

2004年新潟県中越地震時の盛土崩壊に関する水～土連成有限変形解析

名古屋大学大学院 学生会員 板橋一志

名古屋大学大学院 国際会員 野田利弘・中野正樹・山田英司・浅岡顕

中日本高速道路 正会員 稲垣太浩

1. はじめに

本報告は、2004年新潟県中越地震の道路用盛土で確認された3つの被災形態¹⁾について、前報²⁾より詳細な検証を行うために、実際の地盤情報を考慮し実施した盛土～地盤系の地震中/地震後の変形挙動の解析の結果を示す。図-1は旧JHが取りまとめた3つの典型的な盛土被災形状である。これら3つの被災形状を示した盛土の変形/崩壊主要因を特定することが、本研究の目的である。なお、解析にはSYSカムクレイモデル³⁾を搭載した動的/静的水～土連成有限変形解析(GEOASIA)⁴⁾⁵⁾を用いた。

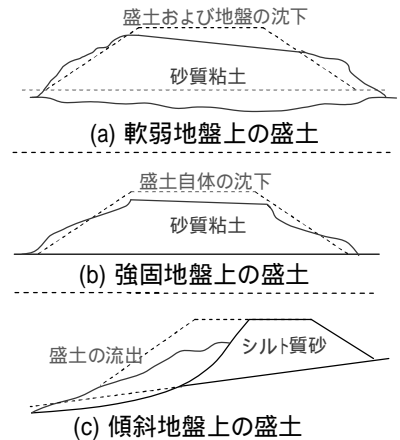


図-1 盛土の被災形態

2. 解析条件

図-2及び図-3に解析に用いた3つの対象地点の有限要素メッシュを示す。道路進行方向に対して等断面であるとし平面ひずみ条件にて全断面で計算を行った。工学的基盤面にあたる $V_s \geq 300\text{m/sec}$ の地層を底面(粘性境界)とし、両側面は盛土載荷の影響が無いように十分に幅を確保して周囲境界(等変位境界)を設けた。また、中越地震発生前に連続降雨があったことを考慮し、盛土・地盤とも飽和状態を仮定している。水理境界は地表面と水位面が一致し水圧をゼロとし、左右端面は非排水境界で下端面は砂層/砂礫層を考慮して排水境界とした。

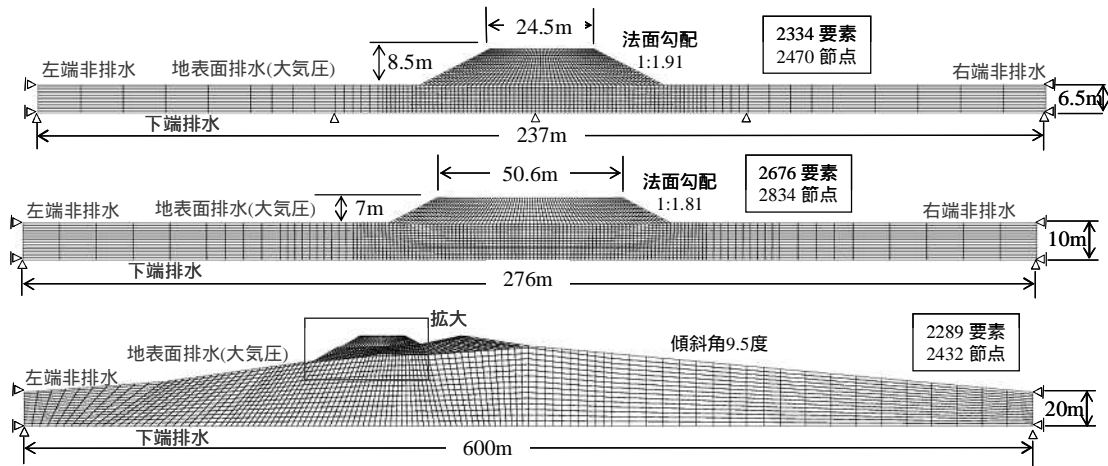


図-2 有限要素メッシュ(盛土構築後) 上から軟弱地盤・強固地盤・傾斜地盤

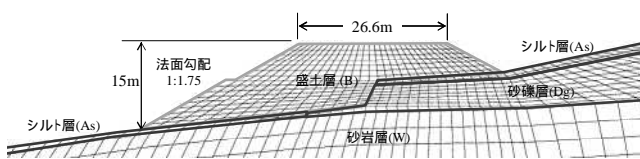


図-3 傾斜地盤の有限要素メッシュ(拡大図)

