

補強砂の衝撃載荷試験方法の検討と 耐衝撃性能評価

篠田 昌弘*

(令和 7 年 9 月 17 日受付：令和 7 年 10 月 16 日受理)

Study on Impact Loading Test Method for Reinforced Sand and Evaluation of Impact Resistance

By Masahiro SHINODA *

This study developed a new impact loading test apparatus to establish a rational evaluation method for the safety performance of new and existing underground shelters. Experimental investigations were conducted on the impact resistance of the surrounding ground of underground shelters. First, to establish an impact loading test method for soil materials, the selection of damping materials to be placed between the projectile and the loading rod was performed. Next, using appropriate damping materials, impact loading tests were conducted using unreinforced sand, sand reinforced with one layer of reinforcement, and sand reinforced with two layers of reinforcement.

Keywords: Impact loading, Damping material, Reinforced sand

1. 背景と目的

日本政府は、日本への武力攻撃に備え、平和と独立、国民の安全を守るための法整備を進めてきた。平成 15 年には「事態対処法」、翌 16 年には「国民保護法」が成立し、国民の生命・財産を守るための避難や救援措置、国・地方公共団体の責務などが規定された¹⁾。これらの法律により、迅速な対応が可能な基本的法制が整備された。

平成 16 年 12 月、「平成 17 年度以降に係る防衛計画の大綱」が閣議決定され、日本の安全保障の目標として①直接的脅威の防止・排除、②国際的な安全保障環境の改善による脅威の回避の 2 点が掲げられ

た。これらの達成に向けて、国際連合の活動支援や諸外国との協調など外交努力を推進し、日米安全保障体制を基盤とした米国との協力強化を図るとともに、日本自身の取り組みや国際社会との連携を統合的に進める方針が示された。国内では、国民保護のための体制整備を平素から行い、国と地方公共団体が緊密に連携して万全の態勢を整えることが求められている。

国民保護法の円滑な執行を目的に、平成 17 年 3 月に基本指針が閣議決定され、同年 10 月には指定行政機関、平成 18 年 3 月には全都道府県の国民保護計画が策定された。市町村や指定公共機関でも計画作成が進められている。政府は、弾道ミサイル攻撃を想定した避難の留意点を明文化した。発射前に着弾地域の特定が困難で、短時間での着弾が予想されるため、影響がある場合は市町村が防災行政無線

** 防衛大学校 システム工学群 建設環境工学科 教授

で特別なサイレン音を用いて発射情報を緊急伝達する。テレビ・ラジオ・緊急速報メールも併用される。避難の基本は、攻撃直後に屋内へ移動し、その後は行政の指示に従うことである。避難先としては、堅牢な建物や地下街などが推奨されている。

現在、日本に対する武力攻撃の可能性が否定できない状況が生まれている。上記のように、政府は国及び国民の安全を保つための必要な法整備を進め、国と地方公共団体とが連携して万全の態勢を整えつつ、各市町村では国民保護計画の作成作業が進められている。しかしながら、政策的議論に比べて地盤工学的な技術的検討は、あまり進んでいない。三大都市圏など、人口密度が高い都市では、住民の生命を護るためには百万人単位の規模のシェルターが必要と考えざるを得ないが、見通しが立っていない。地下避難施設の新規建設や既存施設の地下避難施設化などを積極的に進める必要があるが、弾道ミサイル等による衝撃圧縮荷重に耐える構造物の安全性の合理的な評価法の確立が喫緊の課題である。

地盤工学的観点から、地下避難施設の安全性を確保するための最も重要なことは、地下避難施設建設に適した場所を選定すると同時に十分な地盤調査を実施することである。地下避難施設の建設場所は地下となるため、地下水位による影響評価が必須となる。建設場所が選定できた後、地下空間を構築するために、周辺地盤の安定性を確保するような掘削技術が必要となる。また地震力や衝撃力に対する構造設計も重要となる。地盤工学の分野では、地下避難施設の安全性評価に関して、地盤中の衝撃波伝播に関するシミュレーション²⁾は実施されているものの、衝撃圧縮荷重作用下の地盤の変形強度特性に関する研究は実施されていない。

