傾斜地盤上の既設高盛土の表層置換・押え盛土工の耐震性に関する数値解析的検討

Numerical study on seismic resistance of surface replacement/counterweight fill for existing high embankment on inclined ground

酒井崇之¹, 中野正樹², 稲垣太浩³

- 1 名古屋大学・大学院工学研究科・t-sakai@civil.nagoya-u.ac.jp
- 2 名古屋大学・大学院工学研究科
- 3 中日本高速道路株式会社

概 要

日本の高速道路に多く造成された傾斜地盤上の高盛土は、盛土材料によっては脆弱化が進行し、地震時 の安定性の低下が懸念されている.本稿は、そのような高盛土の地震時安定性向上のため、盛土表層を掘 削し、良質の材料で押える「置換・押え盛土工」を提案し、その耐震性について数値解析的に検討した. その結果、置換・押え盛土工を実施すると、性質の異なる2つの盛土いずれも耐震性が向上した.また、 押え盛土の高さを大きくするほど、押え盛土による補強効果が広い範囲で得られるため、右のり肩の変位 が半分以下まで抑制された.しかし、押え盛土の密度が低いとその効果が低下する.国土交通省は、高速 道路の安全安心基本計画を策定し、防災機能を強化した道路空間として計画的な4車線化の推進を目指し ている.4車線化する際に、拡幅工事の必要がある現場では、本報告で示した置換・押え盛土工法を適用 することで、車線増加と耐震補強を同時に実施することができ、別々に施工するよりも時間的・経済的に 合理的な施工が可能となる.

キーワード:盛土,地震応答解析,押え盛土,耐震補強

1. はじめに

近年,能登半島地震,駿河湾沖を震源とする地震,東北 地方太平洋沖地震などで盛土崩壊が起こっており,盛土の 耐震対策は喫緊の課題となっている.既設盛土の場合,耐 震性向上のための手段は限られており,鉄筋を用いた棒状 補強が一般に提案されている.しかし,傾斜地盤上の盛土 の場合,集水地形となり,盛土内の地下水位が高いことが 多い.地下水位の増減などにより盛土材料が脆弱化したり, 地震によって水圧が発生したりすると期待通りの補強効 果が得られない恐れがある.また,鉄筋の劣化が起きるた め,長期耐久性にも問題がある.

そこで、棒状補強に代わる耐震性向上の工法として、「置換・押え盛土工」を提案する.本工法は、脆弱となった既設盛土の一部をのり面表層から取り除き、良質な土で置換、そしてその土に押え盛土の機能も持たせるのである.良質土を用いることで棒状補強と比べてメインテナンスフリーな補強工法になると考えられる.

本研究では、置換・押え盛土工が、傾斜地盤上の既設高 盛土の耐震性を高めるか否かについて、特に、押え盛土の 密度・形状に注目して、数値解析により評価する. なお、 解析には、土骨格の構成式として SYS Cam-clay model¹⁾を 搭載した水~土連成動的/静的有限変形解析プログラム GEOASIA²⁾を用いた.



2. 解析条件

図1は本解析で解析対象とした盛土を示す. 天端幅25m, 高さ28m,のり面勾配1:1.8の盛土であり,片側1車線の 道路盛土を想定した. 傾斜地盤は,1:4の勾配で,段切処 理が行われており,段切の高さは1m,幅は4mである.

表1 は本研究で用いる盛土と傾斜地盤の材料定数を示 す.盛土材として2種類を選定している.盛土材A は著 者らが能登半島地震で崩壊した盛土から採取した火山灰 質粘性土である.盛土材Bは,砂質土似た特性を持つ材料 であり,堤防盛土で使用されている.

盛土材 A は各種室内力学試験と構成式応答による力学

試験結果の再現から、これらの材料定数と初期値を得ている.この材料定数を用いて、能登半島地震における地震後に遅れて崩壊する現象やその崩壊形状を再現している³⁾. 盛土材 B に対しても力学試験を実施し、構成式応答による力学試験結果の再現より材料定数を得ている⁴⁾.また、押え盛土材は、締固めやすい良質な盛土材とした⁵⁾.押え盛土材の密度は、2 種類とし、それぞれ、締固め試験(B-c法)で得られた最大乾燥密度の 90,95%の密度である. 傾斜地 盤については、密で透水性の低い地盤と仮定した.

