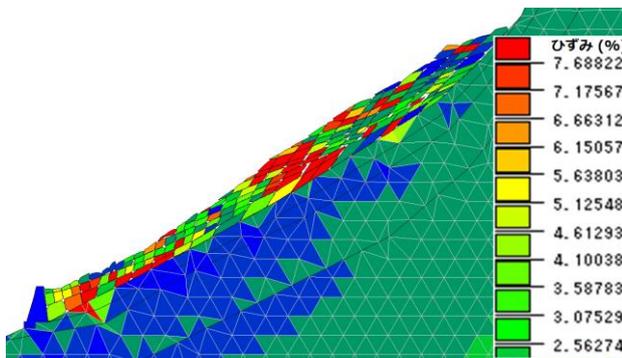


図-14 最大せん断ひずみ分布 (80秒後, 最大7.68%)

本モデルの粘性減衰係数は、NMM要素、DDAブロックとも5%とした。ブロック同士の接触による減衰はペナルティ係数の1%とした。また、最小変位比(MDR)は0.0005とし、地震の継続時間を80秒まで計40000ステップの計算を行った。応答によるDDAブロックの変形は約80秒程度で収束している。

## 5. 解析結果

2000年鳥取県西部地震の際に布部ダムで得られた波形を原種波形として、鹿野-吉岡断層で発生する地震動

(等価震源距離式による地震動, 図-6, 図-7) を想定した地震応答解析結果を示す. 図-11 に初期主応力分布図(4秒後4000ステップ)を示す. 初期主応力は花崗岩斜面のCH, CM級領域で斜面の傾斜に沿う様に分布しているが, CL, D級領域の境界部でやや乱れている. 図-12に80秒後(40000ステップ)の主応力分布図を示す. CH, CM級領域では, 初期応力とほぼ同様であるが, CL, D級領域内の斜面下部にやや応力集中が見られる. 図-13は80秒後の斜面ブロックの変位分布を示す. これによれば, たい積物は末端部のかん止堤を超えて河川まで到達することはない, 最大斜度付近に相当する斜面中腹部分の捨石たい積物にわずかに緩みが生じ, 斜面上部のブロックが最大で約3m程度下方へ移動することが想定される結果となった. 図-14は最大せん断ひずみ分布を示す. 最大せん断ひずみが7%を超える領域(赤色)は斜面中央部に分布している.

斜面安定対策として鉄筋挿入工を仮定し, 同じ地震波形を用いて応答解析を行い, 対策工の妥当性を検討した. 図-15に鉄筋挿入工モデルを示す. 図中の赤色の線が鉄筋を示す. 鉄筋はトラス要素でモデル化している. これらの鉄筋長は8mとし, 径は2.54cmである. トラス要素は斜面の表面部にあるDDAブロックと斜面基礎部のNMM要素を結合している. 図-16に鉄筋挿入工を仮定した80秒後の変位分布を示す. これらの最大変位は斜面中央の上部ブロックで約1.80mであるが, 斜面上部で平均約0.3m程度である. これらは, 対策なしの変位量(約3m)と比較して相対的に40%から70%程度低減する結果となった. 図-17は鉄筋挿入工モデルの最大せん断ひずみ分布である. 最大せん断ひずみが0.8%程度の領域(赤色)は斜面中央部に分布している.

## 6. 結論

本検討では, 河川に隣接する捨石たい積場斜面の地域で想定される地震に対する捨石ブロックの安定性を

NMM-DDA連成モデルを用いて地震応答解析を行い, 評価した. 斜面上の捨石ブロックの応答変位は, 地震の終了後(80秒)で斜面中央上部で最大3m程度となり, 当初懸念していた, 捨石がかん止堤を越え隣接する河川に至るようなことは無いことが判明した. また, 斜面安定対策として, 鉄筋挿入工を想定したモデルでは, 斜面ブロックの変位が, 約40%から70%程度低減する結果となった.

今後は本工法を基本に対策工法の詳細を検討することとし, 地震時の斜面安定に対して万全の対策を施していく所存である.

## 参考文献

- 1) Shi, G.H. and Goodman, R.E. : Generalization of two-dimensional discontinuous deformation analysis for forward modeling, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, Vol. 13, pp.359-380, 1989.
- 2) Shi, G.H. : Manifold method of material analysis, *Transactions of the 9th Army Conference on Applied Mathematics and Computing*, Report No.92-1, U.S. Army Research Office, 1991.
- 3) Miki, S., Sasaki, T., Koyama, T., Nishiyama, S. and Ohnishi, Y. : Development of Coupled Discontinuous Deformation analysis and Numerical Manifold Method (NMM-DDA), *International Journal of Computational Methods*, Volume 7, Issue 1, pp.131-150, 2010.
- 4) 三木 茂, 佐々木 猛, 大西有三, 小山倫史 : マニフォールド法—不連続変形法解析(NMM-DDA)の開発, 計算工学講演会論文集, Vol.17, 計算工学会, 2012.
- 5) 三木 茂, 大西有三, 小山倫史, 佐々木 猛 : NMM-DDAの地震時大規模地すべりへの適用, 第21回計算工学講演会, OS14マルチステージ破壊シミュレーション, 2016.
- 6) Kuhlemeyer, R.L., and Lysmer, J. : Finite element method accuracy for wave propagation problem. *J. Soil Mech. Found. Div.*, ASCE, 99(5): 421-427, 1973.
- 7) 鳥取県地震防災調査研究委員会, <https://www.pref.tottori.lg.jp/243607.htm>, 鳥取県, 2015.

## STABILITY OF A MINE RUBBLE DEPOSIT SITE IN EARTHQUAKES USING NMM-DDA COUPLED ANALYSIS

Yoshiyuki OHARA, Sigeru FUKUSHIMA, Sigeo HORIKAWA, Masaru KOSHIGAI and Takeshi SASAKI

The authors analyzed the behavior prediction of the mine deposit rocks on the slope in earthquake using Numerical Manifold method (NMM) and Discontinuous Deformation Method (DDA) coupled analysis. The waste rocks on the slopes did not reach the river beyond the end retaining tailing dam as a result. And the displacement amount was reduced 40% to 70% with the rock bolt insertion construction as a slope stabilization measures model.