表-1 強固地盤地層

地表面からの深度	構成層
-8.5m ~ 0.0m	盛土層(B)
0.0m ~ 1.0m	粘土層(Ac1)
1.0m ~ 4.5m	砂礫層(Ag)
4.5m ~ 6.0m	砂層(As1)
6.0m ~ 6.5m	粘土層(As2)
6.5m ~	工学的基盤面

表-2 軟弱地盤地層

地表面からの深度	構成層
-7.0m ~ -1.0m	盛土層(B)
-1.0m ~ 0.0m	敷砂(Ts)
0.0m ~ 2.0m	シルト層(Ac1)
2.0m ~ 4.0m	砂層(As)
4.0m ~ 6.0m	粘土層(Ac2-1)
6.0m ~ 7.0m	粘土層(Ac2-2)
7.0m ~ 10.0m	粘土層(Ac2-3)
10.0m ~	工学的基盤面

A soil-water coupled finite deformation analysis on failures of embankments in The Mid Niigata Prefecture Earthquake in 2004. Itabashi, K (e-mail: itabashi@soil.civil.nagoya-u.ac.jp), Noda, T, Nakano, M, Yamada, E, Asaoka, A (Nagoya Univ), and Inagaki, T (NEXCO-Central)

表-1 と表-2 に対象箇所の地層構成を示す(傾斜地盤の地層は図-3 内に併記)。軟弱地盤は N 値の低い粘土層と緩い砂層が互層構成になっており、強固地盤は密な砂層/砂礫層がそれぞれ水平均質に堆積している。傾斜地盤は非常に硬い砂岩層が厚く堆積しており、段切りされた砂礫層の上に薄くシルト層が堆積している。

表-3 には解析に用いた材料定数及び初期値を示す。サンプリングやボーリングによって不攪乱試料や乱された試料が採取可能であった地点については、室内試験結果²⁾を元に密度(初期空隙比)となるように原位置初期状態を構成式応答にて逆解析的に決定した。試料が無い層については過去に名大で室内試験を実施した材料の中で物理特性が類似する土材料を指定した。初期値は層内での比体積・構造の程度は一様均質とし、土被り圧に応じて過圧密比のみ分布させた。