本研究では、地盤工学的な観点から、地下避難施設の安全性能評価で重要となる衝撃载荷時の地盤挙動に着目した。新たに開発した衝撃载荷試験装置により、無補強砂と補強砂に衝撃圧縮荷重を载荷して载荷時の挙動を比較し、補強砂の耐衝撃性能を評価する。

2. 衝撃载荷試験装置

地盤材料に衝撃圧縮荷重を作用させるために、新たに衝撃载荷試験装置を開発した。開発した衝撃载荷試験装置は、上部の発射装置と下部の三軸セルから構成される。衝撃载荷試験装置の全体の高さは、1974mmであり、三軸セルの高さは912mm、外径550mmである。上部の発射装置部分は、蓄圧タンク（高さ451mm、外径318.5mm）に圧縮空気を蓄圧する構造となっており、空気容量40Lである。蓄圧タンク内には、直径50mm、長さ120mm、衝突面形状円形、重量893gの鉄製の飛翔体が充填されており、かぎ爪で固定されている。蓄圧タンクに高圧縮空気発生装置により最大3MPaまでの空気を蓄圧し、飛翔体固定用のかぎ爪を開放することで、蓄圧タンク内の圧縮空気が飛翔体を押し出す仕組みとなっている。蓄圧タンクから発射された飛翔体は、三軸セルの最上部の载荷ロッド上端に衝突すること

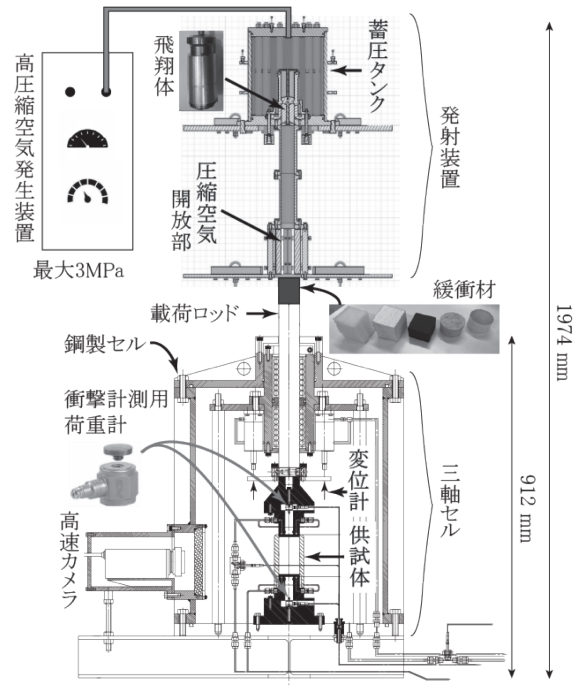


図1 衝撃载荷試験装置

Fig.1 Impact loading test apparatus

で、三軸セル内に準備された地盤供試体に衝撃圧縮荷重を作用させる。飛翔体の速度が速い場合には、地盤供試体には衝撃圧縮荷重が作用する。飛翔体の速度が遅い場合、または飛翔体と載荷ロッドの衝突時間が長い場合には、地盤供試体には圧縮荷重が作用する。本研究では、まずは圧縮荷重載荷時の地盤供試体の挙動を把握することを目的とする。そのため、本研究では、飛翔体と載荷ロッドの衝突時間を長くするため、載荷ロッド上端に緩衝材を設置した。適切な緩衝材の選定については、後述する。なお、三軸セルは、飛翔体の飛散防止のため、鋼製三軸セルとなっている。三軸セルには高速カメラ設置用の台座が設けてあり、この台座に高速カメラを設置することで、衝撃圧縮荷重載荷時の供試体の変形の様子を撮影できる仕様になっている。供試体上部と下部には、キャップとペDESTALが設置してあるが、キャップとペDESTALの内部に衝撃計測用荷重計である ICP 圧力センサが内蔵されており、高サンプリング計測が可能となっている。これまでの研究から衝撃載荷試験では、供試体上下部に設置された荷重計が同じ荷重を示すように緩衝材の選定を実施するが、本研究では衝撃圧縮荷重を十分に低減できなかったため、供試体下部のペDESTALの内部に設置した衝撃計測用荷重計を衝撃圧縮荷重の代表値とした。なお、供試体の変位は供試体上部に設置したレーザー変位計で計測する。載荷速度は、このレーザー変位計の計測結果から算出する。なお、上記の載荷速度は、載荷時の供試体平均変位速度と一致する。