材料名		盛土 A	盛土 B	押え	押え			
				盛土	盛土			
				90%	95%			
弾塑性パラメータ								
圧縮指数	ĩ	0.098	0.110	0.040	0.040			
膨潤指数	ñ	0.030	0.020	0.002	0.002			
限界状態定数	М	1.400	1.35	1.75	1.75			
NCL の切片	Ν	2.090	1.765	1.440	1.440			
ポアソン比	v	0.300	0.300	0.200	0.200			
発展則パラメータ								
正規圧密土化指数	т	1.700	0.500	5.000	5.000			
構造劣化指数		0.200	1 700	10.00	10.00			
(b=c=1)	а	0.300	1.700	10.00	10.00			
塑性指数	C_S	0.100	1.000	1.000	1.000			
回転硬化指数	b_r	0.300	0.100	0.001	0.001			
回転硬化限界定数	m_b	0.500	0.400	0.500	0.500			
物性								
透水係数(cm/sec)	k	1.0×10 ⁻⁴	1.0×10 ⁻⁴	1.0×10 ⁻⁴	1.0×10 ⁻⁴			
土粒子密度(g/cm ³)	$ ho_{ m s}$	2.727	2.650	2.697	2.697			
初期値								
比体積	\mathbf{v}_0	2.300	1.700	1.428	1.350			
構造の程度	$1/R_{0}^{*}$	7.50	1.30	1.100	1.100			
異方性	ζ_0	0.000	0.000	0.000	0.000			
応力比	η_0	0.000	0.000	0.000	0.000			
	-							

表1 材料定数と初期値

図-2 は解析全断面を示す. 平面ひずみ条件を仮定し, 幅 3000m の地盤で側方の影響が無いように十分広く解析 領域を設定した.水理境界は両端と下端を非排水条件とし, 地表面を排水条件とし,地表面と水位が常に一定であると 仮定した.すなわち,盛土,地盤はともに常に飽和状態で ある.地震時には,側方要素の反射を考慮し,側方要素単 純せん断境界のを地盤の両端に設定し,また,地震波の全 反射を防ぐために,地盤の下端の水平方向に粘性境界 (Vs=700m/s)を設けた⁷.

まず傾斜地盤の作製を行い,次に盛土を築造した.盛土 築造は,図3に示すように水〜土二相系弾塑性体として高 さ約0.5mの有限要素を追加することによって表現された ⁸⁾.この際,施工速度は0.5m/dayと仮定した.盛土築造に より発生した水圧が十分消散するまで,圧密を行った後, 図4に示す地震動を工学的基盤面にあたる地盤底面全節 点の水平方向に加速度を等しく入力した.なお,入力地震動は兵庫県南部地震において神戸海洋気象台で観測された地震動の EW 成分である⁹.また,地震後の挙動も検討するため,地震入力後に水圧が消散し,定常状態になるまで(今回は 20 年経過まで),計算を実施した.



置換・押え盛土工の施工手順を、図5に示す.図5(a)に 示す対策前の盛土の風化の進みやすいのり面表面を掘削 する(b). その後,押え盛土を築造していく(c).(b)につ



図-2 解析全断面

いては、図6に示すように有限要素メッシュを取り除くこ とで再現した.この際、図5(a)の赤線で囲った部分を3.5m ごとに取り除いた.(c)については、先に示した盛土築造と 同じで、水~土二相系弾塑性体として高さ約0.5mの有限 要素を追加することによって表現した.押え盛土は図5(c) の赤線で囲った部分である.図5で示した対策を本稿では 押え盛土高21m と呼ぶ.なお、実際に施工する際に用地 買収の必要がないように、押え盛土ののり尻の位置は、元 の盛土ののり尻の位置と同じにした.

図7に置換・押え盛土工で検討したケースを示す.基本 ケースに加えて,盛土高さが7m高いケース(押え盛土高 28m),7m低いケース(押え盛土高 14m)について検討を行 い,押え盛土の大きさによって,耐震性がどの程度変化す るのか確認する.





図7 検討した置換・押え盛土工のケース

3. 置換・押え盛土工の効果の検討

図8,9に盛土A,Bの地震発生20年後(地震後に十分時間が経過し,定常状態になった時)におけるせん断ひずみを示す.また,表2,3に盛土A,Bの盛土の右のり肩の沈下量・水平変位を示す.ここでは,3.1で無補強のケースと,基本ケースの比較を行い,3.2で,押え盛土の形状について着目し,3.3で押え盛土の密度に着目し,考察を行う.