表-3 解析に用いた盛土と自然堆積地盤の材料定数及び初期値

構成層名	軟弱地盤							強固地盤					傾斜地盤			
	盛土層 (B)	敷砂 (Ts)	シルト層 (Acl)	砂層 (As)	粘土層 (Ac2-1)	粘土層 (Ac2-2)	粘土層 (Ac2-3)	盛土層 (B)	粘土層 (Acl)	砂礫層 (Ag)	砂層 (As1)	粘土層 (As2)	盛土層 (B)	シルト層 (As1)	砂礫層 (Dg)	砂岩層 (W)
圧縮指数 $\bar{\epsilon}$	0.128	0.05	0.185	0.05	0.260	0.193	0.198	0.128	0.20	0.050	0.030	0.063	0.083	0.063	0.05	0.05
膨潤指数 $\bar{\epsilon}_s$	0.02	0.012	0.010	0.012	0.022	0.030	0.030	0.02	0.035	0.012	0.012	0.012	0.008	0.012	0.012	0.012
限界状態定数 M	1.30	1.00	1.40	1.00	1.7	1.350	1.350	1.30	1.30	1.00	1.00	1.45	1.10	14.5	1.00	10.0
NCL の切片 N	1.91	1.98	2.05	1.98	2.68	2.405	2.405	1.91	2.50	1.98	1.98	1.51	1.91	15.1	1.98	19.8
ポアソン比 ν	0.2	0.3	0.35	0.3	0.25	0.300	0.300	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3
正規圧密土化指数 m	0.25	0.06	2.8	0.06	3.0	0.8	0.8	0.25	1.00	0.06	0.06	0.15	0.20	0.15	0.06	0.06
構造劣化指数 a	3.4	2.2	0.01	2.2	0.3	0.6	0.6	3.4	0.3	2.2	2.2	0.0	4.0	10	2.2	2.2
b	0.4	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.4	0.5	1.0	1.0	1.0	0.4	1.0	1.0	1.0
c	1.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
c_s	0.92	1.0	0.1	1.0	0.25	0.30	0.30	0.92	0.4	1.0	1.0	1.0	0.8	1.0	1.0	1.0
回転硬化指数 b_p	0.7	3.5	0.001	3.5	0.010	0.01	0.01	0.7	0.01	3.5	3.5	0.3	0.5	0.3	3.5	3.5
回転硬化限界定数 m_p	0.6	0.6	1.0	0.6	1.0	1.0	1.0	0.6	0.7	0.6	0.6	0.65	1.1	0.65	0.7	0.7
応力比 η_0	0.545	0.545	0.545	0.545	0.545	0.545	0.545	0.545	0.545	0.545	0.545	0.545	0.545	0.545	0.545	0.545
比体積 v_0	1.94	1.79	2.20	1.79	3.67	2.374	2.580	1.94	2.15	1.89	1.90	1.566	1.935	15.6	1.79	1.79
構造の程度 $1/R^*$	6.0	1.25	3.50	1.50	4.30	2.0	5.3	6.00	1.50	1.25	1.25	1.37	20.0	12.0	1.25	1.25
異方性の程度 c_0	0.545	0.545	0.10	0.545	0.27	0.25	0.25	0.545	0.10	0.545	0.545	0.344	0.545	0.545	0.545	0.545
透水係数 k (cm/sec)	17.5×10^{-4}	2.80×10^2	100×10^{-5}	2.80×10^2	1.00×10^7	1.00×10^7	1.00×10^7	1.75×10^2	1.0×10^{-7}	2.80×10^2	2.80×10^{-4}	1.0×10^{-5}	2.80×10^{-4}	1.00×10^{-5}	1.00×10^{-3}	1.00×10^{-7}
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.641	2.650	2.631	2.630	2.559	2.684	2.449	2.641	2.640	2.650	2.650	2.650	2.625	2.650	2.650	2.650

解析では、まず施工過程を考慮して地盤上に盛土層を所定高さまで載荷速度 0.08m/day で盛り立てる。次に道路の供用年数分(25 年間)だけ圧密放置を実施し、盛土載荷による過剰間隙水圧が十分に消散するまで放置した。その後、図-4 に示す観測地表面波からの開放基盤面における加速度の 1/2 を 60 秒間、基礎地盤の底面に与え、地震終了後は地盤内の過剰間隙水圧が消散して地盤が安定するまでの間、約 20 年間圧密放置計算を行った。

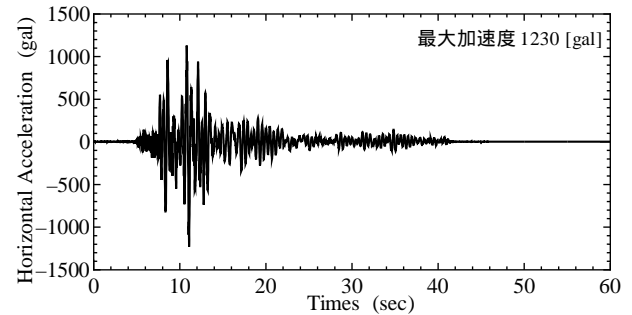


図-4 入力地震波の加速度(K-net 小千谷 EW 方向)

3. 軟弱地盤上の盛土の解析結果

図-5 は軟弱地盤の法肩～法尻付近についての地震前と地震後の変形図を示す(薄色:地震前)。盛土中央部での地盤沈下と法尻部での地盤隆起が顕著に見られ、盛土の偏荷重による地盤の変形に追従する形で盛土自体も変形している。法尻部での地盤の隆起については被災現場の検証でも確認されており(写真-1)、このことをよく再現できた。

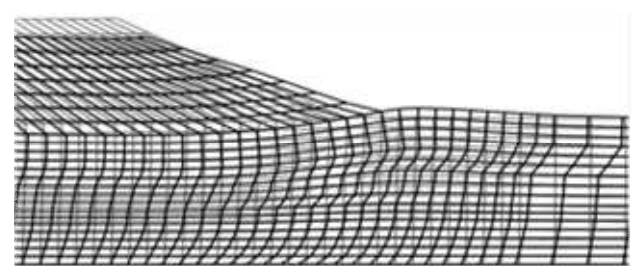


図-5 軟弱地盤の地震時変形

図-6 には基礎地盤での地表面沈下量を示す。盛土構築による初期沈下が 0.5m 生じており、地震によって地盤の変状は、法尻部で最も隆起し法肩部で最も沈下してW型となった。また、地震後 20 年間で遅れ圧密によって全体的に 0.3m 程度沈下していることが分かる。続いて、時間～沈下関係(図-7)から時間遅れで発生した沈下がどの層に因るものかを調べた。