3. 緩衝材の選定と載荷速度の計測

3.1 緩衝材

前述したように、本研究の衝撃載荷試験では、地盤供試体の圧縮挙動を把握することを目的としており、緩衝材の使用により飛翔体が載荷ロッドに衝突する際に発生する振動や衝撃のエネルギーを吸収・散逸させることとした。図2に選定した緩衝材を示

す。緩衝材は、低弾性ゴム（ハネナイト）、コルク、ウレタン（エステル系ポリウレタン）、EPS、吸音材（再生ポリエステル製）の5種類であり、これらの緩衝材を組み合わせたこととした。緩衝材の諸元を表1に示す。緩衝材の組み合わせ例を図3に示す。本研究では、5種類の緩衝材の中から、3種類の緩衝材を選定して、緩衝材の上下を入れ替えて、飛翔体衝突時の振動や衝撃のエネルギーを吸収・散逸させる効果の高い緩衝材の組み合わせを選定することとした。

3.2 緩衝材選定のための衝撃載荷試験

緩衝材の選定で用いた地盤材料は、珪砂6号 ($G_s = 2.675$, $e_{max} = 1.111$, $e_{min} = 0.578$) である。供試体寸法は、直径約 50mm、高さ約 100mm として、供試体作製時の相対密度は約 90% とした。拘束圧は負圧で 20kPa を与えた。供試体は厚さ 0.3mm のメンブレンで覆われており、供試体上下面の拘束はキャップとペDESTALの端面の摩擦により拘束している。発射装置の蓄圧タンクには、75kPa の空気を蓄圧した。本研究における適切な緩衝材の性能は、飛翔体がロッドに衝突する際に発生するパルス状の衝撃圧縮荷重を低減できることと、緩衝材の高い減衰特性により衝突による振動が低減できることとした。

図4に、緩衝材として高さ 30mm の低弾性ゴムを使用した場合のペDESTAL内部に設置した荷重計の時刻歴を示す。図4から、低弾性ゴムを緩衝材として使用した場合、衝突の影響を大きく低減できているものの、荷重が伝わりにくいことが分かった。なお、衝突後に高周波成分を有する振動が発生しているが、これは飛翔体が供試体に衝突した後に発生した応力波の反射で生じたと考えられる。図5に、緩衝材として高さ 30mm の EPS を使用した場合の荷重計の時刻歴を示す。図5から、EPS を緩衝材として使用した場合、衝突の影響をある程度低減できていることが分かった。図4と図5に示した試験結

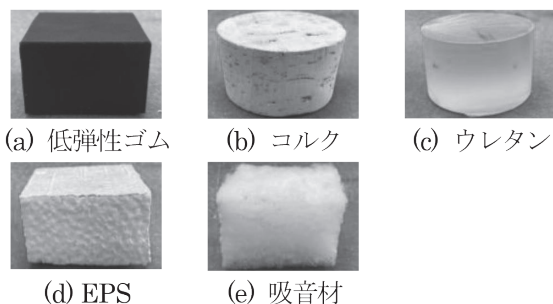


図2 緩衝材

Fig.2 Damping material

表1 緩衝材の諸元

Table 1 Specifications of damping materials

| 名称 | 重さ (g) | 高さ (mm) | 断面積 (mm ²) | ヤング率 (MPa) |
|-------|--------|---------|------------------------|------------|
| 低弾性ゴム | 97.95 | 30.8 | 2509 | 5113 |
| コルク | 14.69 | 29.2 | 2100 | 4160 |
| ウレタン | 73.46 | 30.7 | 1931 | 3560 |
| EPS | 3.52 | 51.1 | 2771 | 3451 |
| 吸音材 | 3.62 | 54.9 | 2555 | 20.4 |

