

## 改良 O 型 Newmark 法に基づく 2011 年東北地方太平洋沖地震における被災盛土の残留変形量の評価

Evaluation of Residual Deformation of Damaged Embankment during the 2011 off the Pacific  
Coast of Tohoku Earthquake Based on the Modified Newmark Method by Osaka University

魚谷真基	Masaki UOTANI	(大阪大学大学院工学研究科)
常田賢一	Ken-ichi TOKIDA	(大阪大学大学院工学研究科)
秦 吉弥	Yoshiya HATA	(大阪大学大学院工学研究科)
村上考輝	Kouki MURAKAMI	(関西電力(株))

大規模地震時における盛土の残留変形量の評価において、従来型の Newmark 法では盛土内における加速度増幅特性を考慮しないことが一般的である。この点に関して著者らは、増幅特性を考慮することにより、従来の手法よりも残留変形量を精度良く予測するための「改良 O 型 Newmark 法」を提案している。2011 年東北地方太平洋沖地震では、常磐自動車道の道路盛土が被災し、斜面先破壊となる大規模な被害が発生した。この被害盛土を対象として、本稿では、残留変形量の予測法の向上の観点から、改良 O 型 Newmark 法の適用性を検証した。その結果、増幅特性を考慮することにより残留変形量を精度良く評価できることが確認できた。

キーワード： Newmark 法，地震，道路盛土，残留変形量，土質定数（IGC：D07，E08）

### 1. はじめに

線状構造物である道路は、一箇所での崩壊がネットワークシステム全体の機能低下につながるため、地震による道路盛土の崩壊は社会的・経済的に大きな被害を与えることが危惧される。しかし、長距離に及ぶ道路盛土全てにおいて耐震設計を行うことは経済的負担が大きい。そのため合理的な耐震対策が必要である。そこで大規模な地震動に対して盛土の安全率確保が困難な場合に、車道部にまで及ぶすべり破壊の発生を抑制する性能設計のアプローチとして、盛土の残留変形量の評価は重要である。

従来、残留変形量の評価に関して盛土内における加速度増幅特性を考慮しない Newmark 法<sup>1), 2)</sup>の適用が一般的である。しかし Newmark 法による解析では残留変形量の過小評価を指摘されており<sup>3)</sup>、盛土内の応答加速度を考慮することは重要である。そこで筆者らは、増幅特性を考慮することにより、従来の手法より残留変形量を精度良く予測するための手法である「改良 O 型 Newmark 法」<sup>4)</sup>を提案している。

一方で、2011 年東北地方太平洋沖地震において茨城県水戸市の常磐自動車道の道路盛土では、大規模な被害が発生した<sup>5)</sup>。この被害の特徴は、軟弱な基礎地盤において斜面先破壊が発生したこと、概ね同等の構造の両盛土で片側車線のみ被害が発生したこと等が挙げられる。これら特徴的被害の原因解明のために、著者らは盛土のモデル化及び特徴的被害の再現を行い様々な要因について考察<sup>6)</sup>を行

ったが、作成モデルにおける残留変形量の解析では実際の被害（約 1.6m）と大きな差異が見られた。

そのため、本研究は、被害規模の予測法の検証・向上を目的として、従来の Newmark 法（以下、従来型 Newmark 法と呼ぶ）との比較に基づいて、改良 O 型 Newmark 法の適用性を明らかにし、既往の経験地震による盛土の変状実績に従い土質定数を設定することで、実被災盛土における残留変形量の再現を行った。

### 2. 改良 O 型 Newmak 法

改良 O 型 Newmark 法は、盛土内の応答加速度を考慮することで、従来型 Newmark 法に比べて精度の良い残留変形量の評価を期待するものとして、著者らが提案している手法<sup>4)</sup>である。改良 O 型 Newmark 法の解析フローを図-1に示す。

改良 O 型 Newmark 法は、盛土の応答加速度分布を修正 R-O モデルによる動的 FEM 解析により算出し、逐次の応答加速度分布を外力とする極限約合安定解析（円弧すべり安定計算）を逐次実施して破壊発生の判定を行う。さらに従来型 Newmark 法によりすべり変位量を算出する。なお、ここで適用する入力波形は、時刻歴応答解析の所定の代表点（すべり土塊重心）での応答波形を採用する。