今回の解析では地盤の沈下には生じる時期が早いものと遅いものに分けられ、前者は地震発生直後に揺すり込みによる体積圧縮を起こしている砂層と粘土1層で確認できる。後者に分類される粘土2上層と粘土2下層では地震後何日～何年にも掛けてただらと沈下が生じ、構造高位な粘土に特有な遅れ圧密沈下を起こしている。過剰間隙水圧の消散に伴って沈下が進行し、その排水距離に応じて基礎面上の層から順に沈下が起きている様子がみてとれた。

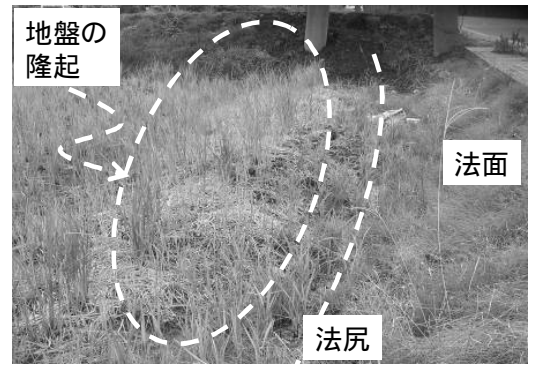


写真-1 法尻付近での地盤の隆起

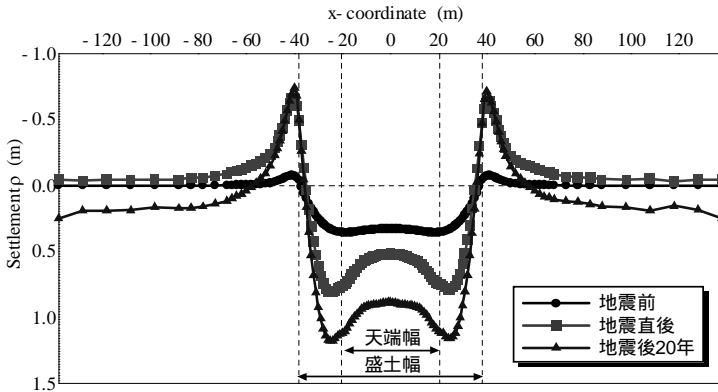


図-6 基礎地盤（盛土を除いた）の沈下量

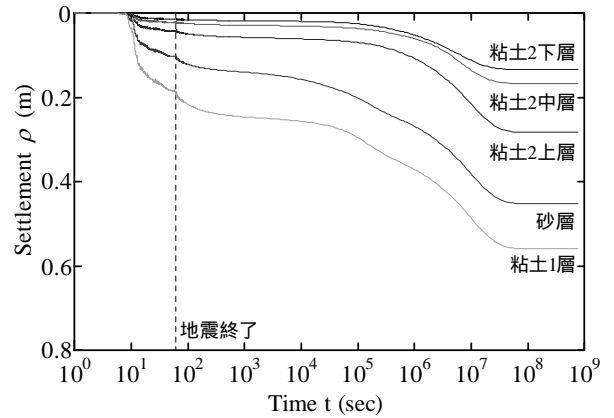


図-7 盛土中央直下の時間～沈下関係

図-8 は地震後 20 年のせん断ひずみ分布であるが、法尻直下の基礎地盤においてひずみが顕著で、遅れ圧密が生じている層と一致した。このことより、軟弱地盤上の盛土は緩く堆積した構造高位な粘土層が変形の主要因となり被災したと考えられる。