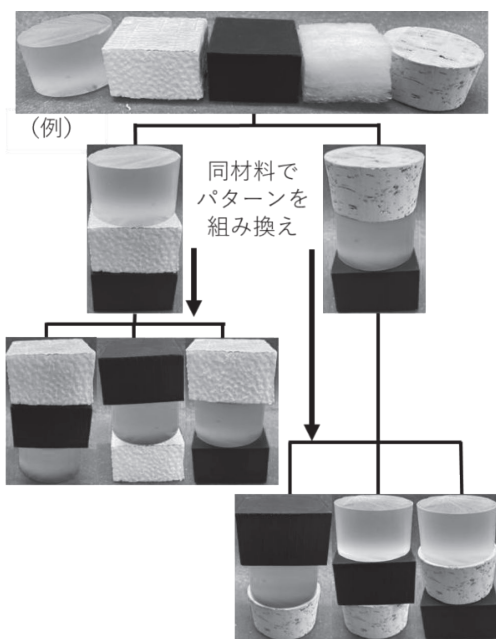


図3 緩衝材の組み合わせ例

Fig.3 Examples of damping material rearrangement

果から、低弾性ゴムと EPS を使用することにより、衝突の影響を低減できることが判明したため、これら二つを組み合わせることで衝撃载荷試験を実施した。試験結果を図6と図7に示す。低弾性ゴムを上、EPSを下に配置した場合、衝突の影響を低減できているが、荷重が伝わっていないことが分かる(図6)。EPSを上、低弾性ゴムを下に配置した場合、衝突の影響を低減しつつ、僅かながら荷重が伝わっていることが分かる(図7)。図7の試験結果にさらに荷重を伝達させるために、EPSの上に、コルクと吸音材を設置して衝撃载荷試験を実施した(図8と図9)。図8は、コルク+EPS+低弾性ゴムを緩衝材とした衝撃载荷試験結果である。図8から、荷重は上手く伝達できているものの、供試体内に振動が発生していることが分かる。図9は、吸音材+EPS+低弾性ゴムを緩衝材とした衝撃载荷試験結果である。図9中には参考までに理想的な荷重の時刻歴を示した。図9から衝突の影響をある程度低減できており、供試体内の振動も少なく、荷重が伝達できていることから、吸音材+EPS+低弾性ゴムの組み合わせが比較的良好な緩衝材の組み合わせと判断した。なお、図2にはウレタンを緩衝材の候補として挙げているが、予備実験でウレタンを緩衝材として使用した衝撃载荷試験を実施したところ、飛翔体衝突時の反発力が強く適切に载荷できなかったため、適切な緩衝材の選定から除外した。

なお、衝撃载荷試験は同じ試験条件で3回実験を実施して、適切に载荷できた試験結果を採用した。衝突時の速度や衝突位置の違いにより実験結果にばらつきが見られたが、大きな影響はないと判断した。

3.3 载荷速度計測のための衝撃载荷試験

一部の地盤材料の応力ひずみ関係は速度依存性がある。そのため、载荷試験時には载荷速度を明示する必要がある。载荷速度の計測で用いた地盤材料は、上記の珪砂6号($G_s = 2.675$, $e_{max} = 1.111$, $e_{min} = 0.578$)に加えて、いわき珪砂($G_s = 2.720$, $e_{max} =$

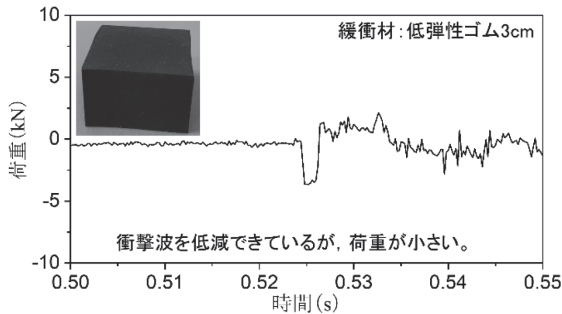


図4 荷重時刻歴（緩衝材：低弾性ゴム 30mm）

Fig.4 Time history of load (damping material: low-elasticity rubber, 30 mm)

1.394, $e_{min} = 0.863$) と珪砂 8 号 ($G_s = 2.623$, $e_{max} = 1.699$, $e_{min} = 1.098$) を用いた。さらに、拘束圧を 20kPa、50kPa、75kPa と変化させて衝撃载荷試験を実施した。発射装置の蓄圧タンクには、75kPa の空気を蓄圧した。载荷速度は、図 1 に示すように供試体上部に取り付けた 2 つのレーザー変位計により計測した。なお、緩衝材は、吸音材 + EPS + 低弾性ゴムの組み合わせとした。

異なる地盤試料、異なる拘束圧における载荷速度を図 10 に示す。図 10 から、载荷速度は試料の種類に依存して異なることが分かった。なお、粒径が最も細かいのは珪砂 8 号であることから、用いる粒度により载荷速度が異なる可能性がある。試験結果から、拘束圧と载荷速度には規則性が認められなかつ