図8 地震発生20年後におけるせん断ひずみ分布(盛土A)





図 9 (f) 押え盛土高 14m 押え盛土 90%



図9 地震発生20年後におけるせん断ひずみ分布(盛土B)

表2 盛土Aの右のり肩の沈下量

	相之成上		沈下量		側方変位	
	盛土 A	の密度	地震 直後	20 年後	地震 直後	20 年後
(a)	無補強	—	0.9	1.3	1.3	1.8
(b)	押え盛土	90%	0.7	1.1	1.0	1.5
(c)	高さ 21m	95%	0.6	1.0	0.9	1.4
(d)	押え盛土	90%	0.7	1.0	1.1	1.5
(e)	高さ 28m	95%	0.5	0.9	0.7	0.8
(f)	押え盛土	90%	0.8	1.2	1.1	1.6
(g)	高さ 14m	95%	0.8	1.2	1.1	1.6

表3 盛土Bの右のり肩の沈下量

		相之成上	沈下量		側方変位	
	盛土 B	の密度	地震 直後	20 年後	地震 直後	20 年後
(a)	無補強	—	1.3	1.7	1.9	2.5
(b)	押え盛土	90%	1.1	1.5	1.6	2.1
(c)	高さ 21m	95%	1.0	1.5	1.5	2.0
(d)	押え盛土	90%	1.1	1.5	1.7	2.2
(e)	高さ 28m	95%	0.8	1.3	0.9	1.1
(f)	押え盛土	90%	1.3	1.7	1.8	2.4
(g)	高さ 14m	95%	1.3	1.7	1.8	2.4

3.1 置換・押え盛土工の盛土変形抑制の効果

図8,9(a)を見ると、補強の場合、盛土と地盤の境目に 30%以上(赤い部分)のせん断ひずみが発生している.押え 盛土工・置換工では、盛土と地盤の境目のひずみが、発生 しているものの、多くのケースで、せん断ひずみが 30%以 上発生している部分(赤い部分)が狭くなっており、盛土全 体の変形も小さくなった.また、右のり肩の変位や沈下量 については、10~40%程度軽減されている.なお、地震直 後から20年後にかけて、補強の有無に依らず同程度沈下 と側方変位が発生した.これは、地震中に発生した水圧が 消散したため発生しており、地震後10日ほどで収束した. また、盛土材料に依らず、地震時の変形が小さくなった.

3.2 押え盛土の形状が盛土耐震性に及ぼす影響

本節では、ケース(c)、(e)、(g)について比較を行う.押え 盛土高 28m (ケース(e))については、右のり肩の変位・沈下 量がおよそ 40%程度軽減されており、非常に効果が高かっ た.一方、押え盛土高さ 14m (ケース(g))については、1割 程度しか軽減できていない、押え盛土高さ 21m (ケース(c)) では、30%程度軽減された.以上のことから、押え盛土の 高さが高いほど、ひずみが軽減され、右のり肩の沈下量・ 変位についても軽減された.ただし、押え盛土の高さと変 位の低減量は比例するわけではない.

3.3 押え盛土の密度が盛土耐震性に及ぼす影響

押え盛土の密度が小さいケース(ケース(b), (d), (f))については、盛土と地盤の境目のひずみが軽減されておらず、 右のり肩の変位量と沈下量は 1 割程度しか軽減されていない.また、押え盛土の高さによらず、右のり肩の変位量 と沈下量がほとんど同じになった.押え盛土の密度が大きい場合は、3.2節で示した通り、押え盛土の高さを大きく することで,盛土の変形量は小さくなったが,押え盛土の 密度が小さいと,その効果が得られない.

3.4 耐震性向上のメカニズム

本節では、無補強、押え盛土高さ 21m、押え盛土高さ 28m の押え盛土の密度が最大乾燥密度の 95%のケースに ついて比較を行う.まず、盛土全体の分布を比較して、そ の後、代表要素をピックアップして比較を行う.なお、盛 土材に依らず同様の効果が得られているため、盛土材 B のみ結果を示す.

図 10 に地震直前における応力比(=q/p)分布を示す.押 え盛土を実施することで,青い部分が広くなっていること から,応力比が低下していることがわかる.著者ら³⁾は, 水平地盤上に建造された盛土が地震により崩壊せず,傾斜 地盤上に建造された盛土が崩壊した理由として,地震直前 における応力比の高さに着目している.押え盛土を実施す ることで,応力比が低下することが,安定性の向上につな がった.なお,押え盛土高 28m が青い部分が最も広くな っているため,押え盛土高 28m が最も耐震性が高くなっ

無補強地震直後

たと考えられる.

