

令和元年5月14日現在

機関番号：82723

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2018

課題番号：17K18964

研究課題名（和文）爆発作用を想定した超高速載荷時の地盤の不安定化現象の解明

研究課題名（英文）Elucidation of instability phenomenon of geomaterial at ultra-high speed loading using explosive force

研究代表者

宮田 喜壽（Miyata, Yoshihisa）

防衛大学校（総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工・システム工学群・教授

研究者番号：20532790

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、地盤材料を対象とした高速載荷実験を実施して、超高速載荷時の地盤の不安定化現象を解明することである。本研究では、新たに開発した試験装置を用いて、地盤材料と斜面地盤の高速載荷実験、高速載荷時の地盤材料の強度特性の把握、斜面安定解析を実施した。高速載荷試験で得られた地盤の強度定数は、静的載荷試験結果から得られた強度定数と比較すると、内部摩擦角が減少して、粘着力が増加する結果となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の意義は、危機管理学と地盤工学の境界分野として、爆発テロによる脅威を正しく認識し、その現象を把握することである。本研究で着目した爆発テロによる作用は人為的作用であり、その現象は根本的に異なる。すなわち、これまで蓄積した地盤の荷重-抵抗関係を適用できず、新たな荷重-抵抗関係を実験的に求める必要がある。本研究の成果により、超高速載荷時の地盤の挙動が把握でき、落石防護工設計や航空機等の離着陸時の路盤設計の高度化につながるなど、発展性が高い。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to clarify the instability of the geomaterial under ultra-high-speed loading by a newly developed loading apparatus. In this study, using the loading apparatus, we carried out high-speed loading tests of the geomaterial and slope, investigated the strength characteristics of the geomaterial during high-speed loading, and carried out slope stability analysis. The geomaterial strength parameters obtained in the high-speed loading test decreased the internal friction angle and increased the cohesion as compared with the strength parameters obtained from the static loading test.

研究分野：地盤工学

キーワード：爆発作用 超高速載荷 地盤材料の変形強度特性 斜面 安定解析

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

我が国における爆発テロ事件は、1974年東アジア反日武装戦線による連続爆破、1985年シーク教徒過激派による成田空港手荷物爆破などが知られているものの、1995年オウム真理教による東京都庁小包爆破事件以降は、20年間にわたり深刻な爆発テロ事件は起きていない。最近では、死傷者はでなかったものの、2015年11月には靖国神社爆発テロ事件が発生している。一方で世界に目を移せば、2002年10月バリ島、2005年7月ロンドン、2013年4月ボストン、2015年8月バンコク、2015年10月パリと2000年以降その頻度は増加傾向にある。大規模な爆発によるテロが起こった場合、爆発による直接的な人的・物的な被害もさることながら、国の経済の低迷を引き起こすことはアメリカの9.11テロによって示されている（アメリカに与えた経済的損失は3.3兆ドルと言われている）。我が国においても、爆発テロの脅威はゼロではなく、各分野の研究者や技術者が爆発テロによる施設への影響評価に関する研究を始める時期に来ている。上記の状況を鑑み、地盤に関連する爆発テロの脅威を少しでも低減させるため、危機管理学と地盤工学を融合させる研究が必要であると考えた。危機管理学は、個人や国家、企業などの組織を脅かす危機の実態を分析し、その防止策や対応策に資する学問であり、地盤工学との境界領域に属する。我が国における危機管理学は積極的に取り扱われてこなかったが、米国では重要分野の一つとされており、我が国は遅れている状況にある。一方、これまでの土木構造物の安全性は、主に、風作用、地震作用、降雨作用、波浪作用、温度作用、環境作用など自然現象に基づいたものである。本研究で着目した爆発テロによる作用は人為的作用であり、その現象は根本的に異なる。すなわち、これまで蓄積した地盤の荷重-抵抗関係を適用できず、新たな荷重-抵抗関係を実験的に求める必要がある。