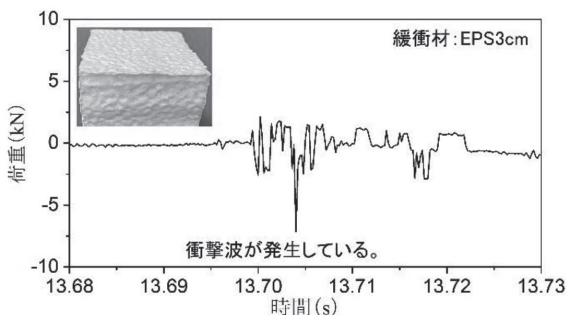


図5 荷重時刻歴（緩衝材：EPS 30mm）

Fig.5 Time history of load (damping material: EPS, 30 mm)

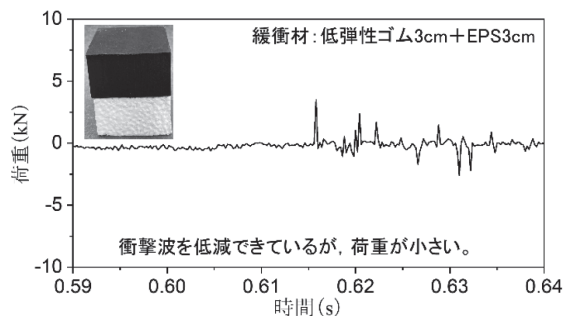


図6 荷重時刻歴（緩衝材：低弾性ゴム30mm + EPS30mm）

Fig.6 Time history of load (damping material: low-elasticity rubber, 30 mm + EPS, 30 mm)

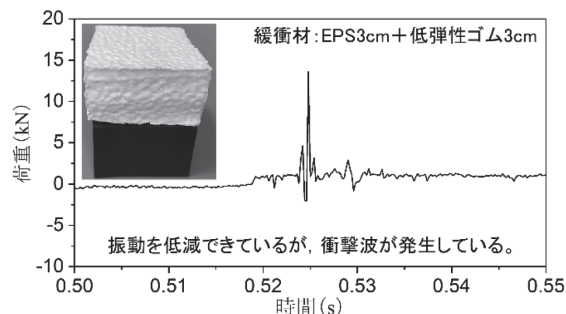


図7 荷重時刻歴（緩衝材：EPS30mm + 低弾性ゴム 30mm）

Fig.7 Time history of load (damping material: low-elasticity rubber, 30 mm)

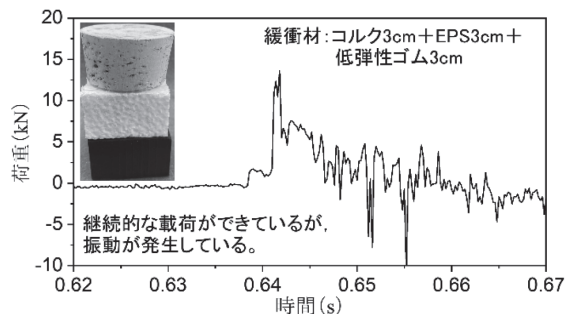


図8 荷重時刻歴（緩衝材：コルク 30mm + EPS 30mm + 低弾性ゴム 30mm）

Fig.8 Time history of load (damping material: cork, 30mm + EPS, 30 mm + low-elasticity rubber, 30 mm)

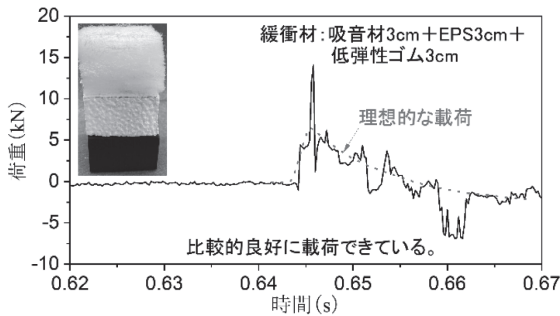


図9 荷重時刻歴（緩衝材：吸音材 30 mm + EPS 30 mm + 低弾性ゴム 30 mm）

Fig.9 Time history of load (damping material: sound-absorbing material, 30 mm + EPS, 30 mm, low-elasticity rubber, 30 mm)

