



土のう構造体を用いたのり先補強による既設道路盛土の耐震化 : 土のう構造体の模型実験

九田, 敬行 ; 澁谷, 啓 ; 片岡, 沙都紀 ; 田嶋, 亮佑 ; 森吉, 勇氣 ; 森口, 裕矢 ; 中澤, 博志

(Citation)

ジオシンセティックス論文集, 32:175-182

(Issue Date)

2017-12

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90005947>



土のう構造体を用いたのり先補強による 既設道路盛土の耐震化 —土のう構造体の模型実験—

九田敬行¹・澁谷啓²・片岡沙都紀³・田嶋亮佑⁴

森吉勇氣⁴・森口裕矢⁴・中澤博志⁵

筆者らは、既設土構造物の耐震補強工法として、施工コストが安価、施工が容易、盛土材を再利用することが可能である土のう構造体によるのり先補強工法を提案している。本稿では、土のう構造体を模擬することができる実験装置を作製し、土のう積層体に対する静的載荷実験、および、小型振動台試験装置で土のう構造体に対する加振実験を行った結果を報告する。静的載荷実験では、プレロード、プレストレスの効果により、載荷時の土のう構造体のクリープを抑制でき、加振実験では、側方から地震時の土圧を模した荷重を載荷した場合においても、土のう構造体はプレストレスの効果により一体化を保持できることが確認された。一連の模型実験結果より、土のう構造体は、既設盛土に対する低廉な耐震補強工法として有望であることが確認された。

キーワード：盛土，耐震補強，のり先補強，土のう構造体，模型試験

1. はじめに

筆者らは、既設土構造物の耐震補強工法として、施工コストが安価、施工が容易、盛土材を再利用することが可能である土のう構造体によるのり先補強工法を提案している¹⁾。土のう構造体を用いたのり先補強工のイメージを図-1に示す。本提案工法は、既設盛土の耐震化を目的として、のり先の限定された範囲での簡易な土工による補強を目指したもので、永久構造物としての土のうをのり尻部に積層し、鉛直方向のグランドアンカーにより一体化する補強工である。また、盛土内の地下水位が高い場合、のり先補強に先行して、盛土内排水工を併用する²⁾³⁾。本工法の効果を実証するための実物大盛土の大型加

振実験を2016年7月14日および8月4日に防災科学技術研究所において実施した。実物大実験の際にいくつかの課題が生じたため、土のう構造体を想定した土のう積層体に対する静的載荷実験、および、神戸大学の小型振動台実験装置で加振実験を行い、耐震補強効果の検証、および、実物大実験における課題解決について検討した。

2. 大型振動台装置を用いた実物大盛土の加振実験における課題

(1) 実験概要

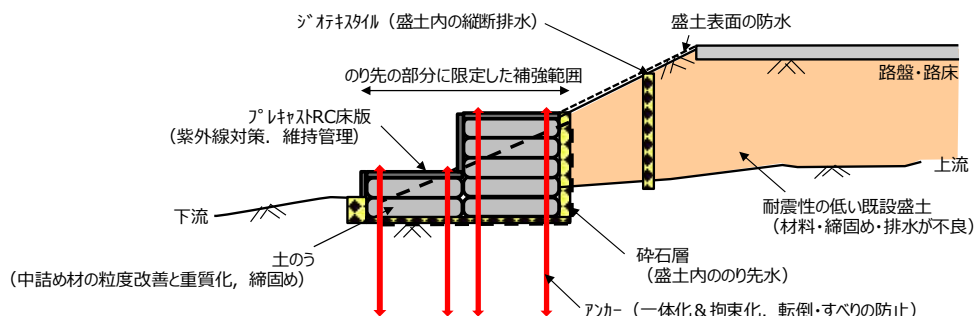


図-1 のり先補強工法の概要図¹⁾

¹正会員，ライト工業株式会社 西日本支社技術一部（〒564-0063 大阪府吹田市江坂町1-16-8）

²国際会員，神戸大学大学院工学研究科，教授（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1）

³国際会員，神戸大学大学院工学研究科，助教（同上）

⁴学生会員，神戸大学大学院工学研究科（同上）

⁵国際会員，国立研究開発法人防災科学技術研究所，主幹研究員（〒305-0006 つくば市天王台3-1）

2016年7月14日および8月4日に防災科学技術研究所において実物大盛土の大型加振実験を実施した⁴⁾。大型加振実験は、無対策および土のう構造体によるのり先補強の2ケースについて実施しており、盛土高はいずれのケースも4mとし、のり先補強のケースの土のう構造体は、高さ1.5m×幅2.0mであり、盛土高の概ね1/3が補強範囲となっている（写真－1）。土のう構造体は、鉛直方向のグランドアンカー6本により拘束化、一体化し、土のう構造体には、50kN/m²のプレストレスをかけた状態で加振した。実験盛土は、含水比7～9%、締固め度85～90%で造成した。

