

ジオグリッドで補強した盛土斜面の安定性*

豊澤康男**, 玉手 聡**

Stability of Slope Reinforced with Geogrid*

by Yasuo TOYOSAWA** and Satoshi TAMATE**

Abstract; Reinforcement of slope with Geogrid is very effective in improving slope stability. There are many different kinds of reinforcement materials, among these materials, the Geogrid is becoming more popular. In the near future, the Geogrid for reinforcement will come into wider use, especially in construction works with steep slope. However the failure mechanism of a slope reinforced with Geogrid is not well known. The characteristic of the Geogrid used in this report shows that its strength and rigidity are nearly equal to iron, but its weight is much lighter than iron. (see Table 3)

The series of dynamic centrifuge model tests were conducted in a 50g (50 times gravity) field. The horizontal acceleration applied to the model was approximately 20g. Table 4 is the summary of the test conditions and results. The schematic test model are illustrated in Fig. 3. The model grounds used in those experiments were composed of Kanto-roam and Toyoura sand.

The purpose of the centrifuge experiments was to investigate the deflection behavior and dynamic characteristics of slopes reinforced with Geogrid. The responses of these reinforced slopes and un-reinforced slopes in earthquake simulations were also measured by accelerometers and displacement transducers. The displacement of soil and Geogrid were observed by X-ray photography. (see Fig. 4)

The centrifuge tests support the following results;

(1) Reinforcement with Geogrid improved the stability of slope. It was also effective in improving the stability even during an earthquake.

(2) Geogrid in the ground could have the effect of interlocking the soil and sands around it, then it sustained the strain of the soil small. So the modules of shear rigidity at reinforced area became higher than the other area.

(3) As a result of the earthquake simulation, un-reinforced slopes collapsed during shaking, with the response of acceleration increased at upper part of embankment slope. On the other hand, the reinforced slopes with Geogrid didn't collapse. As the consequence of these data, it is implied that Geogrid can reduce the decline of shear rigidity due to the increase of strain of soil by cyclic shear stress.

Keywords; Centrifuge, Model Test, Slope Stability, Reinforcement, Geogrid, Earthquake Simulation

*1991年11月14日 第36回土質工学シンポジウムにて一部発表

**土木建築研究部 Construction Safety Research Division

Table 1 Physical properties of soil
試料の物理特性

試 料	液性限界 (%)	塑性限界 (%)	塑性指数 (%)	比 重
関東ローム	85.5	59.5	26.0	2.73
調整 + 関東ローム	41.2	38.0	3.2	2.70

Table 2 Strength parameter of soil
強度定数

粘着力 C_u (kgf/cm ²)	せん断抵抗角 ϕ_u (度)
0.093	25.5

Table 3 Mechanical properties of Geogrid
ジオグリッドの諸言 (長さ方向)

材 質	剛 性	破断荷重	破断ひずみ
ガラス繊維 と樹脂の複 合材料	320 (kgf/本)	7.4 (kgf) (一本当たり)	2.3 (%)

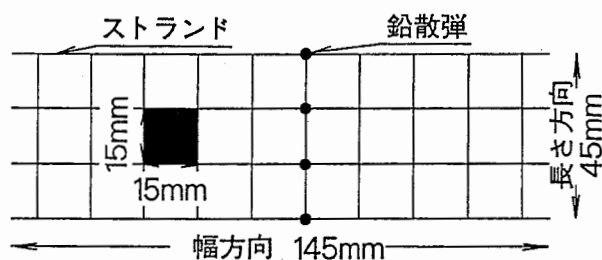
1. はじめに

土砂崩壊による労働災害では、斜面の崩壊によるものが多いことは、よく知られている。近年、崩壊を防止する工法のひとつとして、ジオグリッド等の補強材を地盤中に設置し、補強材と地盤の相互作用によって斜面等の安定化を図る工法が実用化されてきている。

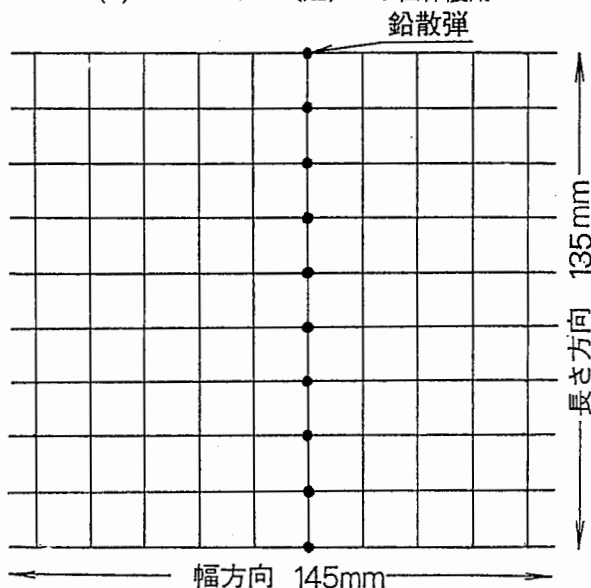
本研究で扱った補強材は、最近開発された FRP 系のジオグリッドであり、補強材のなかでも、軽量にもかかわらず、軟鋼と同程度の剛性、強度を有するものである。今後、こうした補強材による補強工法は、急勾配の盛土構築、重要構造物の建設等を始めとして斜面の安定化工法として広く普及していくものと推察される。

しかしながら、このような補強盛土斜面の安定性については研究が緒についたばかりであり¹⁾、十分に検討されていないのが現状である。特に地震時の挙動、安定性については未解明な事項が多い。

そこで本研究では、盛土斜面の角度、補強領域等



(a) ジオグリッド (短) のり面保護用



(b) ジオグリッド (長) 主補強用

Fig. 1 Model of Geogrid
ジオグリッド模型の形状

を変えた補強盛土模型について、遠心力载荷装置に加振装置を装備したシステムを用いて、数例の振動実験を行い、FRP 系のジオグリッドで補強した盛土斜面の振動による挙動等を実験的に解明することを試みた。