図 11 に地震直前・地震直後における平均有効応力分布 を示す. 地震直前に着目すると、押え盛土を施すことで図 9の黒〇で囲った部分の平均有効応力が上昇している.後 ほど示すが, 平均有効応力が上昇することで, 比体積が減 少した.つまり,密度が大きくなった.地震後の分布に着 目すると、盛土全体の平均有効応力が減少している.特に 地盤と盛土の境目や盛土の右側については、顕著である. また,押え盛土を施した方が,大きく減少していることが わかる.これは、押え盛土を施した方が、より塑性圧縮挙 動を示していることになる. SYS Cam-clay model において は、異方性を考慮しなければ、q=Mp'よりも上側で塑性膨 張(正のダイレイタンシー),下側で塑性圧縮挙動(負の ダイレイタンシー)を示す. つまり, 押え盛土により応力 比が低下することで, 地震中にも限界状態の下側に応力状 態を取ることが多くなり、より塑性圧縮挙動が顕著になっ たと考えられる.

ただし, 地震中に平均有効応力が降下する方が, 地盤自体の剛性が低下するために, 地震により変形が大きくなる

押え盛土高28m地震直後



押え盛土高21m地震直後

 1
 6
 11
 16
 21
 26

 図 12
 地震直前・地震直後における過圧密比分布

が、本研究では平均有効応力がより低下している押え盛土 高 21,28m の方が、変形が小さい.この理由について説 明する.図12の過圧密比の分布に着目すると、押え盛土 高 21,28m の方が、地震直後における過圧密比が大きい. 過圧密比が大きくなっている要素については、除荷が顕著 になっている.また、過圧密比が大きいほど弾性的な挙動 が顕著になるため、変形しづらくなる.以上のことから、 置換・押え盛土工の方が、地震による変形が小さくなった と考えられる.

次に代表要素を取り上げ、より詳細に挙動を確認する. 図 13 に着目する要素を示す.要素1 は地盤と盛土の境目 であり、無補強では、ひずみが大きく、対策することで、 ひずみが軽減された要素である.要素2は、無補強や押え 盛土高21mにおいてひずみが出ており、押え盛土高さ28m のケースでは、ひずみが抑制されている要素である.



図 14~16 に要素 1 の力学挙動を示す.(a)は応力-ひず み関係,(b)は軸差応力と平均有効応力の関係(有効応力パ ス),(c)は間隙水圧とひずみの関係,(d)は比体積と平均有 効応力の関係,(e)は構造 *R**とひずみの関係,(f)は過圧密 *R*とひずみの関係を示す.構造 *R**は構造の程度の逆数, 過圧密 *R*は過圧密比の逆数であり,0に近いほど構造が高 位であり,過圧密比が大きい.まず,(b)や(d)を見ると, 地震直前の状態において,図14の無補強よりも,図15, 16 の押え盛土を行った方が,平均有効応力が10kPa 程度 大きくなった.また,平均有効応力の増加により,土の密 度が増大した.

地震直前について,無補強では,限界状態線よりも上側 に状態を取っているが,押え盛土を行うことで,限界状態 線の下側に応力状態を取るようになる(図中(b)).つま り,押え盛土を行うことで,盛土が受けるせん断力が小さ くなる.

地震中では、無補強の場合、応力比(=q/p)が高いために 塑性膨張挙動が塑性圧縮よりも顕著であり、地震直前より も地震直後の方が、平均有効応力がわずかに大きくなる (図中(b)).間隙水圧についても、わずかに大きくなっ た(図中(c)).過圧密Rは増減しており、地震終了時に は、地震開始時とほぼ同じ値である(図中(f)).一方、 置換・押え盛土工を施した方は、応力比(=q/p)が低いため に塑性膨張挙動よりも塑性圧縮挙動が顕著であり、地震直 前よりも地震直後の方が、軸差応力、平均有効応力が小さ くなる(図中(b)).過圧密Rが減少した(図中(f)).つ まり、地震開始時より過圧密比が大きくなった.このこと から、押え盛土を実施することで、地震中の除荷が顕著に なった.また、過圧密比が増大するにつれて、弾性的な挙 動が顕著になるので、より変形しづらくなる.

地震後において,無補強では,平均有効応力は微増して いるが,比体積がほとんど変化していない.一方,押え盛 土を行うと,地震後に正の過剰間隙水圧にの消散に伴い, 平均有効応力が回復し,それに伴い比体積が減少した.つ まり地震後により密になり安定化した.

押え盛土により盛土内の平均有効応力が上昇し、密度が 上昇したこと、地震中に発生する軸差応力が低下すること が、地震中にせん断ひずみが進展しない理由である.

図 17~19 に要素 2 の力学挙動を示す.(a)~(f)は図 17~ 19 と同じである.押え盛土高 28m に着目すると,補強メ カニズムは要素 1 と同じである.ただし,押え盛土高 21m ついては,押え盛土による地震直前における平均有効応力 の増加や軸差応力の減少や地震中の過圧密比の増加(除荷 挙動)といった補強の効果が押え盛土高 28m の時よりも 得られていない.これは,着目要素 2 の位置が,押え盛土 よりも上にあるためである.このため,押え盛土の高さが 高ければ高いほど,補強の効果が得られる範囲が広くなる ために,押え盛土が高い方が,耐震性が向上する.