改良 O 型 Newmark 法の利点は、盛土内の加速度増幅特性の考慮により、すべり面位置及びすべり変位量の予測精

度の向上が図れること、ひずみ軟化を含む複雑な応力ひずみ関係を一部、間接的ではあるが比較的簡易に考慮出来ること、動的 FEM 解析では再現困難なすべり破壊変形を精度よく再現出来ること、すべり面位置を一意的に決定し、定量的に評価出来ること等がある。なお、改良 O 型 Newmark 法の適用性については、動的遠心載荷実験等で既に検証<sup>4)</sup>がなされているが、実際の被災盛土に対する検証事例は少ない。

### 3. 対象盛土

2011 年東北地方太平洋沖地震の強震動の作用により、茨城県水戸市の常磐自動車道の那珂 IC 付近上り車線の 92.4kp の盛土で大規模な、特徴的被害が発生した<sup>5)</sup>。その被害の特徴とは 1. で述べたように、一つ目に、比較的層厚が薄いものの軟弱な基礎地盤上において底部破壊でなく斜面先破壊が発生したこと、二つ目に、対象の盛土は概ね対称形構造である両盛土であるが、上り車線側のみで被害が発生し、下り車線側が無被害であったことが挙げられる。対象の崩壊盛土の被害状況を写真-1 および写真-2 に、断面図を図-2 にそれぞれ示す。写真-2 で示すように、天端における残留変形量は約 1.6m であった。

### 4. 円弧すべり法による斜面先破壊の再現

対象盛土において大規模地震により特徴的な被害が発生した原因が明らかになれば、今後の道路盛土の耐震性評価や耐震対策の参考になると考えられる。そこでまず、フェニウス法に基づく円弧すべり法による斜面先破壊の再現を試みた。再現したモデルを図-3 に、モデルのパラメータを表-1 にそれぞれ示す。1 層から 4 層は、崩壊地から約 60m 近傍のボーリングデータを基に、盛土下深度 8.0m までを基礎地盤としてモデル化し、3 層と 4 層の間に地下水位を設定した。また 4 層から 9 層は盛土部であり、その内 7 層から 9 層を舗装部とした。パラメータに関しては、ボーリングデータおよび設計要領第一集土工編<sup>9)</sup>に基