加振条件は正弦波・2Hz・20波とし、入力加速度は100Gal・250Gal・450Galの3ケースとした。ただし、試験盛土が崩壊した時点で加振を中止している。

(2) 実験材料

盛土材料（まさ土）の締固め曲線および粒径加積曲線を図－2、図－3に示す。物性値は土粒子密度2.651(g/cm³)、最適含水比12.2(%)、最大乾燥密度1.91(g/cm³)である。土のう袋の中詰め材は実施工を考慮し現地発生土をのり先補強工に用いる想定のもと、試験盛土と同様の土試料としている。

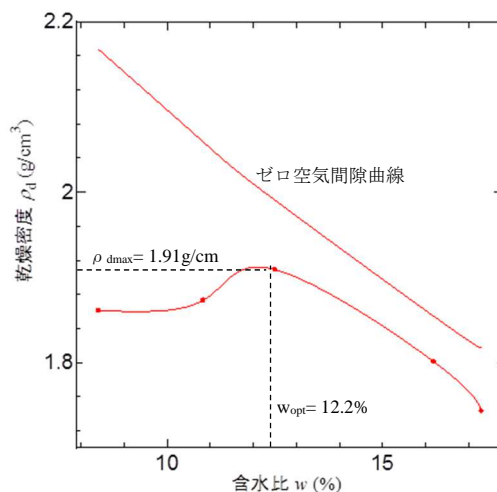
(3) 試験結果・考察

a) 未対策盛土 (Case1)

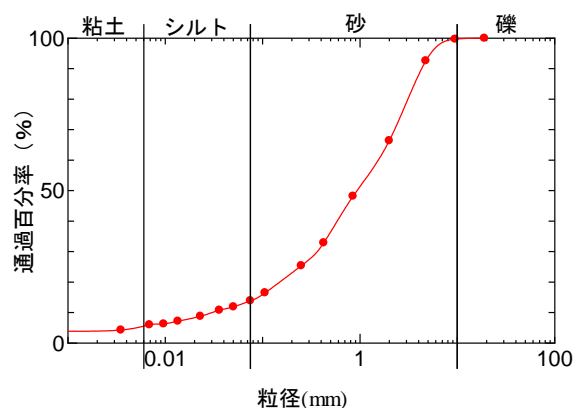
入力加速度100Galにおいては崩壊が確認されなかったが、250Galでは天端下の1.0m付近で法面崩壊が起きた。その時点で崩落箇所を除いてはほとんど変形していなかったが、経過時間増加にともなって盛土が加振方向に大きく揺れることで盛土天端が沈下する傾向にあった。大きな変形が確認されたため、加振は250Galで中止した。加振前後で3D測量を行ったところ、試験盛土の天端がのり肩から均等割りの4点（のり肩含む）の平均で27.2cm沈下していることがわかった（図－4）

b) のり先対策工盛土 (Case2)

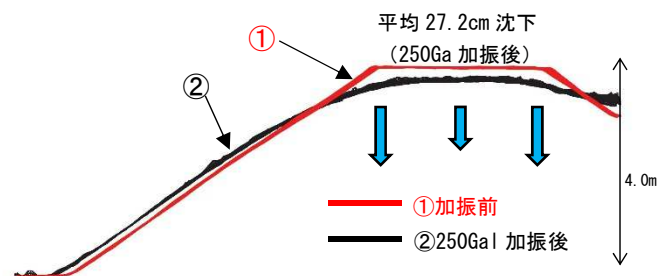
加振をした結果、100Gal加振ではCase1と同様に崩壊は確認されず、250Galおよび450Galの入力加速度において試験盛土の崩壊が発生した。250Gal加振において試験盛土が崩壊し、450Gal加振については250Gal加振で発生した崩壊がさらに進展した。



図－2 締固め曲線



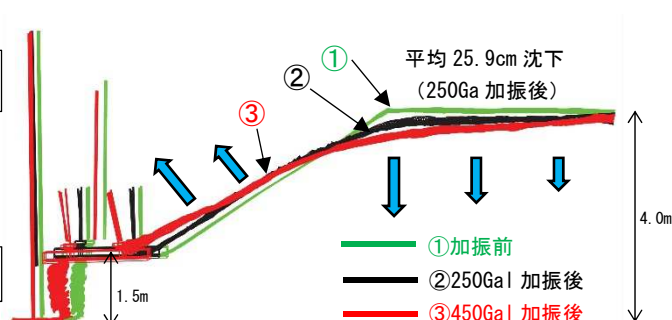
図－3 粒径加積曲線



図－4 Case1における3D測量による断面図



写真－1 土のう構造体によるのり先補強



図－5 Case2における3D測量による断面図

3D 測量図（図－5）より試験盛土の変形モードについて推測したところ、Case2 においては試験盛土法面が加振によってせり上がりを起こしてしまい、土のう構造体上部へと流亡することによって盛土崩壊が発生したと考えられる。上述の盛土法面せり上がりは盛土材の含水比が7～9%と低く、乾いていたため、土塊としてすべり破壊を生じることなく、土粒子が下方に流れ落ちてしまったことが主要因ではないかと推測された。