2. 遠心模型実験

2.1 試料およびジオグリッド

実験で用いた試料は、自然地盤から採取した関東ロームを細く碎き、炉乾燥し、2 mm のふるいを通したものに調整砂を重量比 1:1 の割合で混ぜた混合試料である。調整砂は、豊浦標準砂とこれを粉砕機で粉砕した砕砂を、それぞれ 3:1 の割合で混合したものであり、砕砂は、関東ロームと豊浦標準砂の粒度分布の不連続をなくすために加えたものである。

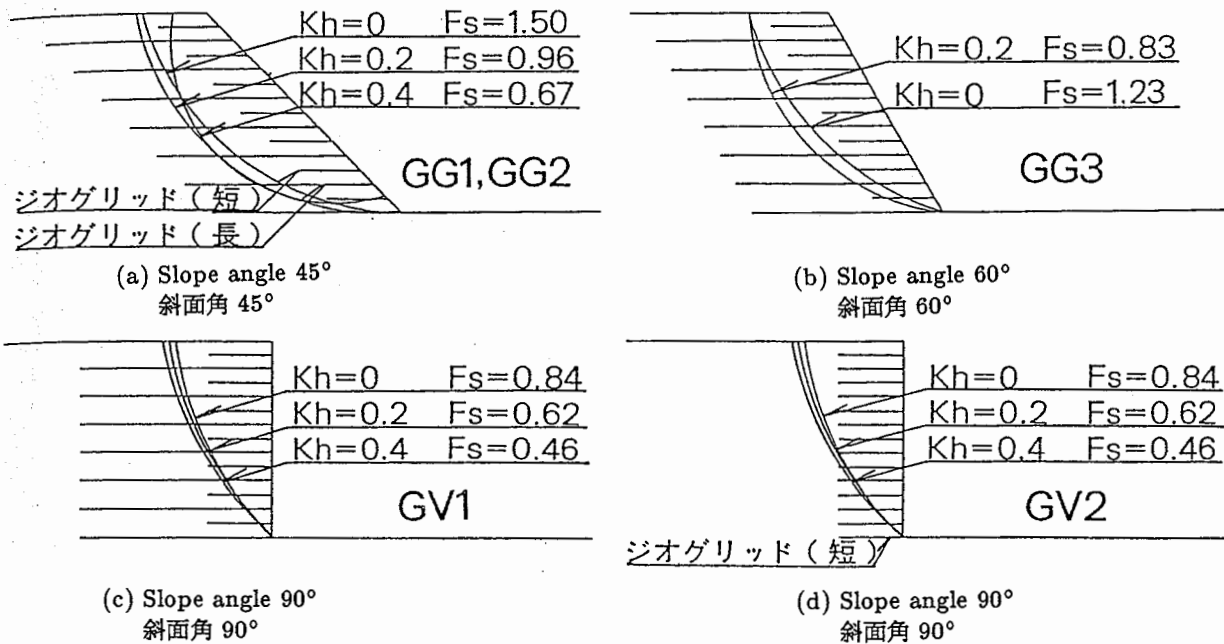


Fig. 2 Calculated failure lines and locations of Geogrid
すべり線とジオグリッドの配置

関東ロームの最大乾燥単位体積重量 $\gamma_d \max$ は、 0.811 gf/cm^3 であり、これに調整砂を加えた混合土の最大乾燥単位体積重量 $\gamma_d \max$ は、 1.318 gf/cm^3 である。

関東ロームと混合土の物理特性を Table 1 に示す。また、盛土模型作成後の試料の強度定数は、Table 2 に示すとおりである。

実験で用いたジオグリッドは、50g の遠心力場での模型実験用として、強度を実物の約 50 分の 1 となるように作成したものである。模型の作成上の制約等から、今回の実験では、本来の地盤補強用のジオグリッドと併せてのり面の保護を目的とした短いジオグリッド模型も使用した。ジオグリッドは、幅を 14.5 cm とし、主補強用として長さ 13.5 cm、のり面の保護用として長さ 4.5 cm のものを用いた。短いジオグリッドの形状寸法は Fig. 1(a) に、本来の地盤補強用のジオグリッドの形状寸法は、Fig. 1(b) に示す。また、材料の物性値は Table 3 に示す。

2.2 実験方法等

(1) 遠心模型実験システム

本研究で用いた遠心力载荷試験装置は、東京工業大学工学部土質研究室に設置されているもので、主

な仕様は、有効半径 1.23m、最大遠心加速度 150g、最大積載重量 250 kgf である。加振システムは、油圧式のもので、遠心力場地震波シミュレータ油圧サーボ制御盤、エレクトロ-ハイドロリックシェイカー、油圧パワーユニット、加振台から成る。詳細は、文献 2) 等を参照されたい。

(2) 模型の作成

前述した試料を含水比 32%前後に調整し、試料容器 (内寸 $150 \times 420 \times 300 \text{ mm}$) 内で 1 cm の厚さ毎に単位体積重量 $\gamma_t = 1.16 \text{ gf/cm}^3$ となるようベロフラムシリンダーを用い、圧縮した。この操作を全層厚が 20.8 cm になるまで繰返した。

この時、層毎にジオグリッドとともに所定の位置に変位測定用ターゲットとして鉛散弾を 1 cm 間隔で設置し、数ヶ所に加速度計を配置した。

ジオグリッドは、主補強用の 13.5 cm を 2 cm 間隔に 7 枚設置し、のり面の保護用として長さ 4.5 cm のものを主補強用のジオグリッド間に配置した。ただし、実験コード GV2 ではのり面保護用の短いジオグリッドのみを 14 枚設置してある。これらのジオグリッドと震度法で求めたすべり線との位置関係は Fig. 2 に示すとおりである。なお、ジオグリッドの格子の交点には、ジオグリッドの変位を測定するた