写真-1 対象盛土の被害状況<sup>7)</sup>



写真-2 対象盛土の被害状況<sup>8)</sup>

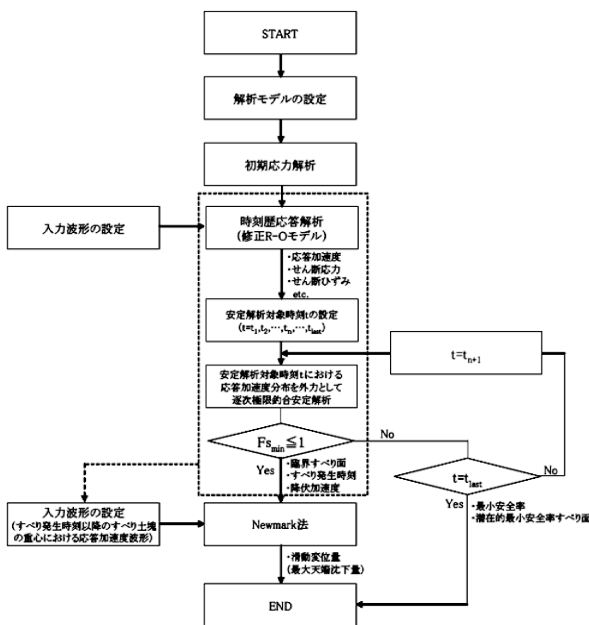


図-1 改良 O 型 Newmark 法<sup>4)</sup>の解析フロー

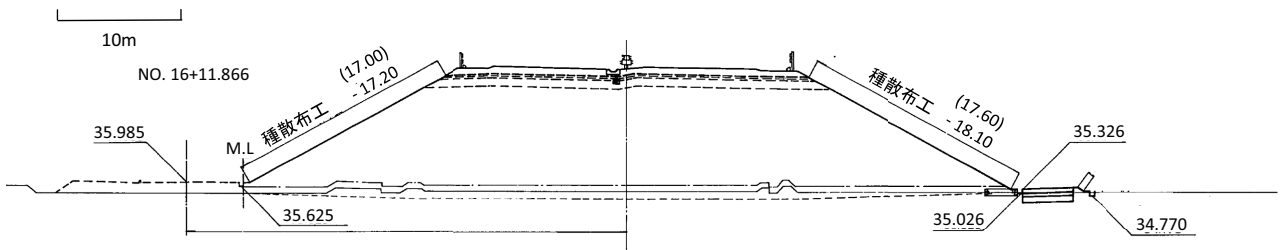


図-2 崩壊盛土の断面図

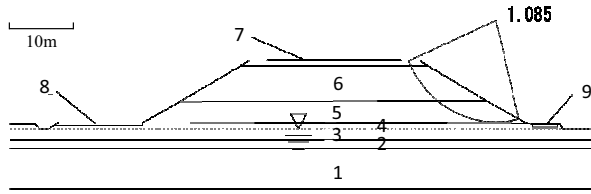


図-3 斜面先破壊の既往の再現モデル<sup>6)</sup>

表-1 既往モデルの土質定数<sup>6)</sup>

層番号	飽和重量(kN/m <sup>3</sup> )	湿潤重量(kN/m <sup>3</sup> )	内部摩擦角(deg.)	粘着力(kPa)
1	20	20	35.86	0.00
2	20	16	20.00	18.75
3	20	16	15.00	13.00
4	20	16	15.00	13.00
5	20	14	20.00	5.00
6	20	19	20.00	10.00
7	20	20	40.00	0.00
8	20	20	35.00	0.00
9	20	20	30.00	0.00

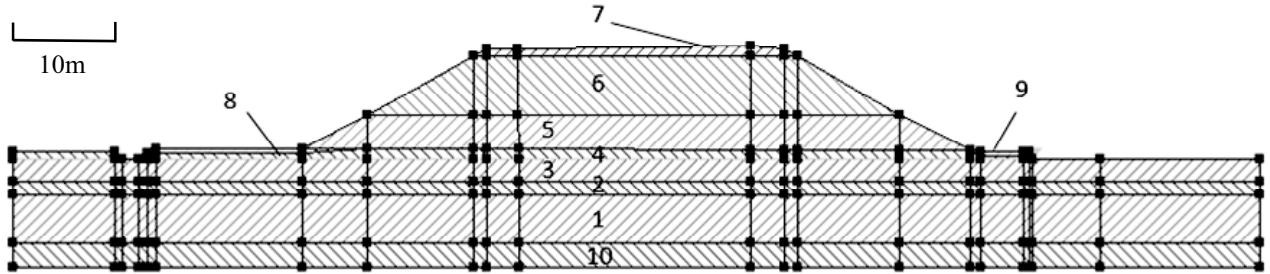
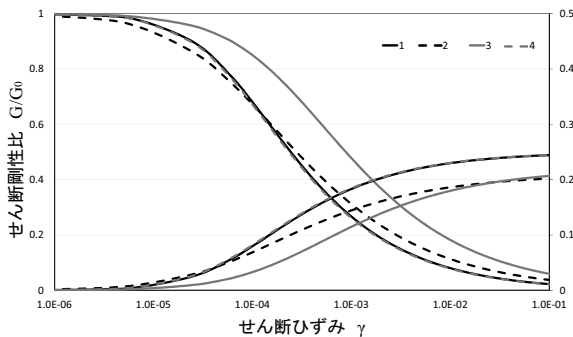