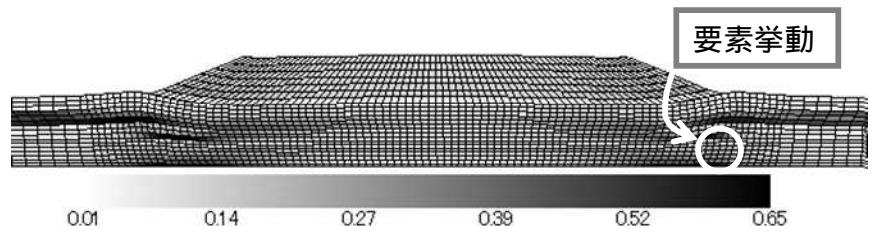


図-8 地震後 20 年のせん断ひずみ分布

さらに具体的に構造高位な粘土層が地震時にどのような挙動であったのかについて、粘土下層の法尻直下箇所の要素挙動を図-9に示す。盛土構築の圧密過程で体積圧縮を生じているものの、未だ正規圧密線(NCL)の上側に位置しており、言い換えれば構造高位な状態のまま高い比体積を保って盛土が安定している。しかし、地震によるせん断を受けてひずみが進行すると同時に過剰間隙水圧の上昇と平均有効応力 p' の減少が起き、地震後に p' の回復に伴って塑性

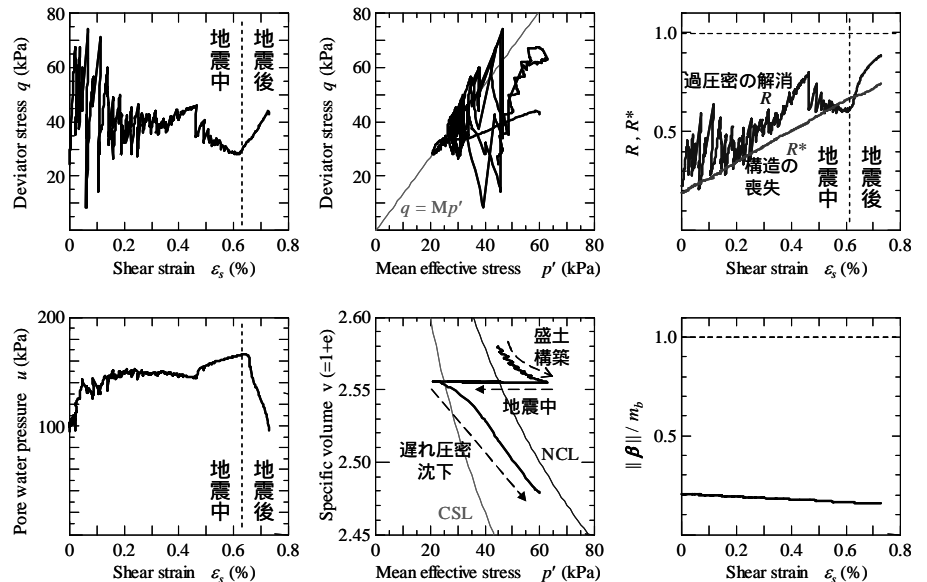


図-9 粘土下層の要素挙動

変形を受けた粘土から構造が急速に喪失し、大きな体積圧縮(遅れ圧密沈下)が起きた。

以上より、自然堆積した軟弱な粘土層を有する地盤では、地震時に粘土層がせん断力を受けて乱された状態となり構造低位化が起き、過剰間隙水圧の消散に伴ってずると遅れ圧密沈下が生じることで変形したと説明できる。

4. 強固地盤上の盛土の解析結果

図-10 は強固地盤の地震前と地震後の変形図を示す(薄色:地震前)。基礎地盤の変形の沈下や隆起は見られず、盛土の変状が卓越している。本解析で得られた盛土の変形(法面・法尻部のはらみ出しと天端の不同沈下)については、現地調査にて実際に確認された被害と合致した(写真-2)。

盛土のせん断ひずみ分布の経時変化を図-11 に示す。地震直後から盛土法尻箇所において著しくせん断ひずみが発生し、法面勾配の変形の主要因と推測される。盛土中央直下ではせん断ひずみ自体は少ないが、地震後に時間遅れの沈下が確認された(図は省略)。