無対策ケースおよび法先補強ケースそれぞれの入力波 250gal での加振時における盛土内の応答加速度分布を図－6 に示す。盛土の固有振動数が入力波の振動数 2Hz（周期 0.5sec）に近いことに起因し、入力加速度 250gal に対し、無対策ケースの盛土では 400～800gal 程度の応答加速度を観測した。一方、法先補強ケースの場合、盛土天端部を除き 350～600gal 程度の応答加速度であり、無対策ケースより低減していることが分かる。このことは、法先補強によって盛土全体へ耐震補強効果が発現した結果であると評価できる。

しかしながら、250Gal 加振後の盛土天端沈下量については、Case1 と Case2 で有意な差は確認されなかった。その大きな要因の一つとして、のり先に設置した土のう構造体が加振による慣性力と試験盛土からの土圧によってせん断変形してしまったことが考えられる。また、土のう構造体は 6 本のアンカーにて鉛直荷重（プレストレス）を載荷する構造を採用しており、1 本当たり 50kN の鉛直荷重を目標に載荷したが、前列に配置した 3 本のアンカー（荷重 1～3）は、前方が開放されていて反力を十分得ることができなかつたため、30kN/本の鉛直荷重で加振を行った。加振時においてアンカー力（プレストレス力）の急激な低下が確認され（図－7），このことも土のう構造体のせん断変形を助長したと考えられる。

試験盛土のすべり面の形成および天端沈下量は Case1 と Case2 で有意な差は確認されず、その要因として土のう構造体のせん断変形が考えられる。土のう構造体に着目し、盛土からの側方土圧を考慮した実験を実施することで最適なプレロード、プレストレス値を検証する必要があることが分かった。

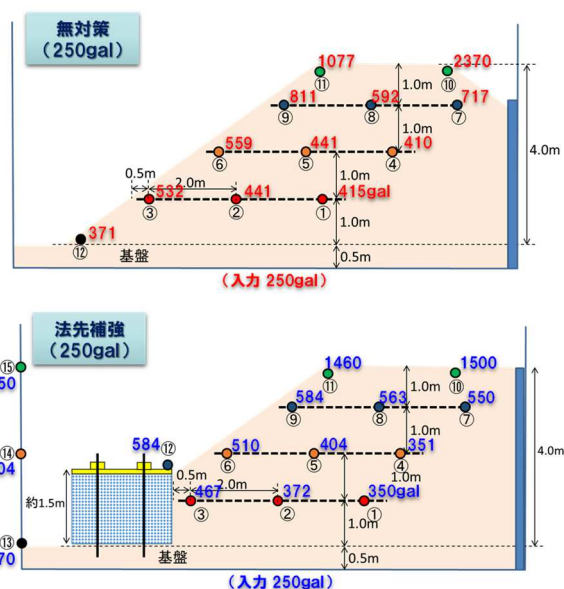
3. 土のう積層体の静的載荷実験

(1) 実験概要

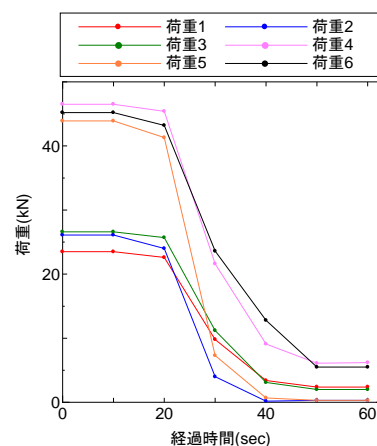
のり先補強の土のう構造体を想定した土のう積層体に対し、プレロード（載荷履歴最大荷重）、プレストレス（実験時載荷荷重）を載荷する実験を行い、土のう構造体のクリープ特性を確認し、のり先補強に土のう構造体を適用する場合の信頼性を検証した。

(2) 実験材料

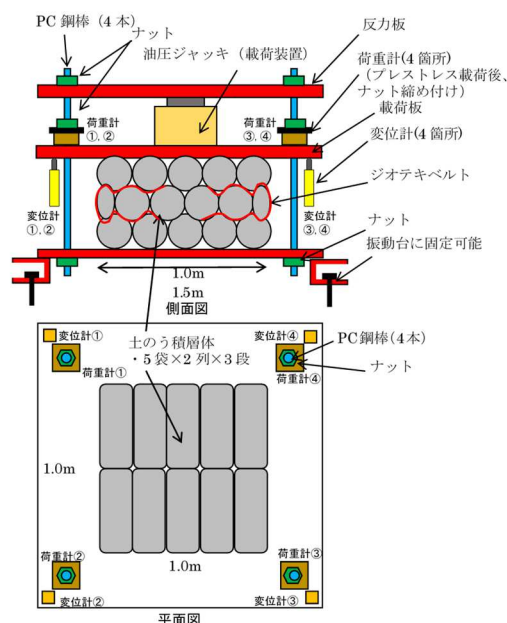
事前に粒度や密度が把握できている 2. (2) に示した盛土材料を土のうの中詰め材として使用した。