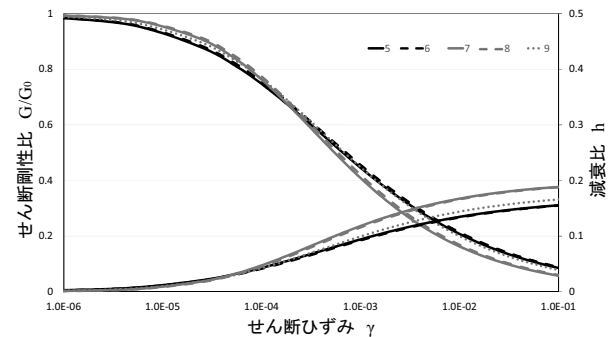
図-4 動的FEM解析におけるモデル

表-2 動的FEM解析におけるパラメータ

層番号	湿潤重量 $\gamma_i$ (kN/m <sup>3</sup> )	粘着力 c (kPa)	内部摩擦角 $\phi$ (deg.)	せん断弾性係数 $G_0$ (kPa)	平均有効主応力 $\sigma_m$ (kPa)	ポアソン比 $\nu$	R-O $R_f$	R-O $\alpha$	R-O $\beta$	R-O $h_{max}$	弾性定数 E(kPa)	構成則
1	20	0.00	35.86	308000	93.082	0.33	9.30	2.451	2.293	0.25	—	修正R-Oモデル
2	20	18.75	20.00	207000	65.015	0.33	5.60	1.978	1.988	0.21	—	修正R-Oモデル
3	20	13.00	15.00	99300	58.882	0.33	1.20	2.079	2.056	0.22	—	修正R-Oモデル
4	16	13.00	15.00	99300	47.648	0.33	4.50	2.451	2.293	0.25	—	修正R-Oモデル
5	14	5.00	20.00	105000	43.655	0.33	1.70	1.657	1.729	0.17	—	修正R-Oモデル
6	19	10.00	20.00	66300	30.939	0.33	1.80	1.657	1.729	0.17	—	修正R-Oモデル
7	20	0.00	40.00	158000	4.551	0.33	5.00	1.887	1.916	0.20	—	修正R-Oモデル
8	20	0.00	35.00	118000	2.667	0.33	3.70	1.887	1.916	0.20	—	修正R-Oモデル
9	20	0.00	30.00	124000	2.667	0.33	2.50	1.727	1.788	0.18	—	修正R-Oモデル
10	20	0.00	35.86	—	—	0.33	—	—	—	—	164000	弾性モデル



(a) 基礎地盤



(b) 盛土部

図-5  $G/G_0, h \sim \gamma$  曲線<sup>10)</sup>

づき決定した。円弧すべり法による解析を行った結果、常時の安全率は 1.085 となり、破壊形態は常時、設計震度  $k=0.1, 0.2, 0.3$  のいずれの場合も実被害と同様の斜面先破壊となった。

### 5. Newmark 法による残留変形量の評価

斜面先破壊を再現した盛土モデルを用いて従来型 Newmark 法及び改良 O 型 Newmark 法による残留変形量の解析を行った。動的 FEM 解析のモデルおよび、パラメータをそれぞれ図-4、表-2 に示す。せん断弾性係数  $G_0$  および弾性定数  $E$  は  $N$  値に基づいて決定した。また、修正 R-O

モデルに用いる動的変形特性 ( $G/G_0, h \sim \gamma$  曲線) のフィッティング係数  $R_f, \alpha, \beta, h_{max}$  は、安田・山口 (1985) の提案式<sup>10)</sup>を用いて求めた。 $G/G_0, h \sim \gamma$  曲線を図-5 に示す。モデルは 10 層から成り、構成則は 10 層を弾性モデルとし 1 層から 9 層までを修正 R-O モデルとした。また境界条件は初期応力解析において底面を固定支点、側面を鉛直ローラー支点とし、動的解析においては底面を固定支点、側面を水平ローラー支点とした。

従来型 Newmark 法に使用する地震動は、サイト特性置換手法<sup>11)</sup>により推定した 2011 年東北地方太平洋沖地震による被災地点の法尻相当での推定地震動<sup>12)</sup>を用いる。地震波形を図-6 に示す。また、改良 O 型 Newmark 法では、図-6 の波形を基盤 (深度 10m) 相当に引き戻した地震波