地盤材料の高速載荷時の変形強度特性に関する検討は数例ある。例えば、Yamamuro et al. (2011)らは、相対密度約36%と58%の乾燥砂に対して、拘束圧98kPaと350kPa、ひずみ速度は0.0022%/s~1750%/sで三軸圧縮試験を実施した。載荷方法は重錘落下である。ひずみ速度が増加すると、最大荷重下の軸ひずみは減少すること、ダイレタンシーによる体積増加が大きくなること、軸ひずみ1%における接線剛性が増加すること、最大主応力比が増加することを示した。一方、Tatsuoka et al. (1999)は、密な豊浦砂に対して、0.0000417%/sから0.0021%/sの載荷速度で三軸圧縮試験と平面ひずみ試験を実施した。彼らは、試験結果から一定のひずみ速度における載荷では大きな影響は見られないが、載荷途中でひずみ速度を急変させると大きな影響があることを示した。

2. 研究の目的

2001年9月の米国同時多発テロ事件以降、マドリッドの列車爆破テロ、ロンドンやベルギーの同時爆破テロなど、公共交通機関を標的としたテロ事件が世界で相次いでいる。テロの手段は爆発物が最も多く、テロの半数以上を占めている。構造物に対する爆発作用は、2015年に公表されたIS02394第4版General principles on reliability for structuresでも代表的なハザードの一つ、『Bomb explosion』として取り上げており、2001.9.11に発生した米国の同時多発テロ以降、より重要になったと明文化している。交通インフラが爆破された場合には、載荷速度が通常とは異なる超高速載荷状態となり、衝撃波が発生する。つまり、衝撃波の影響を考慮した現象解明が重要となる。コンクリートの分野では高速載荷時の挙動に関する実験的研究は行われているが、地盤工学の分野では既往の研究事例が極めて少ない。要素実験では、Yamamuro et al. (2011)によるひずみ速度1750%/sによる地盤材料の応力-ひずみ関係に関する研究が挙げられるが、模型実験では設備が大がかりとなることから研究事例は極めて少なく、超高速載荷時における地盤の不安定化現象は解明されていない。そこで本研究では、高速載荷時の地盤の不安定化現象を解明することを目的として、実験的研究を実施した。

3. 研究の方法

平成29年度の当初の研究計画は、防衛大学校内で管理しているプラスチック爆薬の一種であるC4爆薬を用いて、斜面地盤の高速載荷実験を実施することであったが、載荷試験の安全性を確認するため、最初に新規開発した高速載荷装置による重錘落下試験を実施して、高速載荷時の地盤材料の強度特性を把握することとした。平成30年度には、当初の計画通り、防衛大学校内の爆発実験棟内において、C4爆薬の爆発作用を利用した地盤材料と斜面の高速載荷実験を実施した。

(1) 高速載荷可能な試験装置の開発

既往の研究を参考にして、拘束圧はセル水を使用せず、空気圧で載荷できるようにするとともに、セルを極力大きくした（図1、図2）。拘束圧を載荷する際に、載荷ロッドの浮上防止のため、セル内部にペロフラムシリンダーを設置した。荷重の伝播を測定するため、キャップとペダスタルはひずみゲージ型の荷重計を兼ねた特殊なも

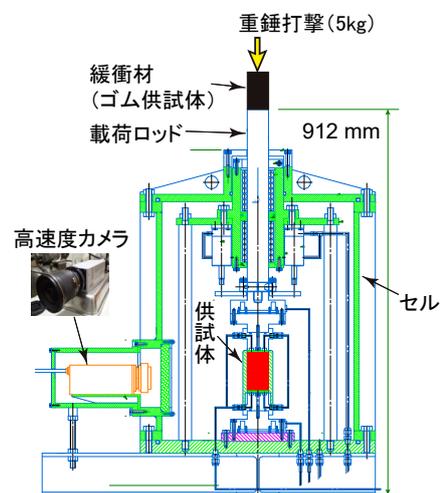


図1 高速載荷試験装置断面図

のとした。爆風を広い面積で受けられるように
 載荷軸を直径 50mm として、爆風に耐えられる鋼
 製の三軸セルを設計・製作した。さらに、高速
 載荷時の挙動観察のため、防衛大学校所有の変
 位計と耐 G 性能を有する毎秒 5,000 コマの高速
 速度カメラを用いて、高速載荷時の地盤材料の変
 形挙動を観察できる仕様とした。