図－6 盛土内の応答加速度分布
(入力加速度 250gal)



図－7 加振時における荷重の急激な低下



図－8 実験装置概要

(3) 実験装置・手順

図-8に実験装置概要、写真-2に実験装置全景を示す。油圧ジャッキを用い載荷板を介して土のう構造体に荷重を付加し、所定の荷重載荷後は鋼棒のナットを締め付け、油圧ジャッキからの荷重を鋼棒に移動させることで、その引張力の経時変化からクリープを計測する。実験時には、変位計を4箇所、荷重計を4箇所設置して計測した(図-8)。直径20cm、長さ50cmの土のう袋に1袋当たり25kgの砂を積めて、高さ約10cmから落下させて、自重により振動させて締め固め、各段当り5袋の土のうを2列に並べて、千鳥配置で3段に積み上げる。千鳥配置で積み上げるため、2段目の両端は半体(土のう袋に土を半分程度入れたもの)を配置し、半体の落下防止と安定性向上のためジオテキスタイルのベルトを用いて固定する。次に載荷板を設置し、油圧ジャッキにて所定の荷重まで載荷する。その状態で鋼棒のナットを締め付け、油圧ジャッキの荷重を鋼棒へ移動させる。その際、4本の鋼棒に作用する荷重の総和が所定の荷重になるように締め付力を調整する。実験は、50kN、75kN、100kNの順に載荷荷重を増加させるケース(Case1)と50kN、100kN、50kNの順に載荷荷重を増減させるケース(Case2)の2ケース実施した。

(4) 実験結果・考察

載荷時の土のう構造体を観察すると土のう間の隙間に土のうが入り込み、土のう1袋1袋が正六角形に近い形状でしっかりかみ合っている状況、すなわちハニカム構造⁹⁾を形成していることが分かる(写真-2)。この形状から、土のう構造体に荷重を載荷することで一体化が期待できると推察できる。図-9は、Case1の載荷時における荷重と鉛直変位量の関係である。75kNから100kNへの荷重増加に伴う鉛直変位量は、50kNから75kNへの荷重増加に伴う鉛直変位量より減少している。この結果から、鉛直荷重(プレストレス)の増加に伴って、中詰め材に土のうの拘束効果が作用することで土のう単体の剛性が向上し、土のう積層体の剛性が増したと推察される。

また、図-10は、Case2の結果から得られた経過時間と荷重の関係である。載荷条件①、②ともに経過時間とともにクリープにより荷重が減少している。その減少量は、初期荷重に対して、載荷条件①では10日で17.3%、載荷条件②では6.1%であった。載荷条件①と比較して載荷条件②のクリープが小さいのは、載荷条件①終了後に同一の土のう構造体に対して荷重を増加させて載荷条件②を引き続き行ったためと考えられる。載荷条件③については、クリープによる荷重減少は非常に小さく、10日経過後で2.2%であった。この結果から、プレロードの効果によりクリープを大幅に抑制可能であることが分かった。クリープ測定時における変位量はいずれの実験も0.2mm以下であり、非常に小さかった。

以上の結果から、土のう構造体は、プレストレスが載荷された状態において、クリープによる変形が

ほとんど生じることなく形状が安定していることが分かった。また、土のう積層体の載荷板への設置面積が約1.0m²(直径20cm×長さ50cm×10袋)であることから、のり先補強の実現場への適用においては、100kN/m²程度のプレストレスが載荷されていれば土のう構造体は十分に一体化されていると考えられる。

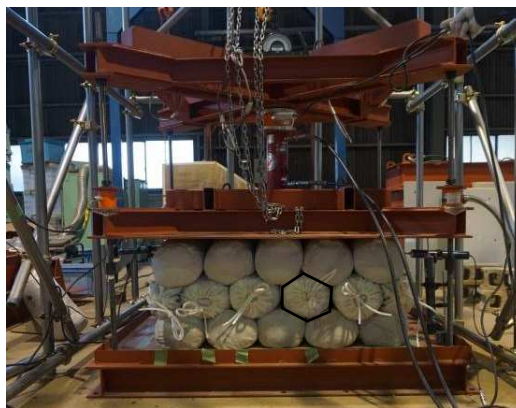


写真-2 実験装置全景

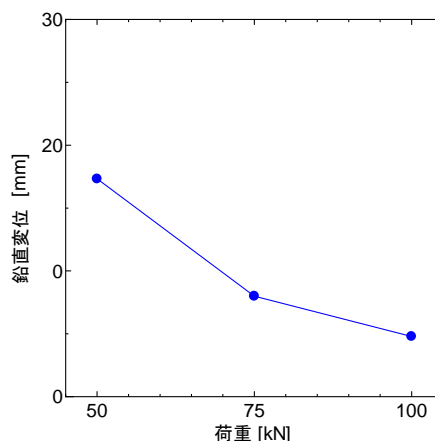


図-9 荷重増加に伴う鉛直変位量(Case1)