図 14 着目要素 1 の力学挙動(無補強)







図 19 着目要素 2 の力学挙動(押え盛土高さ 28m)

4. まとめ

本研究では,既設高盛土の耐震対策工として,置換・押 え盛土工を提案し,地震応答解析を実施した.また,置換・ 押え盛土工の耐震性向上のメカニズムを,解析結果を詳細 に調べることで明らかにした.以下に得られた結論を示す.

- 無補強と比較して、置換・押え盛土工では、せん断ひ ずみが軽減された.また、法肩の変位も軽減された. また、砂質土、粘性土のどちらの盛土材に対しても効 果が見られた.
- 押え盛土の施工範囲が大きい方が、耐震性が向上して おり、押え盛土高 28m の場合、法肩の変位が 50%程 度まで軽減した.
- 7) 押え盛土の密度が低いと、押え盛土を高くしても変位が軽減できないため、押え盛土の密度を向上させることは重要である。
- 4) 地震直前までについては、押え盛土を施工することに より、盛土内の平均有効応力が上昇し、密度が上昇し た.また、応力比が低下したことから盛土内に作用す るせん断力が低下した。
- 5) 地震中には、押え盛土を施工したケースについては、 塑性圧縮挙動を示し、正の過剰間隙水圧が発生する. しかし、地震中に過圧密比が蓄積し、除荷が見られた. また、過圧密比が大きくなることで、弾性的な挙動が 顕著になることや、発生する軸差応力が低下すること が、押え盛土により地震中にせん断ひずみが進展しな

い理由である.

6) 地震後については、押え盛土を施した場合、地震中に 減少した平均有効応力が回復するに伴い、圧密するこ とで、安定化した。

国土交通省(2020)は、高速道路の安全安心基本計画を 策定¹⁰し、防災機能を強化した道路空間として計画的な4 車線化の推進を目指している.防災機能を強化するには、 現在、一般的に補強工法と用いられるものの、劣化が懸念 され、更新の恐れがある鉄筋挿入工より、本報で示した強 靭な押え盛土工のような維持管理や更新をあまり必要と しない工法の方が適していると考えている.また、車線を 増やす(4車線化や6車線化)際に、盛土の拡幅工事の必要 がある現場では、本報告で示した置換・押え盛土工法を適 用することで、車線増加と耐震補強を同時に実施すること ができ、別々に施工するよりも時間的・経済的に合理的な 施工が可能となる.

謝辞

本研究は、NEXCO関係会社高速道路防災対策等に関 する支援基金の助成を受けた.ここに示して謝意を表する.

参考文献

- Asaoka et al. (2000): Superloading yield surface concept for highly structured soil behavior, Soils and Foundations, No.40, Vol.2, pp.99-110.
- Noda et al. (2008): Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-slay model, Soils and Foundations, Vol.48, No. 6, pp. 771-790.
- 酒井崇之,中野正樹(2012):地震後に発生した傾斜地盤上盛 土の大崩壊に関する水〜土連成有限変形解析による再現,地 盤工学ジャーナル, vol.7, No.2, pp.421-433.
- Sakai, T. and Nakano, M.: Interpretation of the mechanical behavior of embankments having various compaction properties based on the soil skeleton structure, Soils and Foundations, Vol.55, No.2, pp.1069-1085, 2015.
- 5) 酒井崇之他(2014):ジオテキスタイル補強土を用いた盛土の 耐震メカニズムの数値解析による把握,地盤工学会特別シン ポジウムー東日本大震災を乗り越えて一論文集, pp189-197.
- 6) 吉見吉昭, 福武毅芳: 地盤液状化の物理と評価・対策技術, 技報堂出版, 2005.
- William, B., Joyner and Albert T. and F. CHEN. (1975): Calculation of nonlinear ground response in earthquakes, Bulletin of the Seismological Society of America. Vol.65, No.5, pp. 1315-1336.
- Noda,T., Takeuchi, H., Nakai, K. and Asaoka, A. (2009): Co-seismic and post seismic behavior of an alternately layered sand-clay ground and embankment system accompanied by soil disturbance, Soils and Foundations, Vol.49,No.5, pp.739-756.
- 9) 日本道路協会:https://www.road.or.jp/dl/tech.html.
- 10) 国土交通省:高速道路における安全安心基本計画の公表につ いて https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001307543.pdf