(2) 重錘落下による地盤材料の高速載荷試験

本研究で用いた地盤材料は、珪砂 6 号 ($G_s = 2.64$, $e_{max} = 0.924$, $e_{min} = 0.588$) であり、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 75% とした。手動による重錘落下試験の試験方法を確立するため、ロッド直上に設置する緩衝材を 2 種類 (緩衝材 A と緩衝材 B) 用意して、比較実験を行った。緩衝材 A と B の両方とも直径 5cm 円柱型である。緩衝材 A は比較的固いゴムであり、緩衝材 B は比較的固いゴムの間にスポンジを挟んでいる。緩衝材を変えた比較実験結果から、適切な緩衝材を選定した後、拘束圧を 20kPa、50kPa、100kPa、200kPa と 4 種類に変化させて、重錘落下試験を実施した。拘束圧が 20kPa と 50kPa の場合には負圧を用いて、拘束圧が 100kPa と 200kPa の場合にはセル圧 (空気圧) を用いた。重錘落下試験の様子を図 3 に示す。本試験では、重さ 5kg の重錘を図 3 で示すように、ロッド直上から人力で落下させて供試体に載荷した。

(3) 爆発作用を利用した地盤材料と斜面の高速載荷実験

新規に開発した高速載荷試験装置の載荷ロッドの上部に底面 5cm×5cm の EPS 製のスペーサーを設置した後、スペーサー上部に C4 爆薬を載せて 6 号電気雷管により爆発させた

(図 4、図 5)。1 回目の載荷では、スペーサー 5cm、C4 爆薬 6g、2 回目の載荷では、スペーサー 3cm、C4 爆薬 6g、3 回目の載荷では、スペーサー 1cm、C4 爆薬 10g で段階的に載荷を行った。地盤材料、供試体の寸法および相対密度は、重錘落下試験と同様とした。拘束圧は 20kPa として、負圧で作用させた。斜面模型は、爆発ピットの壁面を利用して、高速載荷試験装置の近傍に構築して同時載荷とした。斜面の法面法線方向からの載荷とした。法面勾配 1:1.5 として、斜面高さは 50cm とした。

(4) 斜面の安定解析

上記の地盤材料に対する高速載荷試験結果から、地盤材料の強度定数を把握した後、斜面の安定解析を実施した。土質の単位体積重量は、 18kN/m^3 で一定として、強度定数は一般的な載荷速度で得られた定数と、高速載荷試験で得られた定数を用いて安全率を算定し、比較検討を実施した。斜面の高さは、3.0m、6.0m、9.0m、12.0m、15.0m として、鉄道標準に準拠した盛土形状とした。