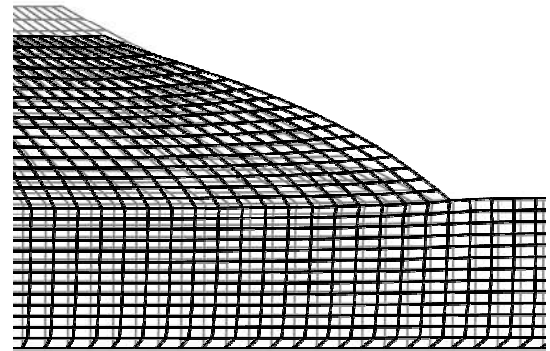


図-10 強固地盤の地震時変形



写真-2 法面のはらみ出し

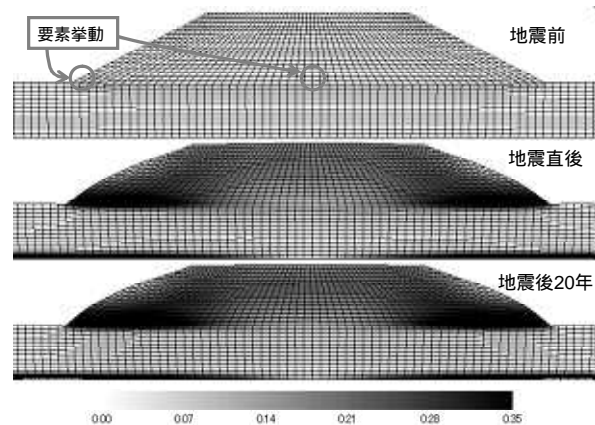


図-11 せん断ひずみの経時変化

盛土法尻と盛土中央直下の要素挙動について比較したものを図-12~13 に示す。同じ初期状態から盛った土材料でも盛土高分の土被り圧と地震時の排水/非排水条件に応じて2つの要素挙動は大きく異なる。盛土法尻部の土要素は地震時に構造喪失と過圧密解消を示しながら、 p' の増加を伴う軸差応力 q の増加を受け、最終的にはひずみは50%に至る。地震中には水圧の上昇はほとんどみられず排水せん断が進行している。また、地震後の圧密では法面からの吸水膨張により比体積が上昇した。盛土中央直下の土要素では、地震時には水のマイグレーションが十分に行われずに非排水せん断に近い挙動を示し、液状化($p'=0$)までには至っていないが急激な p' の減少が起きている。地震中には構造の喪失と共に過圧密の蓄積が同時に起きており、その後の圧密過程では蓄積した過剰間隙水圧の解消によって過圧密の解消による体積圧縮(揺すり込み沈下)を生じている。

強固地盤上の盛土の被災要因は、基礎地盤の高い剛性によって、底面より伝播して増幅された地震波が、盛土層に直接伝わり、盛土に集中して被害をもたらすことが明らかとなった。法面のはらみと天端の不同沈下については、地震時に盛土の異なる変形モード(法尻での卓越したせん断変形、盛土中央直下での揺すり込み沈下)によって盛土崩壊していることが計算から推察される。