Table 4 Summary of test conditions and results
実験条件および実験結果

実験コード	試料	γ_t (tf/m ³)	含水比 (%)	盛土高	斜面角	補強の有無	入力加速度 (g)	崩壊の有無		
GG1a	関東 ローム + 豊浦砂	1.16	32.6	14 cm	45°		20.1* ¹	安 定		
GG1b							19.2* ¹			
GG2a		1.19	34.5				19.8			
GG2b							17.9			
GG3		1.19	34.5		60°	有	26.0			
GV1a		1.16	33.6		90°		11.2			
GV1b							21.9		法肩の崩壊	
GV2a			30.6			有 (短いグリ ッドのみ)	11.5	安 定		
GV2b						20.6	法肩の崩壊			
GV3		33.9				無* ²	無	無* ²	崩 壊	
AE2		1.16			28.0			45°		14.3
AE3		1.16			28.0					15.6

*¹ A3 (盛土下部) の加速度計の値を用いた。*² 遠心加速度 40g で崩壊した。

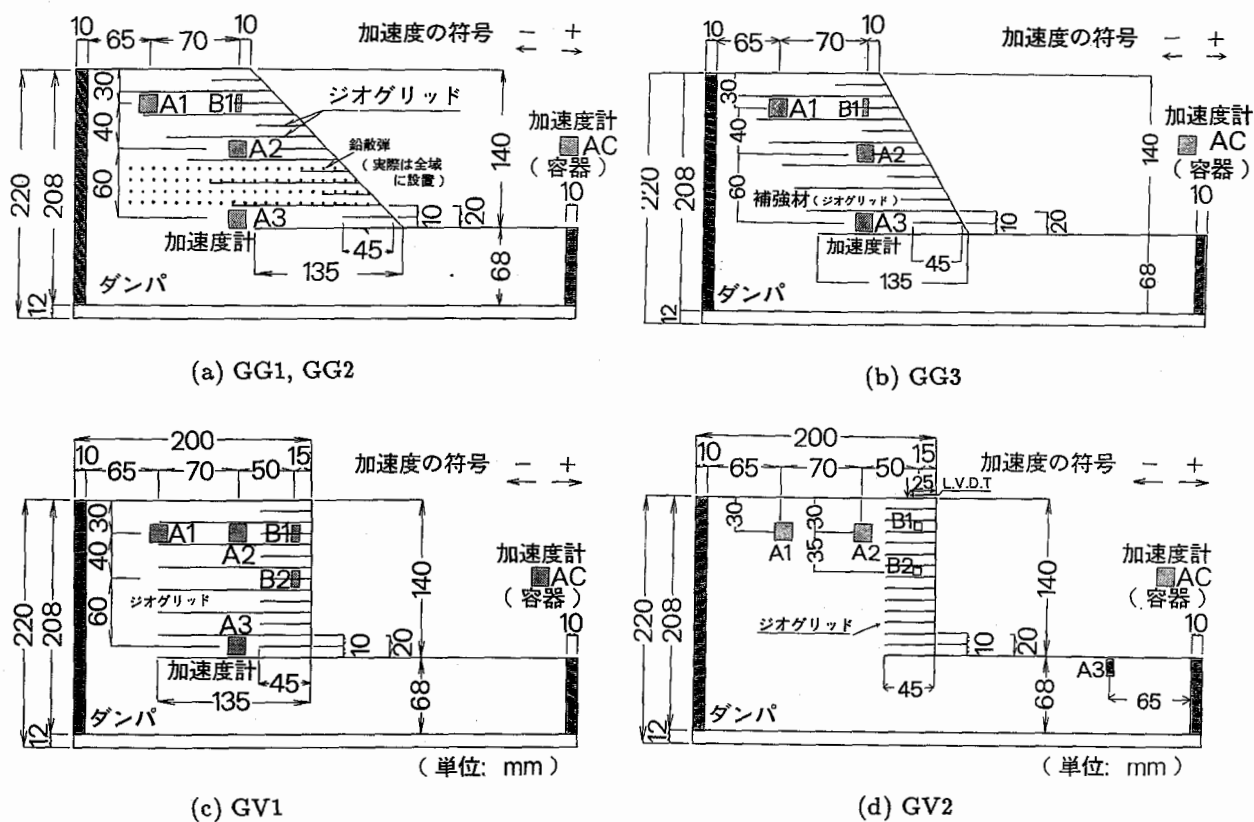


Fig. 3 Schematic arrangement of centrifuge strong box and locations of the instruments
模型盛土の形状及び加速度計等の位置

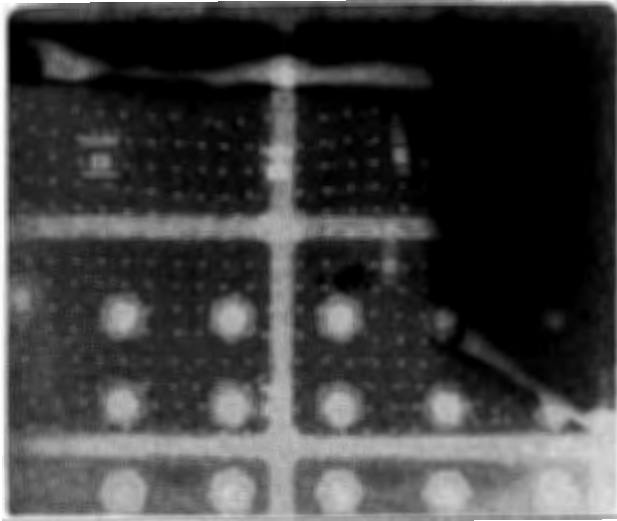


Photo 1 X-ray photo of the test GV1
X線写真

めに、鉛散弾をつぶして平らにしたものを接着させてある。

地盤作成後、整形板で所定の斜面形状に削り出し

て高さ 14 cm (50g の遠心力場での実験換算で 7m) の模型盛土斜面を作成した。なお、試料と容器の内側の摩擦軽減のために、ゴムメンブレンを短冊状に切り、その片面にシリコンオイルとシリコングリースの混合油を塗り、容器前面板と背後板の内側に貼った。