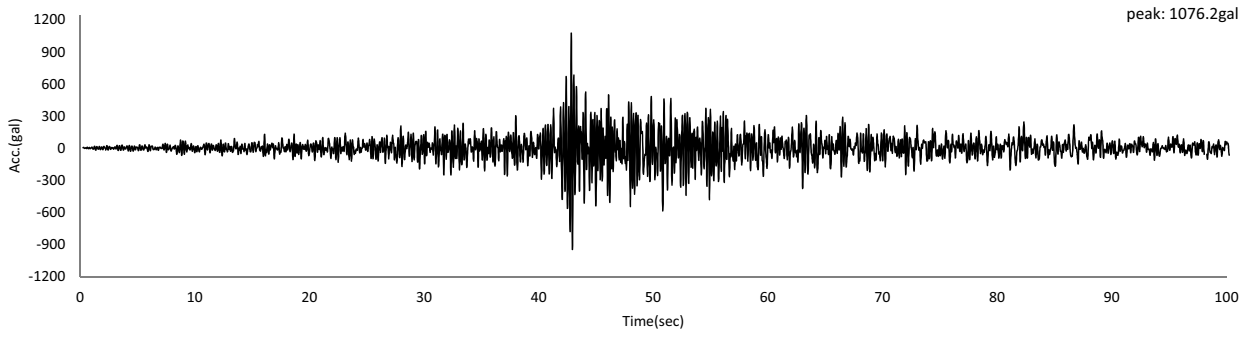


図-6 法尻相当の地震波形<sup>12)</sup>

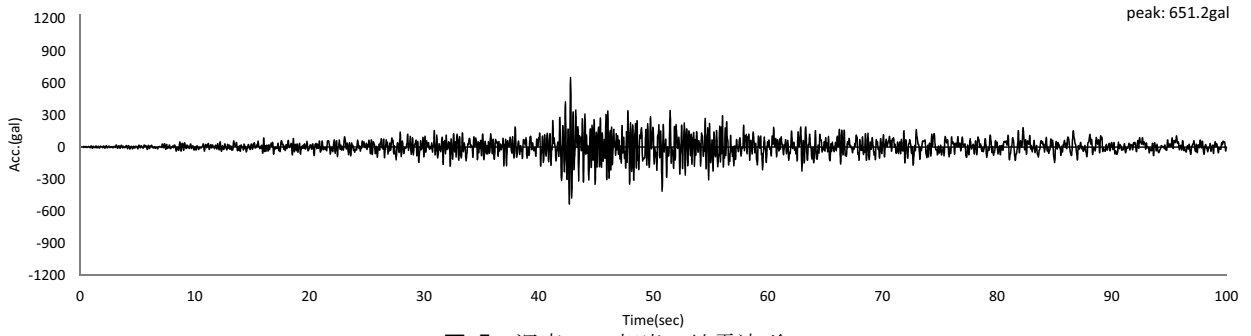


図-7 深度 10m 相当の地震波形

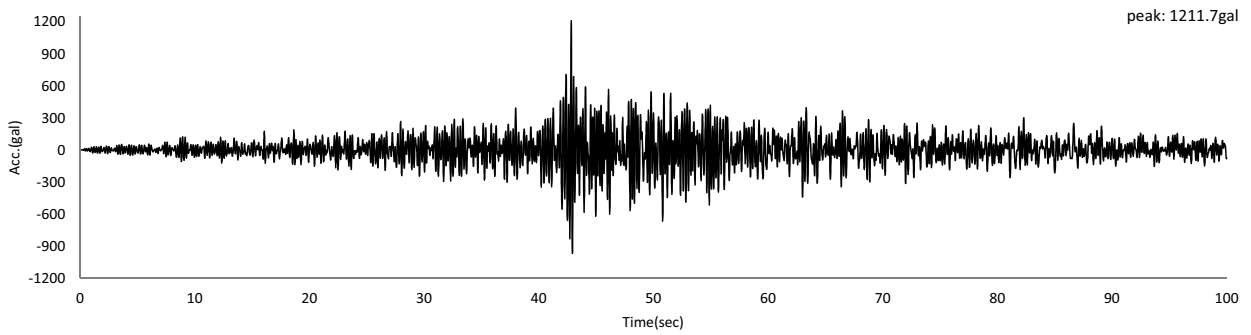


図-8 既往モデルにおけるすべり土塊重心の地震波形

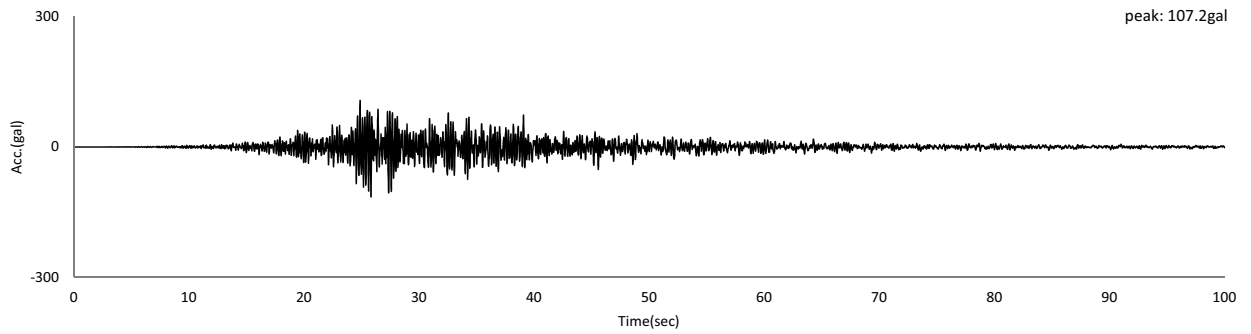


図-9 深度 10m 相当の前震波形

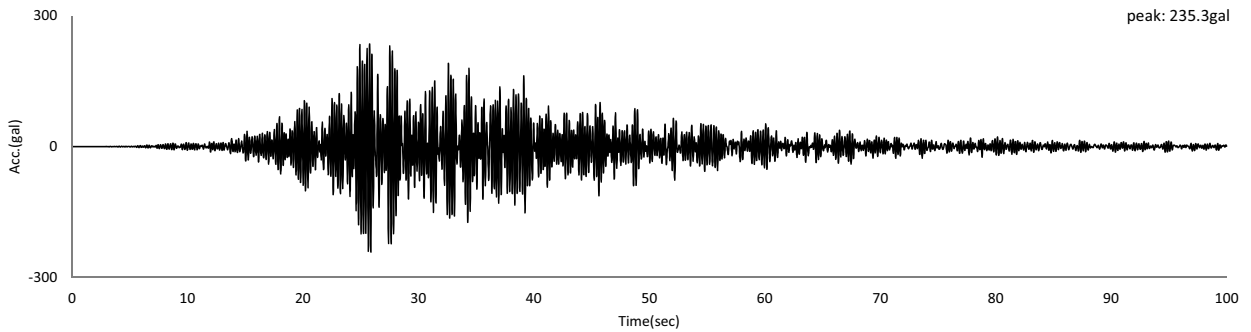