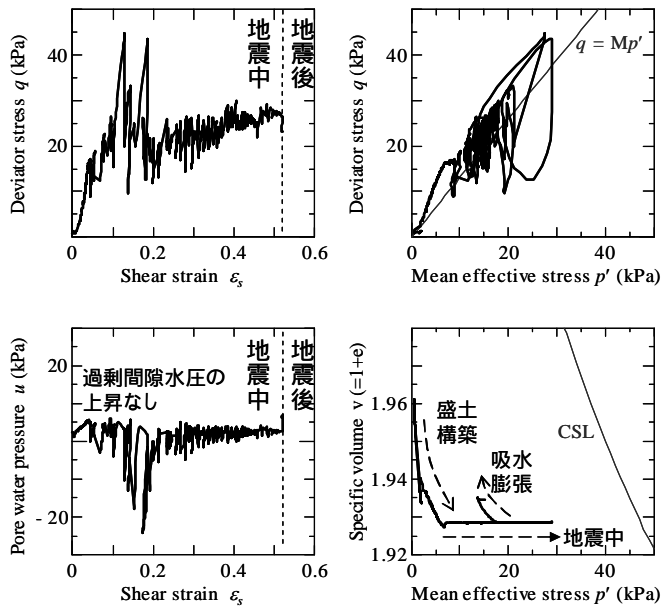


図-12 盛土法尻の要素挙動

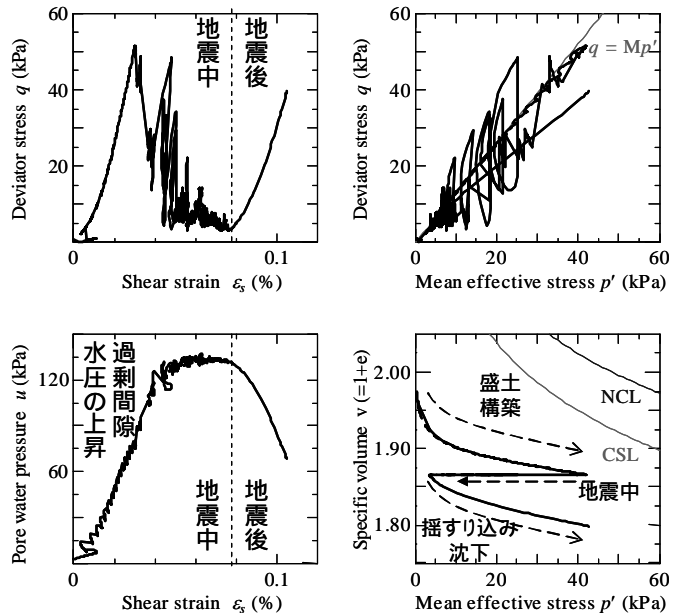


図-13 盛土中央直下の要素挙動

5. 傾斜地盤上の盛土の解析結果

図-14は傾斜地盤の地震前と地震後の変形図を示す(薄色:地震前)。強固地盤同様に地盤の変形はみられず、盛土の変形が卓越している。盛土の天端の水平方向の不同沈下及び、法面変形(はらみ出し)が見られ、図-15において示すように地震直後のせん断ひずみが、段切り面より下側の盛土において時間と共に増加している。

特にひずみの顕著であった盛土左法尻での要素挙動を図-16に示した。盛土法尻部の土要素は、先に盛土載荷による上載荷重によって構造の喪失と過圧密の解消が起こっている。地震中は過剰間隙水圧の上昇は見られず、地震時に p' の増加を伴った q を受け、ひずみの進行と共に過圧密が増減をくり返し、ひずみが100%以上進行する結果となった。地震終了後には吸水膨張を示し、比体積が上昇した。

以上の計算結果から、傾斜地盤における盛土の変状(斜面の土砂流出)について考察を行う。地震終了後に盛土の法尻からせん断ひずみが進行しており、盛土の小段部分より下側(つまりは切土し、砂礫層(Dg)に接している)の要素では、地震後から徐々にひずみが進行し、ひずみの領域も広がっている。このことから推測できる崩壊の原因として、図-17に示すように盛土内への水の流入による盛土の吸水膨張が考えられる。砂礫層で発生した過剰間隙水圧は消散する際に、傾斜地盤を伝わって盛土中央要素に流入していく。段切り部の砂礫層の透水係数は盛土層よりも高く、この水の流入は盛土要素に対しての余剰な水圧となり、その消散時に盛土要素が膨潤し、斜面が崩壊したと考えられる。本計算ではひず

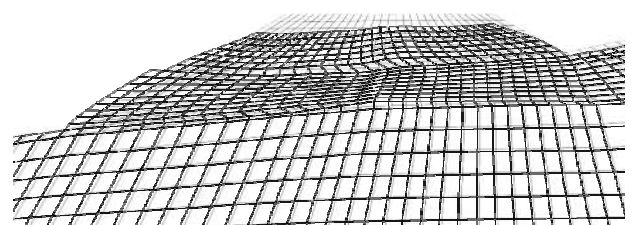


図-14 傾斜地盤の地震時変形

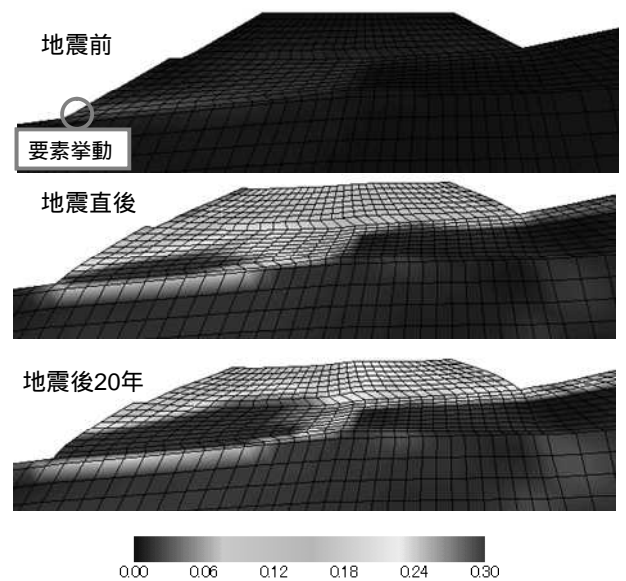


図-15 せん断ひずみの経時変化

みが 100%を超えた為、盛土が崩壊する前までの解析に留めた。

6. おわりに

本報告では、2004年新潟県中越地震での異なる崩壊形状を示した3つの箇所を取り上げ、GEOASIAにて地震中/地震後の変形挙動の挙動を調べた。解析により検証した結果と得られた知見を以下にまとめる。