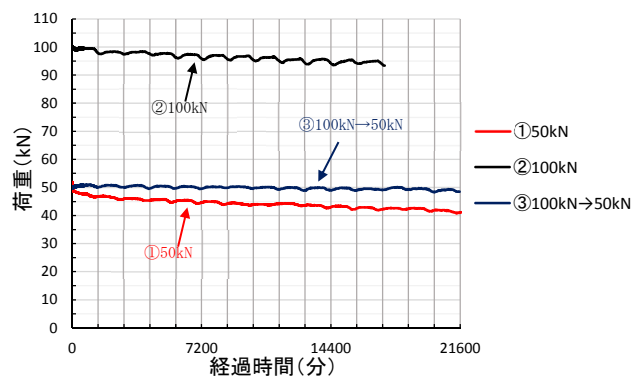


図-10 経過時間と荷重の関係 (Case2)

4. 土のう積層体の振動台実験

(1) 実験概要

のり先補強に用いる土のう構造体は、地震時における内的安定性が要求される。そのためには、地震時において土のう構造体が一体化を保持し、剛性を保つ必要がある。そこで、土のう構造体のクリープ実験で用いた実験装置を小型振動台試験装置に設置・加振し、土のう構造体のせん断破壊あるいは変状の有無を確認することで内的安定性について検証した。

(2) 実験材料

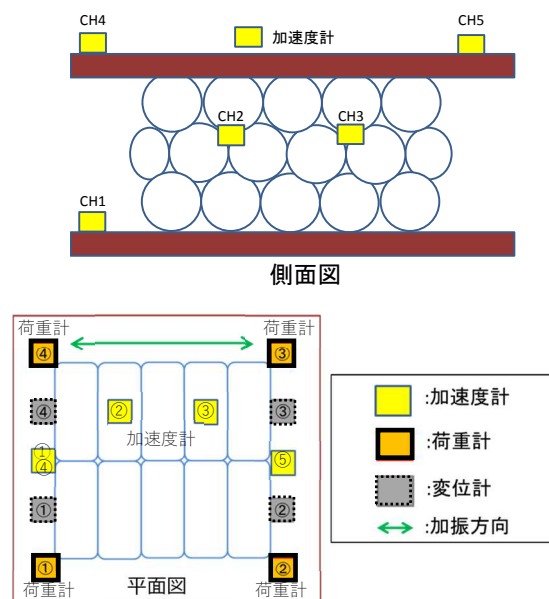
3. (2)で示した材料，作成方法で土のうを作成し，実験を行った。

(3) 実験装置・手順

3. (3)で示した手順により，土のう構造体を構築する。土のう構造体に載荷する荷重は，プレロード100kNを1日載荷後，鉛直荷重を除荷して50kN（各鋼棒 12.5kN）で加振実験を行った。加振条件は，正弦波，2Hz，40波加振とし，入力加速度は150Galから使用した実験装置の性能から900Galまでとし，大変形や土のう積層体の崩壊等により実験継続が不可能な場合を除き，順次加速度を150Galずつ増加させた。加振時には，図－11に示す箇所に加速度計および変位計を取り付け，鋼棒に作用する荷重とあわせて計測した。

(4) 実験結果・考察

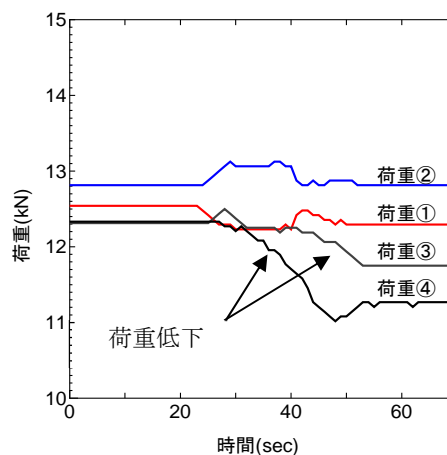
加振時の状況は，600Galまでについては，変形や荷重低下が認められなかったが，750Gal加振時に3段目の両端の土のうの拘束が緩みだし，900Gal加振時に2つの土のうが滑落した（写真－3）。それに伴い900Gal加振時において滑落箇所の近傍の荷重計③，および荷重計④の荷重が低下した（図－12）。3段目の土のうが加振時に滑落したのは，土のう積層体上面に凹凸が残る状態で荷重（プレストレス）を載荷したことにより，載荷板からのプレストレスの伝達が十分ではなかったこと，3段目の両端部を2段目と同様にバンドで固定しなかったことが原因であったと考えられる。この結果から，土のうを積層す際には，最上面に砂や土のうを敷設することで平滑にし，最上段両端の土のうをバンドで固定することで，土のうの滑落については対応可能であると考えられる。水平最大加速度は，載荷板（CH4,CH5）で大きく，その他の箇所（CH1～CH3）ではほぼ同値を示していた（表－1）。一部の土のうが滑落したにもかかわらず，土のう積層体はプレストレスを滑落した箇所以外で受け持ち下方に伝達することによって，載荷板の押さえつけ効果が十分に発揮していると考えられる。なお，別途実施した追加実験では，土のう積層体の最上部をバンドで固定することにより，900Galの加振においても一体化が確認された。以上の結果から，土のう積層体は，プ