4. 研究成果

(1) 高速載荷可能な試験装置の開発

図 6 に重錘落下試験時の高速度カメラの撮影画像を示す。写真のぶれがない状態で毎秒 5,000 コマで撮影可能なことを確認した。

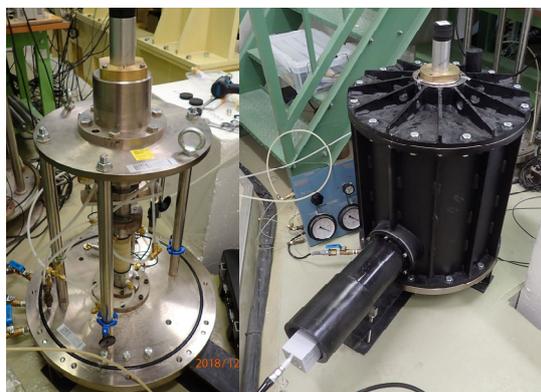


図 2 製作した高速載荷試験装置、左図：セルを外した場合、右図：セルをかぶせた場合



図 3 重錘落下試験の様子



図 4 爆発実験棟内の高速載荷試験装置



図 5 爆発作用を利用した載荷試験の準備状況

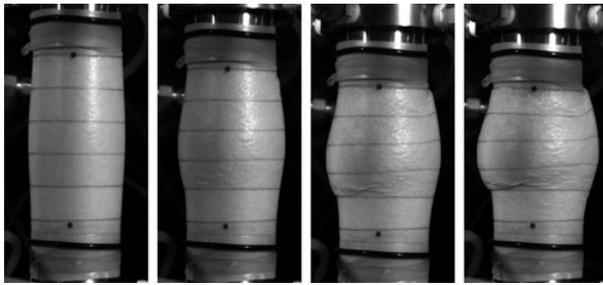


図6 高速荷重時の供試体の圧縮状況

(2) 重錘落下による地盤材料の高速荷重試験

図7と図8に拘束圧を20kPa、50kPa、100kPa、200kPaとした場合の上部荷重計と下部荷重計で計測した応力—ひずみ関係を示す。拘束圧100kPaと200kPaの場合では、1回の荷重で軸ひずみが15%に満たなかったため、複数回実施した。図7と図8から上部荷重計と下部荷重計で計測した応力—ひずみ関係が異なることが分かる。さらに、上部荷重計の値にはピークが表れているものの、下部荷重計の値には明確なピークが見られなかった。これは、重錘落下による衝撃荷重が上部荷重計で計測されるものの、下部荷重計では供試体内の減衰のため計測されていないことが原因と考えられる。図7と図8から、拘束圧が増加するにつれて、強度が増加する結果となった。既往の研究から荷重速度が1mm/minでは、強度定数は内部摩擦角が42°、粘着力が6.6kPaであることが分かっているが、本試験から、荷重速度を約40,000mm/min以上に速くすると、上部荷重計と下部荷重計で測定した場合には、内部摩擦角が31.2°と28.9°、粘着力が122.2kPaと23.4kPaなり、静的荷重試験結果から得られた強度定数と比較すると、高速荷重試験で得られた強度定数は、内部摩擦角が減少して、粘着力が増加する結果となった。

(3) 爆発作用を利用した地盤材料と斜面の高速荷重試験

図9に爆発作用による高速荷重試験による応力—ひずみ関係を示す。爆発作用による高速荷重試験では、試験装置の底盤を爆発ピット内の地盤に埋設して反力をとったものの、爆発による衝撃により試験装置全体が振動した。この振動は荷重試験中に計測した動画からも観察できた。爆発作用による高速荷重試験では、荷重ロード上部に設置したスペーサーの高さとC4爆薬の量を変えて実施しているが、図9には応力—ひずみ関係を連続して記載した。図9から、爆発による衝撃により応力が振動していることが分かる。しかしながら、振動の基線は静的荷重や重錘落下試験結果とほぼ同じであることが確認できた。以上より、爆発作用による高速荷重では、明確な荷重速度依存性は確認できなかった。また、同時に行われた斜面の荷重試験では斜面は崩壊しなかった。

(4) 斜面の安定解析

図10に静的・高速荷重試験から得られた強度定数を用いた安定解析結果を示す。盛土高さが高い場合には、粘着力の影響が大きいため、粘着力の大きい高速荷重試験から得られた強度定数を用いた方が、安全率が高くなった。一方、高速荷重試験で得られた強度定数は相対的に内部摩擦角が小さいため、盛土高さが高さに応じた強度増加率が相対的に小さいため、安全率が小さくなった。