(3) 実験条件

各実験コードごとの実験条件を Table 4 にまとめて示す。

実験は、盛土斜面の地震時安定性に大きな影響を与える要因のうち、斜面の角度、補強領域、入力加速度をパラメーターとして行った。また、本実験では比較のためジオグリッドを入れない未補強盛土でも実験を行っており、補強、未補強合わせて 8 個の模型盛土を作成し、計 12 回の加振を行っている。補強盛土模型における斜面角、補強材の配置、加速度計の位置等は、Fig. 3 に示すとおりである。

模型盛土作成後、遠心力載荷装置に登載した加振台に、試料容器を取り付け、50g の遠心力場の下で、周波数 70 Hz (実物換算で 1.4 Hz) の正弦波振動を約 20 波、入力した。各盛土模型において、1 回目の

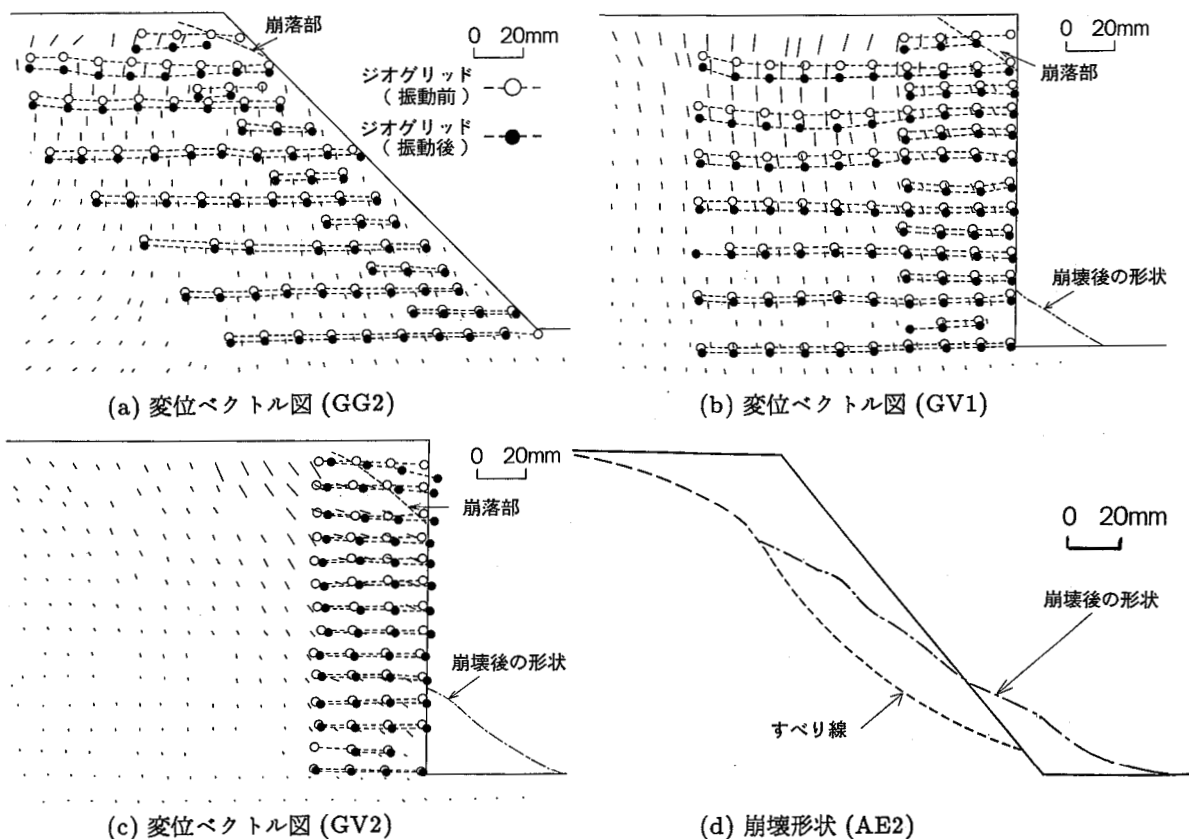


Fig. 4 Displacement vector and shape of failure after shaking
変位ベクトルおよび崩壊形状

加振で崩壊、変形等が発生していない場合、2回目の振動を与えた。入力振動は、遠心力場で水平加速度が10gから25gの間の各値になるよう入力条件を設定した。なお、50gの遠心場では水平加速度10gから25gは、水平震度0.2から0.5に相当する。

(4) 計測

振動中の模型斜面内各点の加速度を計測するとともに斜面の崩壊状況を観察した。また、振動実験の前後において、X線撮影を行い、Photo 1に示すようなX線写真に写った鉛散弾の位置からジオグリッドおよび地盤の変位を計測した。

3. 結果と考察

3.1 崩壊、変形挙動

加振による崩壊の有無は、Table 4に示すとおりである。

補強が無い45度の斜面(AE2, AE3)では、水平加速度15g前後でFig. 4(d)に示すようにのり先破壊に近い明確なすべり崩壊が発生している。また、鉛直のり面の未補強盛土のGV3では、50gに達する前、約40gで崩壊が発生した。

これに対して、45度、60度の補強斜面では、それぞれ17.9から26.0gの入力加速度に対しても、Fig. 4(a)に示すGG2のように、上端部の短いジオグリッドより上部の拘束圧の低い土砂が移動し、そのジオグリッドが若干水平移動していたが、前方に崩れ落ちた土砂はほとんどなかった。補強した鉛直の斜面(GV1, GV2)では、Fig. 4(b), (c)に示すとおり、のり肩部の土砂が崩壊した。崩壊の土量は、短いジオグリッドのみ設置したGV2のほうが、長いジオグリッドを設置したGV1より多かった。ただし、崩壊の形状は、拘束圧の小さいのり肩部分の補強材の間の土が抜け落ちるような部分的なものであり、ジオグリッドは、盛土内に残っていた。

崩壊状況から見ると、鉛直のり面の補強盛土に水平加速度約20gの振動(水平震度0.4)を与えたケースで、のり肩部の崩壊が見られたに過ぎず、著しく地震動に対する安定性が向上していると言える。