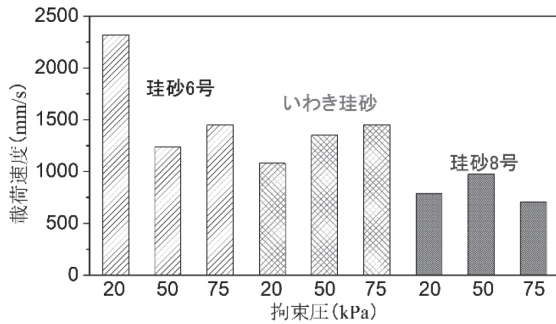


図10 衝撃载荷試験の载荷速度

Fig.10 Loading speed of Impact loading test

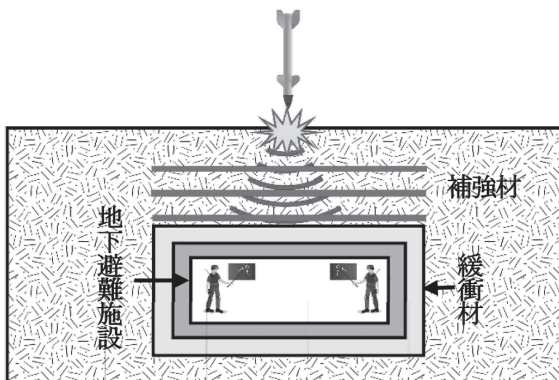


図11 地下避難施設周辺の地盤補強

Fig.11 Ground reinforcement around underground shelters

た。開発した衝撃载荷試験装置では、発射装置の蓄圧タンクに 75kPa の空気を蓄圧することで、最大で約 2,300mm/s の速度で载荷可能であることが分かった。

4. 補強砂の衝撃载荷試験

4.1 はじめに

地下避難施設の耐衝撃性能を向上させるためには様々な対策がある。例えば、図 11 に示すように、地下避難施設周囲に緩衝材を設けたり、地下避難施設上面の地盤補強が挙げられる。本研究では地下避難施設周辺地盤の補強に着目した。金属や樹脂で製作された格子状、帯状、シート状の補強材による地盤補強は施工が容易で経済性も高いことから、近年では多くの土木工事で採用されている。地下避難施設の周辺、特に地下避難施設上部に補強材を水平方向に敷設することによる地盤補強を施すことで、地下避難施設の耐衝撃性能の向上が期待できる。なお、実際の地下避難施設上部に敷設する補強材は、格子状の補強材を想定している。本研究では、金属製の補強材で補強された砂の耐衝撃性能を要素実験で調べることにした。なお、本研究における事前検討によれば、拘束圧 50kPa 下での珪砂 6 号 ($G_s = 2.675$, $e_{max} = 1.111$, $e_{min} = 0.578$, 相対密度約 75%) を用いた静的载荷試験のせん断強度は、約 250kPa であった。

4.2 試験条件

衝撃载荷試験で用いた地盤試料は、珪砂 6 号 ($G_s = 2.675$, $e_{max} = 1.111$, $e_{min} = 0.578$) とした。試験条件は、蓄圧タンクの空気圧力を 75kPa とし、拘束圧を 20kPa、50kPa、75kPa の三種類とした。供試体寸法は、緩衝材選定のための衝撃载荷試験と同様に、直径約 50mm、高さ約 100mm とし、供試体作製時の相対密度は約 90% とした。供試体上下面の拘束は、緩衝材選定のための衝撃载荷試験と

同様に、キャップとペダスタルの端面の摩擦により拘束している。供試体は図 12 にリン青銅片で製作した補強材を示す。リン青銅片は、長さ 50mm、幅 3mm、厚さ 0.1mm であり、4 枚のリン青銅片を放射状に組み合わせて補強材を作製した。補強材表面の摩擦力を付加するため、珪砂 6 号を接着剤で補強材表面に貼り付けた。補強材を 1 枚もしくは 2 枚を珪砂 6 号の中に水平に敷設することで、補強砂を作製した。敷設した補強材の位置を図 13 に、供試体中の補強材を図 14 に示す。