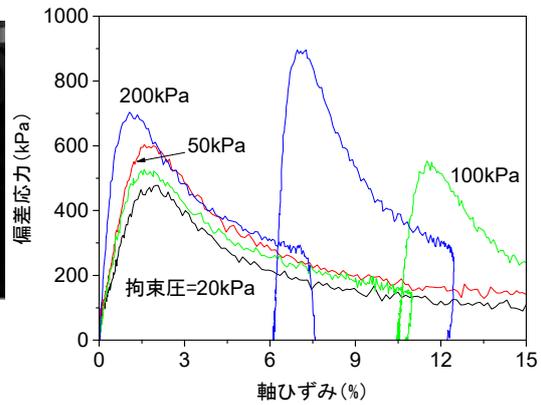


図7 重錘落下試験による応力—ひずみ関係 (上部荷重計で応力計測)

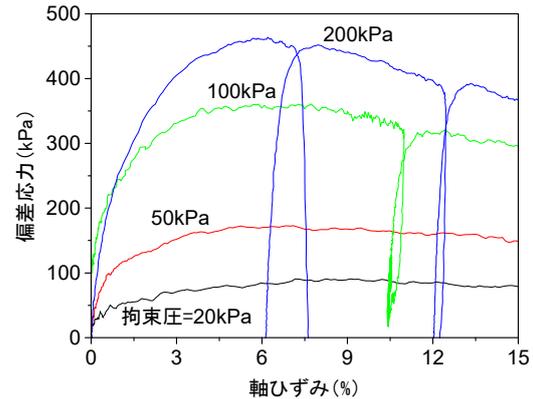


図8 重錘落下試験による応力—ひずみ関係 (下部荷重計で応力計測)

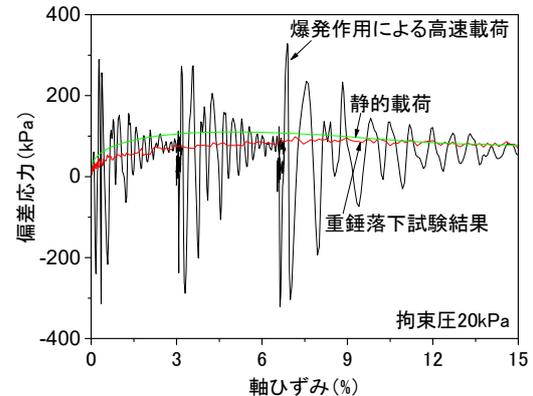


図9 爆発作用による高速荷重試験による応力—ひずみ関係

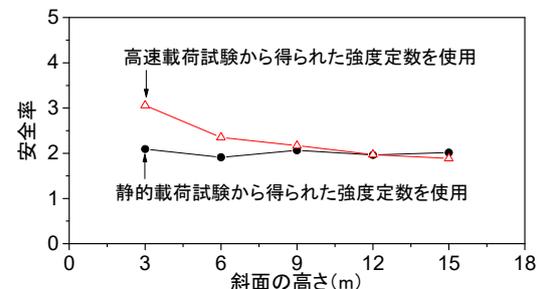


図10 静的・高速荷重試験から得られた強度定数を用いた安定解析結果の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計0件）

〔学会発表〕（計3件）

- ① 君島奈々美、篠田昌弘、宮田喜壽（2019）高速載荷試験装置の開発と砂質地盤材料の高速載荷実験、第46回土木学会関東支部技術研究発表会
- ② 篠田昌弘、宮田喜壽（2018）砂質地盤材料を用いた高速載荷試験方法の検討、土木学会第73回年次学術講演会
- ③ 大沼直観、篠田昌弘、宮田喜壽（2018）砂質地盤材料の超高速載荷装置の開発と三軸圧縮試験、第45回土木学会関東支部技術研究発表会

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

なし

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：篠田昌弘

ローマ字氏名：Shinoda Masahiro

所属研究機関名：防衛大学校

部局名：システム工学群建設環境工学科

職名：准教授

研究者番号（8桁）：30462930

研究分担者氏名：別府万寿博

ローマ字氏名：Beppu Masuhiro

所属研究機関名：防衛大学校

部局名：システム工学群建設環境工学科

職名：教授

研究者番号（8桁）：90532797

(2) 研究協力者

なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。