今回の実験ケースでは、それぞれジオグリッドの交点に接着した鉛散弾とその地中の鉛散弾の相対的な変位は、ほとんど判別できないほど小さく、補強領域では、ジオグリッドと地盤は、ほぼ一体となって挙動していると考えられる。

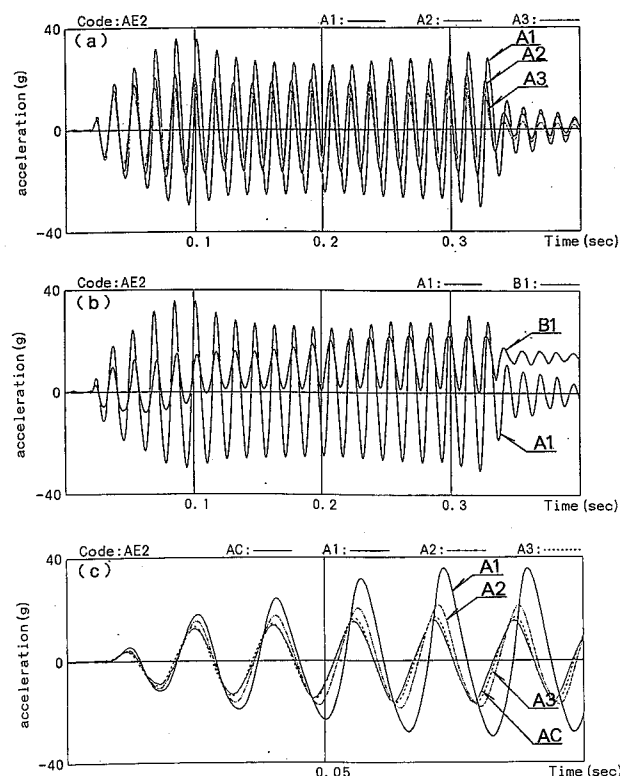


Fig. 5 Time histories of acceleration in test AE2
応答加速度 AE2 (斜面角 45°未補強)

Fig. 4(c)に示すように、補強領域の小さな鉛直のり面の盛土GV2では、補強領域内のジオグリッドと地中の鉛散弾がほぼ一致して水平方向に変位し、補強領域が一種の壁のように前方に傾いている。これに対して補強領域背後の未補強域では、変位は斜め下方に発生しており、補強領域の変位の方とは明瞭に異なっている。補強領域背後の未補強域上部では、地盤が主働破壊しているものと考えられる。Fig. 4(b)に示す補強領域の大きいGV1では、GV2でみられるような未補強域の主働破壊は起きていないが、のり面保護領域の背後の補強域で大きな圧縮が見られ、鉛直方向の変位が生じている。鉛直方向の変位は、のり面近くでジオグリッドが密に配置されている部分で少なく、ジオグリッドの設置間隔が粗い領域で大きい傾向が見られる。

これらのことから、ジオグリッドを設置し、補強領域をのり面背後に拡大することで補強領域背後の主働破壊を防ぐとともに、補強領域内の水平ひずみを抑制し、盛土のり面の安定性を向上させることができるという。

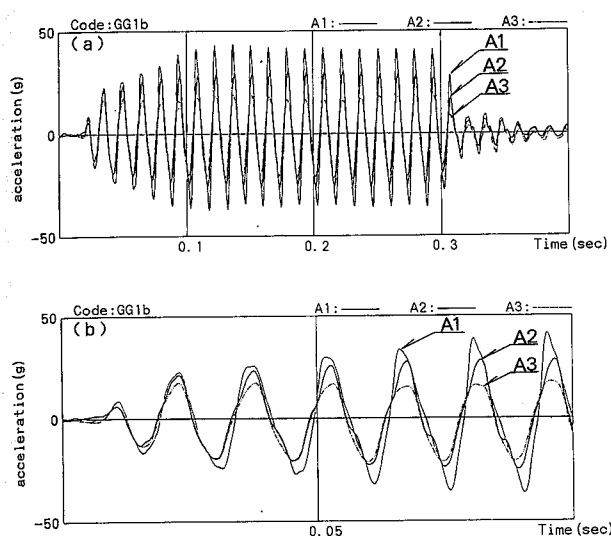


Fig. 6 Time histories of acceleration in test GG1b
 応答加速度 GG1b (斜面角 45°補強)

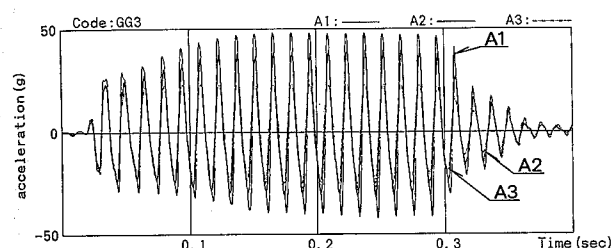


Fig. 7 Time histories of acceleration in test GG3
 応答加速度 GG3 (斜面角 60°補強)

3.2 地盤内の応答加速度

今回の実験では、加速度がのり面方向に作用したときを正としており、したがって、盛土のり面に慣性力が働いたときの加速度は負となる。

① 未補強盛土

未補強 (AE2) の応答加速度を Fig. 5 に示す。A1, A2, A3 の加速度を示す Fig. 5(a) の初期部分を拡大した Fig. 5(c) を見ると、盛土上部の加速度計 A1 の応答加速度の振幅が、徐々に増幅していくとともに、5 波目近辺まで徐々に位相差が拡大している。Fig. 5(b) に示すように B1 の応答加速度は、6 波目近辺で大きく正側にシフトしているが、この時点で、B1 の加速度計が設置されているのり肩部が大きく変形 (すべり崩壊が発生) したと考えられる。その後の加速度応答は A1, B1 を除いて、若干減衰した後ほぼ定常となっている。