4.3 試験結果

図 15 から図 17 に、拘束圧 20kPa での衝撃載荷試験における無補強砂、補強材 1 枚による補強砂、補強材 2 枚による補強砂の応力ひずみ関係を示す。図 15 から図 17 の軸差応力は主応力差である。図中のせん断強度は、軸差応力の最大値とした。無補強砂の場合では、明確なピークは発揮せず、供試体がせん断破壊した (図 15)。無補強砂のせん断強度は、1,396kPa であった。補強材 1 枚による補強砂では、ひずみ 4.5% と 6.9% 付近でピークを發揮し、6.8% ひずみでせん断強度 5,986kPa を示した (図 16)。補強材 2 枚による補強砂では、ひずみ 5.4% と 7.0% 付近でピークを發揮し、7.0% ひずみでせん断強度 18,745kPa を示した。

図 18 に補強材枚数に応じたせん断強度を示す。図 18 より、補強材枚数が増加するほど、せん断強度が増加することが分かる。補強材敷設による強度増加のメカニズムについては、載荷時の地盤材料のせん断変形を妨げようと補強材張力が增加することで、地盤材料の拘束圧が増加して、せん断強度が増加すると考えられている。上記は一般的な低速載荷時のメカニズムであるが、高速載荷時でも同様なメカニズムが發揮したと考えられる。

図 19 に補強材枚数に応じた載荷速度を示す。なお、前述したように、この載荷速度は載荷による発生した供試体の変位速度と一致する。補強材枚数が

増加することで、変形が抑制されて載荷速度が低下したと考えられる。本試験装置では、載荷速度の制御が困難であるが、蓄圧タンクの圧力を増加させて、飛翔体の発射速度を向上させることで、載荷速度の制御方法を検討する必要がある。なお、キャップ底面から最上部の補強材位置が浅くなったことによる強度増加の影響については、別途実験的検討が必要である。