図-10 既往モデルにおけるすべり土塊重心の前震波形

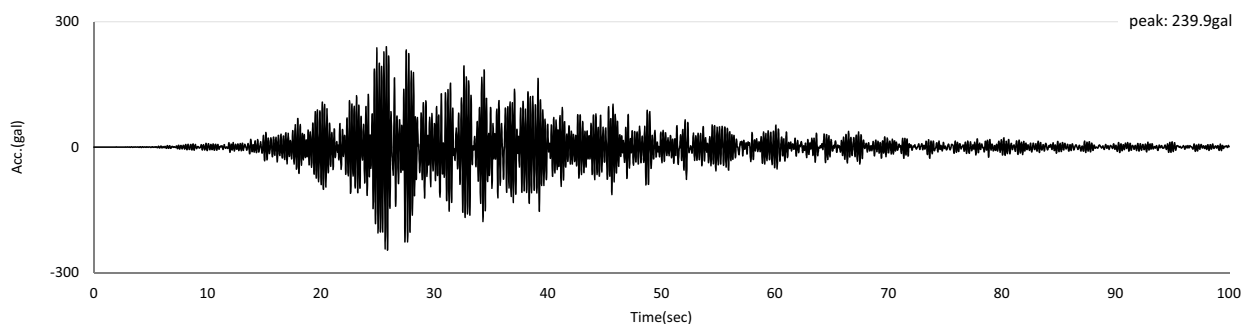


図-11 修正モデルにおけるすべり土塊重心の前震波形

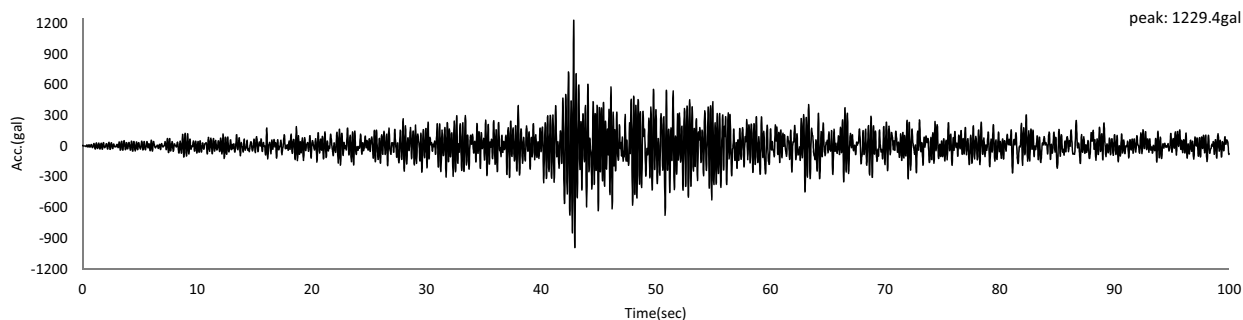


図-12 修正モデルにおけるすべり土塊重心の地震波形

形を計算し、これを動的 FEM 解析における入力地震動として算出したすべり土塊重心における応答加速度波形を使用した。基盤相当での地震波形を図-7 に、すべり土塊重心の応答加速度の波形を図-8 にそれぞれ示す。