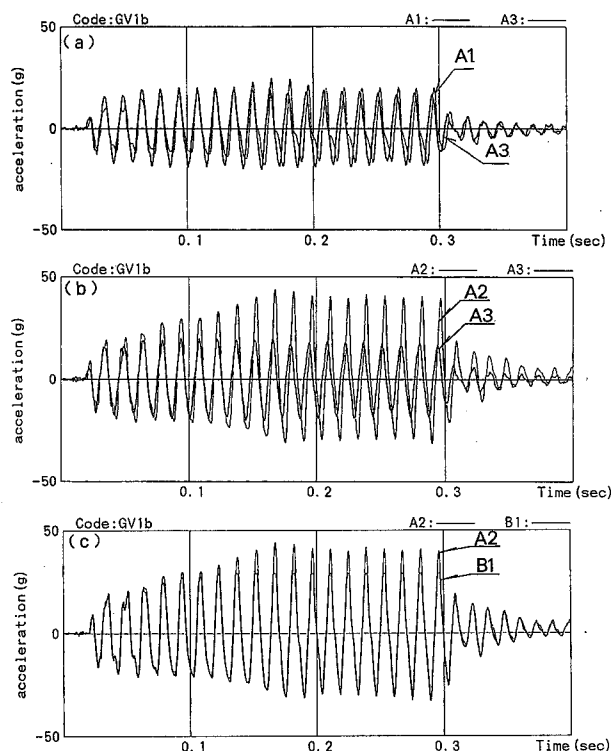


Fig. 8 Time histories of acceleration in test GV1b
 (vertical slope with geogrid)
 応答加速度 GV1b (斜面角 90°補強)

② 45 度, 60 度斜面の補強盛土

Fig. 6 に 45 度斜面の 2 波目 (GG1b) で得られた応答加速度を示す。加振初期部分を拡大した Fig. 6(b) によると、補強盛土では、未補強盛土のように、大きな位相差は見られない。盛土上部では、応答加速度の負側で位相が現れるが、正側では位相差が減少している。増幅後は、ほぼ定常状態となっている。

Fig. 7 に斜面角 60 度の補強盛土の GG3 の応答加速度を示す。45 度斜面とほぼ同じ傾向が見られ、増幅後、約 10 波目から定常状態となっている。

③ 鉛直のり面の補強盛土

鉛直のり面の補強領域の大きな GV1 の 2 回目の加振の GV1b の応答加速度を Fig. 8 に示す。増幅後、およそ 10 波目以降で定常状態となっている。また、Fig. 8(c) に見られるように、補強領域内の同じ深さの同一のジオグリッド間に設置した A2 と B1 の応答加速度は、ほとんど振動波形が同じで、位相差も見られず、容器加速度に対する応答倍率もほぼ同じである。A2, B1 と比較して、補強境界にある A1 は、

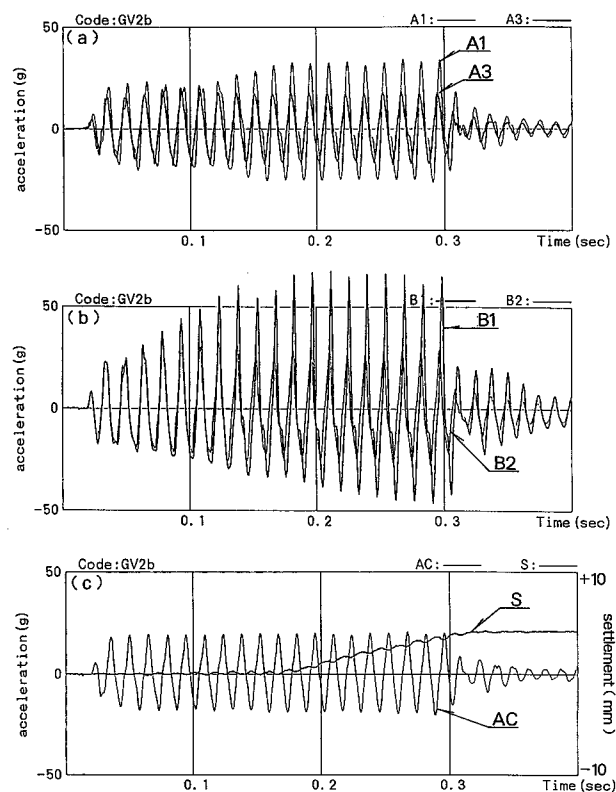
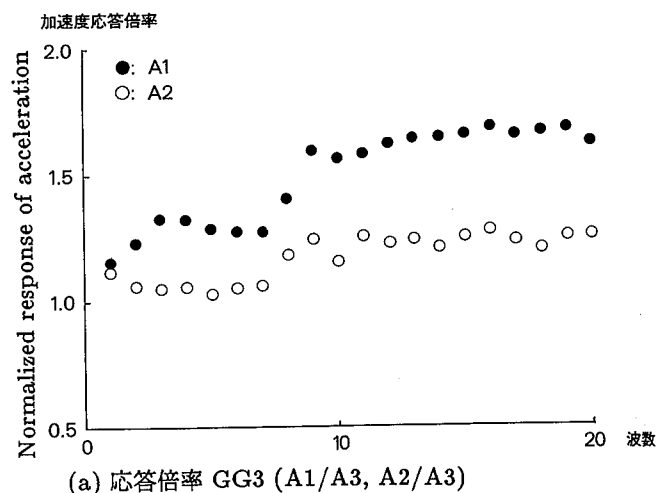


Fig. 9 Time-histories of acceleration in test GV2b (vertical slope with geogrid)
応答加速度 GV2b (斜面角 90°補強)

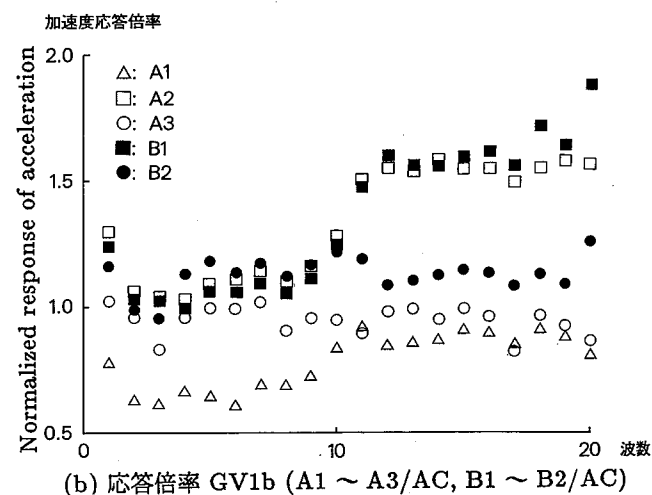
同じ深さにあるにもかかわらず振動に伴う増幅は見られない。補強領域の同じ深さでは応答加速度が同じとなっている。