砂～粘土が緩く堆積した軟弱地盤上の盛土にせん断応力が加わると、主に基礎地盤の粘土層において構造劣化による遅れ圧密沈下(2次圧密)が起きていることが確認された。その要因で軟弱地盤の変形に盛土が追従する形で変形を示していることが分かった。

比較的強固な地盤上の盛土は、天端の不同沈下と法尻のはらみ出しは盛土内部での局所的な「液状化」と法面部でのせん断変形の複合要因によって変状したことが示された。

傾斜地盤上の盛土は、傾斜地形による水の流入によって盛土が緩み、盛土内部にて発生した水圧が傾斜を伝わり排出されるため、法面にて吸水膨張とともにせん断変形が進行する形で斜面崩壊したものと考えられる。

本報告のような盛土～地盤系での複合的な要因から起こる地震時被害に対して、GEOASIAは土固有の種々の力学現象(せん断変形/破壊・遅れ圧密沈下・揺すり込み沈下・吸水膨張)に対してプログラムを切り替えることなくシームレスに解析可能であり、有用であることが明らかとなった。今後は本報告から他の地震箇所においての盛土の変形/崩壊事例を検証するとともに、対策工を加えた場合の比較検証を行い、実際の盛土の耐震性を向上に関する研究を推し進めてゆきたい。

参考文献

- 1) 大窪克己他(2005):土構造物における被災状況,ハイウェイ技術,177,pp.27-33.
- 2) 板橋一志他(2008):2004年新潟県中越地震における盛土～地盤系連成挙動に関する水～土骨格連成解析,第43回地盤工学研究発表会
- 3) Asaoka et al.(2002): An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, S & F, 42(5), pp.47-57.
- 4) Asaoka, A. and Noda, T.(2007): All soils all states all round geo-analysis integration, Int. Workshop on Constitutive Modelling-Development, Implementation, Evaluation, and Application, Hong Kong, China, pp.11-27.
- 5) Noda, T., Asaoka, A. and Nakano, M.(2008): Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, under contribution.

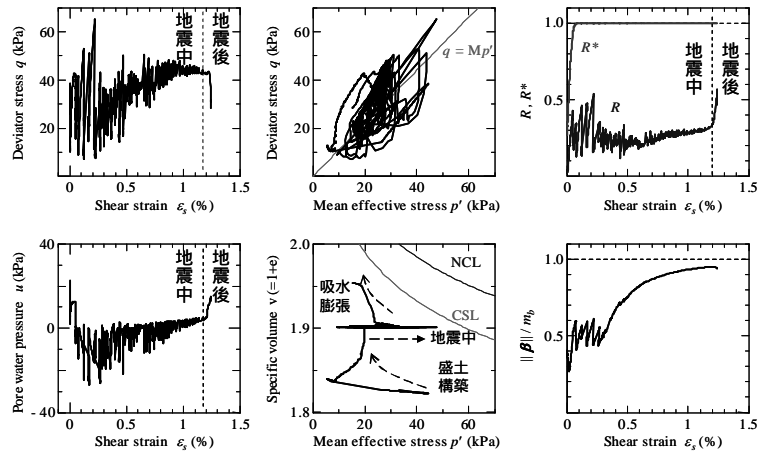


図-16 盛土左法尻の要素挙動

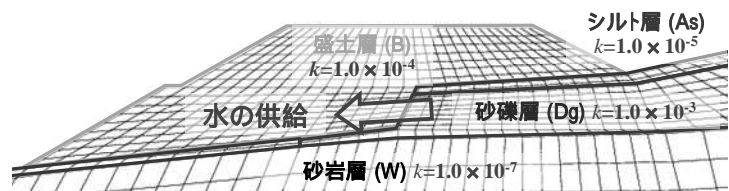


図-17 傾斜地盤の盛土への水の供給