残留変形量の算定結果を表-3 に示す。従来型 Newmark 法、改良 O 型 Newmark 法ともに実被害と比較すると残留変形量を過大に評価する結果となった。原因としてモデルの土質定数が小さく、常時の安全率を過小評価していたこと等が考えられる。また、今回対象とした常磐自動車道盛土は、2011 年東北地方太平洋沖地震（以下、本震と呼ぶ）より以前の比較的大規模な地震であるマグニチュード 7.0 の 2008 年 5 月 8 日に発生した茨城県沖を震源とする地震（以下、前震と呼ぶ）による地震動の影響を受けているが、対象盛土で前震による被害・崩壊は確認されていない。この前震を利用した対象盛土の残留変形量の評価を行う。前震は、本震と同様にサイト特性置換手法<sup>11)</sup>により推定した被災地点近傍の深度 10m 相当の波形を使用した。深度 10m 相当の地震波形を図-9 に、動的 FEM 解析によるすべり土塊重心の応答加速度の波形を図-10 にそれぞれ示す。改良 O 型 Newmark 法による解析結果は残留変形量が 0.29m となった。

ここで、

- (1) 本震による残留変形量の解析値が過大
- (2) 前震による残留変形量は実際には生じていなかったものの、現状の解析では残留変形量 (0.29m) が発生という上記 2 つの問題点を踏まえた上で、既往モデル<sup>6)</sup>の土質定数 (表-1 参照) の見直しを行った。

表-3 既往モデル<sup>6)</sup>における残留変形量の解析結果

	残留変形量(m)
実被害	1.60
従来型Newmark法	3.06
改良O型Newmark法	4.45

表-4 修正モデルの土質定数

層番号	飽和重量(kN/m <sup>3</sup> )	湿潤重量(kN/m <sup>3</sup> )	内部摩擦角(deg)	粘着力(kPa)
1	20	20	40.00	0.00
2	20	16	25.00	20.00
3	20	16	15.00	17.00
4	20	16	15.00	17.00
5	20	14	25.00	5.00
6	20	19	25.00	8.00
7	20	20	40.00	0.00
8	20	20	35.00	0.00
9	20	20	30.00	0.00

## 6. 残留変形量による被災盛土の再現

破壊形態が斜面先破壊となり、かつ前震での残留変形量が発生しないモデルを再考する。土質定数は設計要領第一集土工編<sup>9)</sup>に基づき、軟弱地盤上で斜面先破壊となりつつ盛土の強度が上昇するよう、試行錯誤により粘着力及び内部摩擦角を決定した。変更した土質定数を表-4 (網がけ部分が変更箇所) に示す。また、動的 FEM 解析に用いる土質パラメータは表-2 に示す粘着力及び内部摩擦角を表-4 の網がけ部分と同様に変更した。

修正した土質定数を用いて円弧すべり法による解析を実施した結果、破壊形態は斜面先破壊となり常時の安全率は 1.252 と上昇した。変更したモデルを修正モデルとして改良 O 型 Newmark 法による前震における残留変形量の解析を行った。入力地震動は、図-9 の基礎地盤深度 10m 相当の地震波形から動的 FEM 解析により算出したすべり土

表-5 修正モデルにおける残留変形量の解析結果

	残留変形量(m)
実被害	1.60
従来型Newmark法	0.90
改良O型Newmark法	1.48

塊重心における応答加速度波形とした。応答加速度の波形を図-11に示す。解析結果は、残留変形量が0.003mと限りなくゼロに近い値となった。この結果から対象盛土において前震時に、実際にはすべりが発生しなかったことを矛盾なく定性的に再現することができた。

ここで、修正モデルを用いて、本震における残留変形量に着目した従来型 Newmark 法および改良 O 型 Newmark 法による解析を行った。従来型 Newmark 法に入力する地震動は図-6を用い、改良 O 型 Newmark 法に入力する地震動は、動的 FEM 解析により算出したすべり土塊重心の応答加速度波形を用いた。すべり土塊重心の加速度波形を図-12に示す。また得られた残留変形量を表-5に示す。表-5に示すとおり、前震による無被災実績を考慮した盛土モデルとしたことで、改良 O 型 Newmark 法による残留変形量は、本震による実被害と非常に近い値を示す結果となったため、対象盛土のすべり変形の規模を一定の精度で再現できたと言える。一方、従来型 Newmark 法は、改良 O 型 Newmark 法および実被害による結果と比較すると残留変形量を過小に評価していることから、盛土内加速度増幅特性の重要性が示唆される。