図－11 計測器設置位置



写真－3 加振による土のうの滑落



図－12 900Gal加振時における各アンカーの鉛直荷重の経時変化

表－1 水平最大加速度 (Gal)

	600Gal	750Gal	900Gal
CH1	800	980	1160
CH2	800	1000	1180
CH3	940	940	1140
CH4	1320	1700	1940
CH5	1340	1600	1680

レストレスの効果により、加振時において十分に一体化されていると判断できる。

5. 側方荷重を載荷した土のう積層体の振動台実験

(1) 実験概要

土のう積層体単体の耐震性能については確認できたが、盛土を耐震補強する場合には盛土からの土圧が作用する。防災科学技術研究所で実施した実物大実験においても、盛土からの土圧が作用することによって、土のう構造体に変形が生じることで想定していた補強効果を十分に得ることが出来なかった。

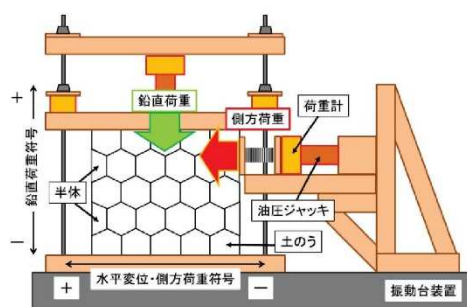
そこで、土のう積層体の側方から載荷した状態において加振することにより、土のう積層体の変形および加速度特性について確認した。また、土のう積層体は鉛直荷重（プレストレス）の大小によっても耐震性能が変化すると考えられることから、加振時におけるプレストレスの影響についても着目した。

(2) 実験材料

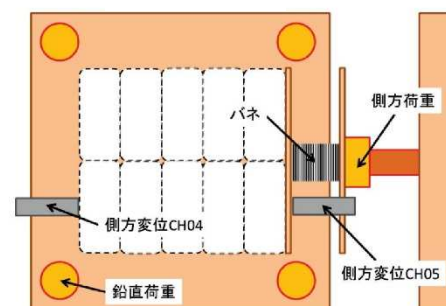
3章で示した材料，作成方法で土のうを作成し，実験を行った。

(3) 実験装置・手順

実験装置の概要を写真－4および図－13，に示す。3章、4章で示した模型実験と同様に土のうを千鳥配置で2列5段にハニカム構造となるように積層し、プレロード、プレストレスをかけることにより土のう積層体の一体化を図った。上記の手順で作成した土のう構造体の4段目と5段目に側方から油圧ジャッキを用いて20kNの荷重を図－13(a)に赤の矢印で示す方向に載荷し加振試験を行った。なお、載荷荷重の20kNは、実物大実験において土のう構造体の盛土側背面に設置した土圧計測における450Gal加振時の最大値より決定した。また、側面全面ではなく4段目と5段目に載荷しているのは、大型振動台試験において土のう構造体がせん断変形したためである（写真－5）。また、面的に荷重を載荷できるように土のう構造体と側方荷重載荷装置との設置面に板を配置し、加振時に側方荷重が追従することを目的として土のう構造体と油圧ジャッキの