鉛直のり面の補強領域の小さい GV2 (短いジオグリッドのみ設置) の 2 回目の加振より得られた応答加速度を Fig. 9 に示す。Fig. 9(a) は、上部 (A1) と下部 (A3) の応答加速度を示している。A3 は、ほぼ入力加速度と同じ傾向なのに対して、A1 は 8, 9 波目から増幅している。また Fig. 9(b) に示すように、のり面近くの B1, B2 の応答加速度は、B1 が大きく増幅しており、補強部の上部が大きく振動している。Fig. 9(c) には補強域のり肩部の変位の計測結果を、入力加速度とともに示してある。この変位に着目すると、6, 7 波目から負側の加速度 (前方に慣性力を受ける。) を受ける毎に、若干の沈下が生じており、補強領域が前後に揺れていると推察され、のり肩部の沈下は、11 波目から始まり最終の 20 波まで継続している。

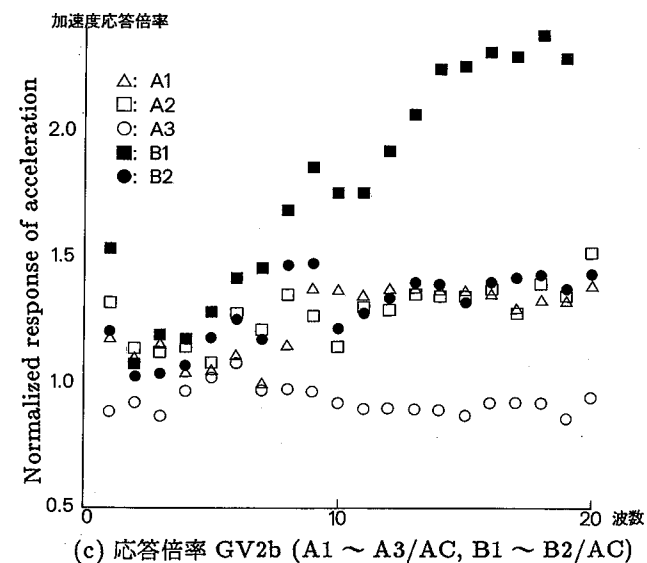
応答加速度の変化とのり肩部の沈下を合わせて考



(a) 応答倍率 GG3 (A1/A3, A2/A3)



(b) 応答倍率 GV1b (A1 ~ A3/AC, B1 ~ B2/AC)



(c) 応答倍率 GV2b (A1 ~ A3/AC, B1 ~ B2/AC)

Fig. 10 Normalized responses of acceleration by input acceleration
加速度応答倍率

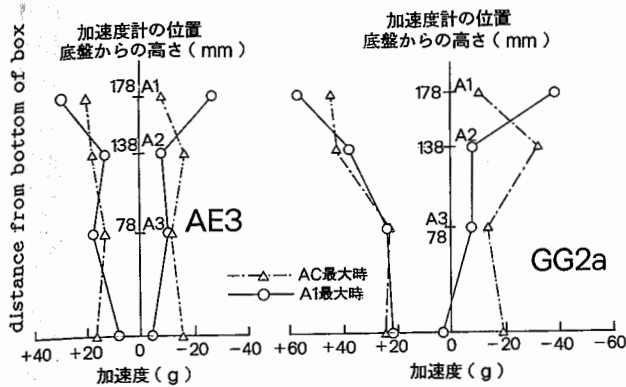


Fig. 11 Distribution of acceleration (Perpendicular)
加速度分布 (高さ方向)

慮すると、6～7波目で肩部の補強領域の土砂は、緩みだし、11波以降の加振を受ける毎にジオグリッド間の土砂が崩落し、変位計の値が増加していったものと考えられる。

3.3 加速度応答倍率

入力加速度と盛土各部の負側のピーク値の比（応答加速度倍率）を応答加速度各波毎に、Fig. 10 に示す。Fig. 10(a) には、実験 GG3 について、容器加速度 AC の測定値が不良であったため容器加速度にほぼ追従している盛土下部の加速度計 A3 の測定値と A1, A2 の加速度との比を図示してある。これによると、盛土上部にある A1、中部にある A2 とも、1波から7波まではほぼ一定値であり、その後8波から10波にかけて増加し、その後再び一定値となっている。

Fig. 10(b) は、補強領域の大きな GV1 について、2回目の振動の容器加速度に対する各点の応答加速度の比を示したものである。盛土上部の A2, B1 がほぼ同様な傾向で推移しており、10波目で増加し、11波以降定常状態となっている。B2 は、10波まで A2, B1 とほぼ同じ応答をしていたが、若干低下した後定常状態となっている。以上より、11波の時点でのり肩の部分に変化が生じたと考えられる。

Fig. 10(c) には、補強領域の小さい GV2 について2回目の大きな加振（入力加速度 20.6g）の応答加速度倍率を示してある。未補強領域の同じ深さにある A1, A2 はほぼ同じ傾向で振動中に大きな変化は見られないが、B1 は5波目から大きく増加し始めている。のり肩部の崩壊が発生したと考えられる11波