## 7. まとめ

2011年東北地方太平洋沖地震により被災した高速道路盛土の特徴的被害の再現のために、残留変形量の観点から、改良 O 型 Newmark 法の適用に際してのモデル化の方法を検証し、以下に示す知見が得られた。

- (1) 破壊形態が斜面先破壊であることに加えて、当該盛土が2008年茨城県沖を震源とする地震(M7.0)において残留変形量が発生しなかったことを考慮することにより、盛土モデルの修正を行った。その結果、修正モデルにおける2011年東北地方太平洋沖地震の残留変形量は実被害と近い値となり、適用性が確認できた。
- (2) 上記(1)によれば、盛土モデルにおける土質定数の設定方法の重要性が示唆されるが、既往の経験地震による変状の有無による盛土モデルの検証が有効である。
- (3) 盛土および基礎地盤のモデル化を適切に実施することにより、盛土内における加速度増幅特性を考慮可能な改良 O 型 Newmark 法は、従来の Newmark 法と比較すると、より精度良く残留変形量を評価

できることが確認できた。

今後の展望として、盛土の現地調査・試験、変状形態、既往地震による被害発生の有無等、あらゆる情報を駆使することでモデルの最適化を行い、より多くの実盛土において改良 O 型 Newmark 法の適用性を検証する予定である。

## 参考文献

- 1) Newmark, N. M. : Effects of earthquakes on dams and embankment, *Geotechnique*, Vol. 15, No. 2, pp. 139-160, 1965.
- 2) 館山勝, 龍岡文夫, 古関潤一, 堀井克己: 盛土の耐震設計法に関する研究, 鉄道総研報告, Vol. 12, No. 4, pp. 7-12, 1998.
- 3) 土木学会地震工学委員会: 高地震力に対する土構造物の耐震設計法に関する研究報告, pp. 184-225, 2000.
- 4) 常田賢一, 小田和広: 道路盛土の耐震性評価の方向性に関する考察, 土木学会論文集 C, Vol. 65, No. 4, pp. 857-873, 2009.
- 5) 安部哲生, 横田聖哉, 日下寛彦, 金田和男: 東北地方太平洋沖地震における高速道路盛土の地震被害について—常磐自動車道 那珂地区—, 第 47 回地盤工学研究発表会, pp. 959-960, 2012.
- 6) 村上考輝, 常田賢一, 橋愛乃: 2011年東北地方太平洋沖地震により斜面先破壊した道路盛土の震度法による再現検討, 第 31 回土木学会地震工学研究発表会講演論文集, No.1-014, 7p., 2011.
- 7) (株)NEXCO 東日本 HP: 東北地方太平洋沖地震による高速道路の被害状況について, [http://www.e-nexco.co.jp/pressroom/data\\_room/regular\\_mtg/h23/0324/pdfs/01.pdf](http://www.e-nexco.co.jp/pressroom/data_room/regular_mtg/h23/0324/pdfs/01.pdf), 2011. (最終閲覧日: 2013年10月9日)
- 8) (株)高速道路総合技術研究所 高速道路総合技術研究所 道路研究部 土工研究室: 東北地方太平洋沖地震('11.3.11発生), [http://www.jiban.or.jp/file/file/saigai\\_yokota.pdf](http://www.jiban.or.jp/file/file/saigai_yokota.pdf), 2011. (最終閲覧日: 2013年10月9日)
- 9) 東日本高速道路株式会社, 中日本高速道路株式会社, 西日本高速道路株式会社: 設計要領第一集土工編, 第1章総説, pp. 43-44, 2012.
- 10) 安田進, 山口勇: 種々の不攪乱土における動的変形特性, 第 20 回土質工学研究発表会, pp. 539-542, 1985.
- 11) Hata, Y., Nozu, A., and Ichii, K. : A practical method to estimate strong ground motions after an earthquake, based on site amplification and phase characteristics, *Bulletin of the Seismological Society of America (BSSA)*, Vol. 101, No. 2, pp. 688-700, 2011.
- 12) 秦吉弥, 一井康二, 常田賢一, 野津厚, 横田聖哉, 金田和男: サイト特性置換手法に基づく2011年東北地方太平洋沖地震とその最大余震における盛土被災地点での地震動の推定, 土木学会論文集 A1 (地震工学論文集 31-b), Vol. 68, No. 4, pp. I-315-I-330, 2012.

(2013年6月24日 受付)