(a) 側面図

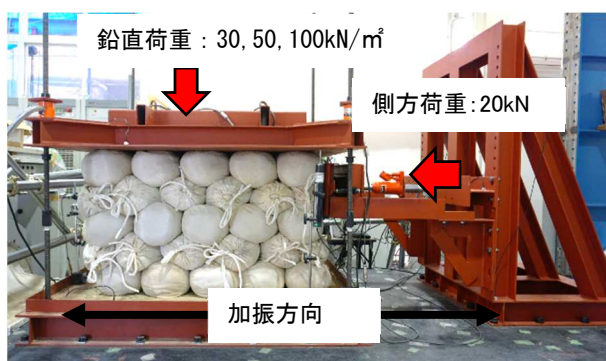


(b) 平面図

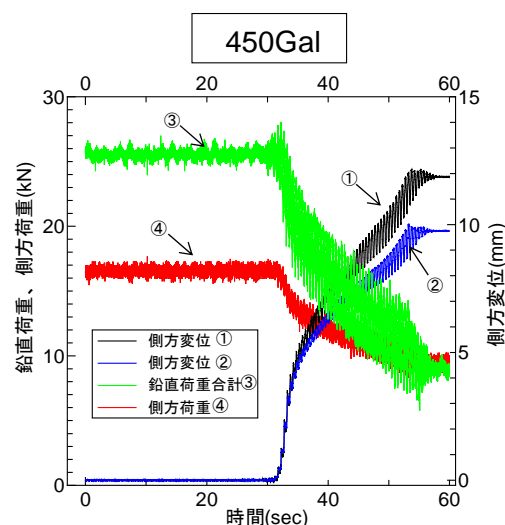
図－13 計測器設置位置



写真－5 実物大実験における土のう積層体の変形



写真－4 実験装置全景



図－14 加振時における荷重，変位の経時変化（鉛直荷重 30kN, 450Gal）

間にバネを設置している。加振条件は30kN,50kN,100kNの3ケースの鉛直荷重を載荷し、正弦波、2Hz、40波で、入力加速度は大型振動台試験と同様の100Gal、250Gal、450Galとした。加振方向は、左右一方向である。

(4) 実験結果・考察

加振時における鉛直荷重および側方荷重、水平変位の結果の一例として鉛直荷重30kN、入力加速度450Galを図-14に示す。計測機器の設置図およびその計測値の正負の向きは図-13に示すとおりであり、グラフ中に緑で示す鉛直荷重合計は図-13(b)に示す4つの鉛直荷重の合計である。入力加速度450Galにおいては、鉛直荷重が減少し、それに伴い側方変位が増加した。これは大型振動台実験と定性的に同様の傾向であったが、大きくせん断変形しハニカム構造が崩れた部分も見られた大型振動台実験に比べ、土のう構造体の変形量は小さく、またハニカム構造も保持していた(写真-6)。大型振動台実験では450Gal加振後に鉛直荷重合計が0kNまで減少したのに対し(図-7)、側方荷重をかけた小型振動台試験では450Gal加振後も約10kNの鉛直荷重が残存していた(図-14)。また、加振時に基盤、載荷盤、土のう構造体の各段に設置した加速度計の最大値については、いずれの入力加速度においても値の差はほとんど見られず、土のう構造体の一体化挙動が確認できた。

図-15は、各鉛直荷重における入力加速度と加振前から加振後の水平変位の関係である。鉛直荷重が大きくなるほど、入力加速度に対する水平変位が小さくなる傾向が確認された。特に、鉛直荷重が100kNの場合では、250Galにおいてもほとんど変位が見られず、450Galであっても変位量は1mm程度であった。この傾向は、鉛直変位についても同様であった(図-16)。図-17は、入力加速度と鉛直荷重の加振前後における荷重減少量との関係を示している。鉛直荷重が30kNの場合では、実物大加振試験と同様に入力加速度が大きくなるにしたがい、鉛直荷重が大きく減少した。一方、鉛直荷重が100kNの場合では、450Galで10%程度の荷重減少が見られるものの、土のう構造体を一体化するのに十分な鉛直荷重が残存していた。鉛直荷重(プレストレス)を増加させるほど、加振時における土のう構造体はより一体化することが考えられるが、実施工時において大きなプレストレスの載荷は、載荷板の構造や施工にかかる費用が増大することを考慮すると、実験に用いたサイズの土のう構造体に対しては100kN/m²程度のプレストレスが妥当であるといえる。このプレストレスに関する結果は、3章の静的載荷試験における剛性の増加からも同様の結果を得ている。



写真-6 450gal加振後の土のう構造体
(鉛直荷重 30kN)