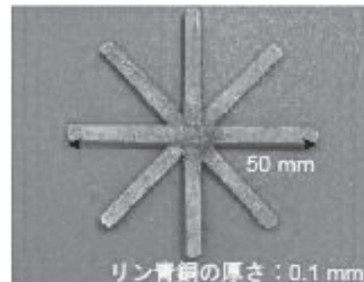


図 12 補強材

Fig.12 Reinforcement

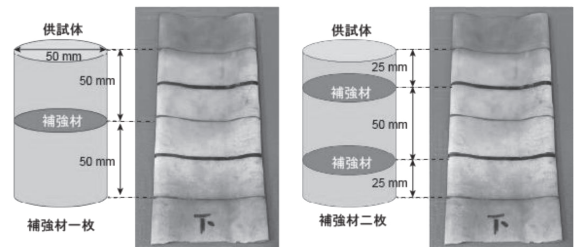


図 13 供試体における補強材の位置

Fig.13 Reinforcement location of specimen

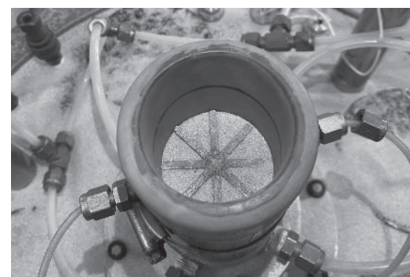


図 14 供試体への補強材の設置

Fig.14 Installation of reinforcement on test specimen

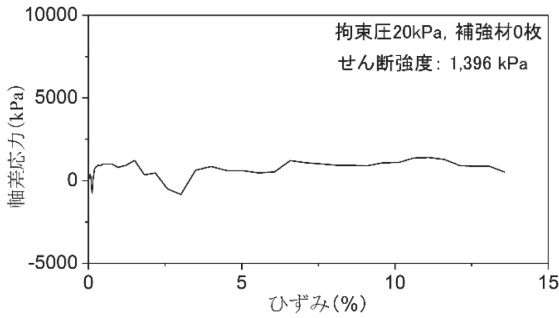


図 15 無補強砂の応力ひずみ関係

Fig.15 Stress strain relationship of unreinforced sand

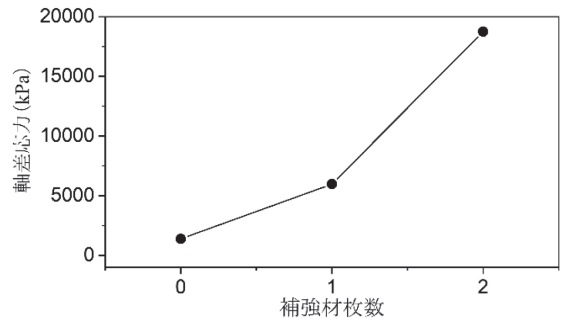


図 18 補強材枚数に応じたせん断強度

Fig.18 Shear strength according to the number of reinforcements

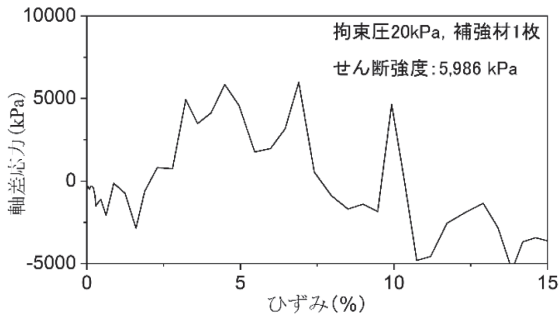


図 16 補強砂の応力ひずみ関係 (補強材 1 枚)

Fig.16 Stress strain relationship of reinforced sand by a reinforcement

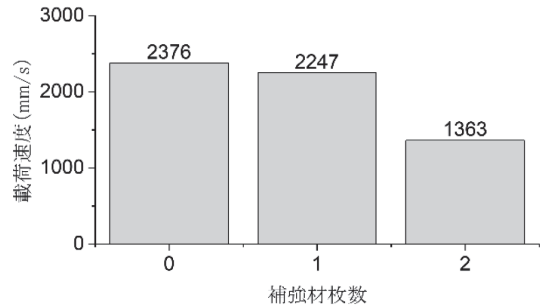


図 19 補強材枚数に応じた載荷速度

Fig.19 Loading speed according to the number of reinforcements

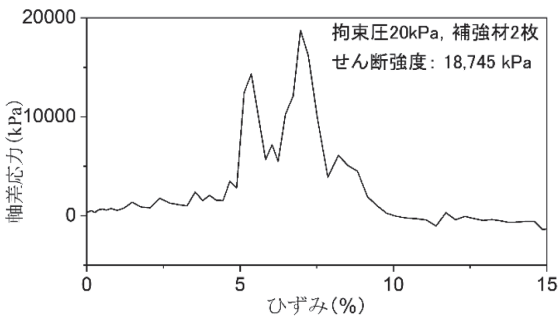


図 17 補強砂の応力ひずみ関係 (補強材 2 枚)

Fig.17 Stress strain relationship of reinforced sand by two reinforcements

5. まとめ

本研究では、新設や既設の地下避難施設の安全性能の合理的な評価法を確立するため、新たに衝撃載荷試験装置を開発して、地下避難施設周辺地盤の耐衝撃性について実験的検討を実施した。まず、地盤材料を対象とした衝撃載荷試験方法確立のため、飛翔体と載荷ロッドの間に設置する緩衝材の選定を実施した。低弾性ゴム、コルク、ウレタン、EPS、吸音材の5種類の材料を組み合わせる最適な緩衝材を選定した。次に、適切な緩衝材を用いて、無補強砂、補強材1枚による補強砂、補強材2枚による補強砂を用いて衝撃載荷試験を実施した。上記から以下の

ことが分かった。

- ① 衝突の影響が低減できており、供試体内の振動も少なく、荷重が伝達できていることから、適切な緩衝材は、吸音材 + EPS + 低弾性ゴムの組み合わせであることが分かった
- ② 地盤材料中に敷設した補強材枚数を増やすことで、地盤材料のせん断強度が大きく増加した。このことより、地下避難施設周辺地盤に補強材を敷設することで、地下避難施設の周辺地盤が衝撃圧縮荷重を負担可能であり、地下避難施設の耐衝撃性向上が期待できる。

参考文献

- 1) 内閣府：内閣官房国民保護ポータルサイト, <https://www.kokuminhogo.go.jp/gaiyou/yujikanrensei/kihonshishin.html>, (参照 2025-08-29).
- 2) 竹宮宏和、合田和哉：衝撃／移動荷重による剛基礎上の成層地盤の波動伝播／非伝播現象、土木学会論文集、No.605/I-45 (1998), pp. 161-169.