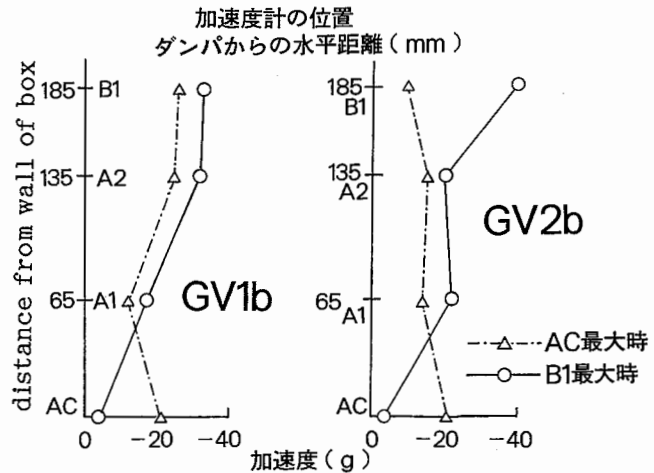


Fig. 12 Distribution of acceleration (Horizontal)
加速度分布 (水平方向)

以降は崩壊部直近の B1 を除いて応答加速度倍率は定常状態となっている。

加振を受けることで、応答加速度が増幅するとともに位相が現れ、ひずみがある程度大きくなりジオグリッドと地盤との相対変位が生じるとジオグリッドの補強効果が現れ、応答加速度の増幅が抑制され、容器加速度に対する応答加速度倍率が一定値となると推察される。

以上をまとめると、補強領域内では、応答加速度倍率が同一深さでほぼ同じであり、補強部が一体となって挙動していると考えられる。また、応答加速度は盛土上部ほど大きくなる傾向があり、補強盛土では、いずれのケースでも、上部で 40g 近くの加速度が発生しており、盛土斜面は、前方に大きな慣性力を受けている。それにもかかわらず、補強盛土は安定を保っていることから、地震時の斜面の安定性の向上にジオグリッドが極めて効果的であると云える。

振動とともに応答加速度は徐々に増加するが、これはひずみの増大による剛性の低下と考えられ、未補強盛土の場合は、増幅の過程で崩壊する。補強盛土では、応答加速度の増幅後に応答加速度倍率は定常状態となっている。これは、ひずみの増加に伴うせん断剛性の低下をジオグリッドによる補強によって抑止しているものと考えられる。

3.4 応答加速度分布

45度斜面の未補強盛土 (AE3) と 45度斜面の補

強盛土 (GG2a) について、盛土上部 A1 および容器 AC の最大加速度発生時点における高さの違いによる加速度分布を Fig. 11 に示す。未補強、補強盛土とも上部 A1 の加速度が最大の時、中部、下部の加速度が小さく、盛土上部と中部の間に働くせん断応力は大きいと考えられる。

鉛直のり面の補強盛土の地表から 3 cm の深さの加速度の水平方向で比較した加速度分布を Fig. 12 に示す。B1, A2 および A1 は同じ深さに設置された応答加速度の値である。補強領域の大きい GV1b では、補強領域内の B1, A2 で加速度がほぼ同じ大きくなり、補強領域境界の A1 の加速度が他の 2 つよりも小さい。一方、補強部の狭い GV2b では、補強部内の B1 の加速度に対し補強部外の A2, A3 の加速度が小さい。

応答加速度の項でも述べたとおり、土がジオグリッドで補強されることにより、補強領域内の水平方向の相対的な変位が拘束され、同一深さでの補強領域内の加速度応答はほぼ同じものとなっている。それぞれのジオグリッド近辺の土砂は、ほぼジオグリッドと一体となって変位し、全体として擁壁のように挙動すると考えられることから、水平振動が負荷された場合、高さによる応答加速度の違いによってジオグリッド間の土砂には、繰返しせん断が働いていると考えられる。

ジオグリッドを設置することで補強領域はせん断剛性が大きな領域となり、補強幅が広いほど、せん断剛性は大きくなると考えられる。よって補強領域の大きな盛土は、地震に対しても、崩壊することなく安定を保つものと考えられる。

4. 結 び

本研究で得られた結果を要約すると次のとおりである。

① 補強が無い斜面では、加振後まもなく明確なすべり崩壊が発生するのに対し、補強のある場合は、拘束圧の小さいり肩部や最上部のジオグリッド上部で局部的な崩壊は起きるが、全体としては鉛直のり面の盛土でもほぼ安定を保ち、ジオグリッドによる補強が地震時においても盛土の安定性の向上に効果的である。

② ジオグリッドで補強することにより、補強領域内の水平方向のジオグリッドとの相対的な地盤変位が拘束され、同一深さでの補強領域内の加速度応答はほぼ同じものとなり、補強領域は剛性の小さな重力式擁壁のように挙動する。ジオグリッドを設置することで水平方向のひずみが抑えられ、補強領域はせん断剛性が大きくなる。補強幅が広いほどせん断剛性の大きな領域が拡大し、よって補強領域の大きな盛土は、地震に対しても、崩壊することなく安定を保つものと考えられる。

③ 補強斜面、未補強斜面とも、盛土上部ほど応答加速度が大きく増幅される。未補強盛土は、増幅の過程で崩壊するが、補強盛土は大きな増幅に対しても安定を保ち、応答加速度倍率は、一定値に収束する。補強領域内では、繰返しせん断によるひずみの増加に伴うせん断剛性の低下をジオグリッドを設置することで抑制していると考えられる。

謝 辞

本研究は、第一筆者が科学技術庁による国内留学制度で東京工業大学工学部土木工学科土質研究室に研究員として在籍していたときに行ったものである。国内留学の実現に御尽力下さいました東京工業大学、科学技術庁、文部省、労働省の関係各位に心より感謝申し上げます。

(平成 4 年 4 月 27 日受理)

参 考 文 献

- 1) 川崎, 平井, 古川, 佐藤, 関島, 河辺: FRP 系ジオテキスタイルによる補強盛土の実大実験, 第 25 回土質工学研究発表会, 1990.
- 2) J. Takemura, T. Kimura and N. Sue-masa: DEVELOPMENT OF EARTH-QUAKE SIMULATORS AT TOKYO INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 東工大土木工学科研究報告 No. 40, 1989.
- 3) 木村 孟ほか: 講座「遠心模型実験」: 「土と基礎」 Vol. 35, No. 11, 1987-1988.
- 4) 荒川, 小池, 末政, 竹村, 木村: 砂質土斜面の地震時安定性に関する研究, 第 24 回土質工学会研究発表会, 1989.