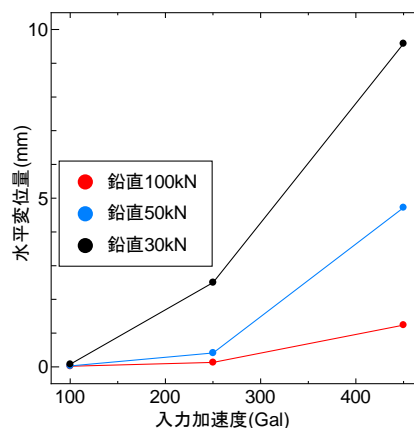


図-15 入力加速度と水平変位の関係

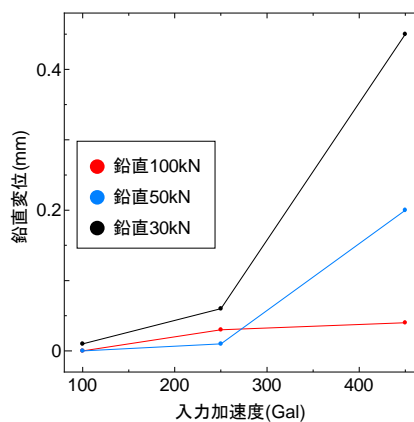


図-16 入力加速度と鉛直変位の関係

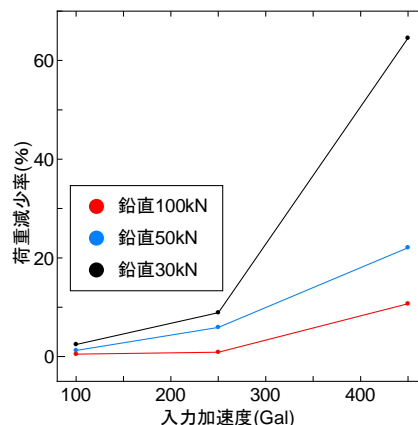


図-17 入力加速度と荷重減少量の関係

6. おわりに

土のう構造体に関する一連の実験結果により、以下の知見を得た。

- ・盛土のり先を土のう構造体で補強することにより鉛直方向加速度を抑制することが可能である。
- ・土のう構造体にプレストレスを載荷することにより、土のうがかみ合うことで一体化し、剛性が期待できる。
- ・土のう構造体にプレロード、プレストレスを載荷することにより、クリープを抑制することができる。
- ・土のう構造体に側方土圧に相当する荷重が載荷された状態で加振を受けても、プレストレスが100kN/m²以上であれば、土のう構造体の一体化が保持できる。

以上から、のり先補強に土のう構造体を施工し盛土の耐震性を向上させる工法は、施工の容易さだけでなく、一体化ならびに強度面からも有望であることが分かった。

7. 今後の展望

2017年7月より再度予定している実物大実験は、今回得られた知見より、以下の方針で実施されることが望ましい。

- ・土のう構造体には、100kN/m²のプレストレスを載荷する。
- ・プレストレスを確実に載荷するため、土のう積層体を載荷板と剛な底板で挟み込む構造とする。
- ・前回の実物大試験は、盛土材が乾燥していたため、想定した結果が得られなかったため、盛土の含水比を最適含水比に近づけ、締め固め管理を確実に行うことですべり崩壊を再現する。

今回の実験では、土のうの中詰め材にまさ土を用いたが、現場で適用する場合には現地発生土（盛土材）を再利用する必要がある。そこで、現地発生土やスラグ混合土（現地発生土＋スラグ）にて同様の実験を実施し、材料の違いによる土のう構造体の変形、強度特性を確認していきたい。

今後は、さらに土のう構造体の形状、性状についての実験や解析による理解を深め、既設盛土の耐震補強対策として経済的に有利となる最適な土のう構造体の仕様について検討していきたい。

謝辞：本研究を行うにあたり、株式会社セップの杉政光彦氏の協力を得た。また本研究は、国土交通省新道路技術会議から神戸大学への受託研究の一環として実施したものである。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 澁谷啓,谷和夫,丁経凡,白済民：土のう構造体を用いた新たなのり先補強工による既設盛土の耐震化 その1. 基本概念, 第51回地盤工学研究発表会, pp1129-1130, 2016.
- 2) 澁谷啓：盛土崩壊のメカニズムと対策工, ジオシンセテックス論文集, Vol.23, pp.1-14, 2008.
- 3) 澁谷啓,原健二：補強土壁工の弱点と対策, 基礎工, 総合土木研究所, 38(2), pp.18-24, 2010.
- 4) 田嶋亮佑,九田敬行,片岡沙都紀,森吉勇気,歳藤修一,戎剛史,加藤卓彦,丁経凡,澁谷啓：土のう構造体を用いた新たなのり先補強工による既設盛土の耐震化 その1. 実物大大型振動台実験, 第52回地盤工学研究発表会, pp1041-1042, 2017.
- 5) 真鍋光希,深江麻利子：ハニカム構造の耐久性について, 日本物理学会誌, 70号, p153, 2015.

ENHANCING ASEISMIC STABILITY OF ROAD EMBANKMENT BY REINFORCING THE TOE WITH SOIL-BAG STRUCTURE – MODEL TESTS OF STACKING SOIL-BAG

Takayuki KUDA, Satoru SHIBUYA, Satsuki KATAOKA, Ryosuke TAJIMA,
Yuki MORIYOSHI, Yuya MORIGICHI and Hiroshi NAKAZAWA

The authors have recently proposed an aseismic reinforcement at the toe of embankment using sandbag-structure which in turn enables one to save the construction cost, to work easily and to reuse the embankment materials. In this paper, the results of static loading test as well as the shaking table test by using a stacking soil-bag are presented. The results of static loading test on the sandbag-laminate showed that the creep of the stacking soil-bag on loading could be greatly eliminated by applying a preloading-prestress cycle. Regarding the shaking table test, the stacking soil-bag structure exhibited almost no deformation as long as the structure is subjected to the prescribed prestress, even when it undertook the lateral load equivalent to the dynamic earth pressure. Based on these experimental results, it was confirmed that the stacking soil-bag structure at the toe of embankment could be a useful countermeasure against the earthquake attacks.

KEYWORDS: Embankment, Aseismic Reinforcing the toe of embankment, Stacking soil-bag, Model tests