

(1) 実施機関名：

立命館大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

（和文）アナログ実験による表層地盤の強震動応答のモデル化

（英文）Modeling strong motion response of shallow subsurface ground through analog experiments

(3) 関連の深い建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震の災害誘因の事前評価手法の高度化

ア. 強震動の事前評価手法

(4) その他関連する建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震の災害誘因の事前評価手法の高度化

ウ. 地震動に起因する斜面変動・地盤変状の事前評価手法

(5) 本課題の5か年の到達目標：

地盤の応答特性（地震波速度、ピーク周波数など）は強震動によって変化することがあり、数ヶ月～数年という長期間をかけて回復するような粘弾性的ふるまいを示すケースについても報告されている。一方、2016年4月に発生した熊本地震は顕著な例であるが、数分～数週間という短期間のうちに同じ場所で繰り返し強震動が観測される事例も知られている。強震動を短期間のうちに繰り返し経験する場合、2回目以降の地盤の応答特性は、直前の強震動により変化した地盤特性の影響を強く受ける。強震動による地盤の応答特性変化とその回復過程は、地表約100 m以浅の表層地盤の粘弾性的性質に起因すると考えられているものの、未だモデル化には至っていない。繰り返し強震動が作用した場合に、その前後、および経時的に表層地盤の応答特性がどのように変化するかについて定量モデルを作成することは、適切な地震動を予測するうえで重要である。

また表層地盤は、空隙を多く含む強い不均質を持つ媒質であり、高周波数帯の波を考える場合には、この不均質は無視することができない。弱い不均質を持つ媒質に対しては、ランダム媒質を仮定した定量的なモデル化がなされており、波動場を計算できるシミュレーション＝コードも公開され、広く利用されている。一方、空隙のような強い不均質を持つ媒質に対しては、弾性的な応答に限った場合においても、波動の伝播を適切に評価できる手法がなく、新たな手法の開発が求められている。実験室においても、鉱物不均質などの弱い不均質を含む場合においては詳細な計測例があるものの、高空隙率媒質の詳細な弾性波計測は、散乱による減衰が強くなることなど高度な技術を要することもあり、実施事例は少なく、波動場計算の手法が構築されたとしても、どの程度実際の波動場をうまく近似できているかを評価できる状況にない。

本研究は、主として実験・計測を通じて、上記の課題に取り組むものである。

(6) 本課題の5か年計画の概要：

【模擬表層地盤に対する繰り返し強震動入力試験】強震動の強さ・特徴的な周波数・継続時間・発生前隔などの入力の特性、および地盤の空隙率などのシステムの特性をさまざまに変化させながら、強震動を繰り返し入力した場合に、地盤応答特性がどのように変化するかを実験的に明らかにし、定量的なモデル化を目指す。

まず、模擬的な砂層地盤を作成し、地盤内に応答測定用の加速度計アレイを構築する（R6年

度)．応答特性は、地盤を変形させない程度の微弱な『モニタリング用の弾性波』を断続的に地盤に与え、透過させることによって計測する(R6-R7年度)．次に、1度の強震動が与えられた場合に地盤の応答特性がどのように変化するかを調べる．強震動は模擬砂層地盤の下に設置する振動台を振動させることによって平面波的に与える．強震動入力前後、およびその後の経時的な透過弾性波のピーク周波数の変化、複素インピーダンスの時間変化などを推定することにより、強震動応答の特徴を定量的に評価する(R7-R9年度)．さらに、1度の強震動が与えられた場合と同様の方法で、繰り返し強震動が与えられた場合の地盤応答特性の粘弾性変化を調べ、1度の強震動が与えられた場合の結果との時間依存性の違いについて検討する(R8-R10年度)．模擬砂層地盤の素材については、制御が容易なシリコンが混ぜ合わされた砂から開始し、計測技術を確立したのちに(R6-R8年度)、含水量や空隙率の異なる砂層を作成して試験を継続する(R8-R10年度)．これらの試験を通じて、強震動が入力された場合に、地盤応答特性がどのように変化するかを実験的に明らかにする(R9-R10年度)．

【高空隙率の媒質に対する透過弾性波計測試験】弾性波速度が数km/s程度のセメントモルタル、1 km/s弱の石膏に、数100 m/s程度の空隙など含ませることでモデル媒質を作成する(R6-R7年度)．必要に応じて高空隙率の凝灰岩などの天然の岩石も活用する．弾性波速度と入力周波数を変えることにより波数に幅を持たせ、また空隙サイズを変えることにより特徴的な不均質スケールに幅を持たせる．波長で規格化された不均質スケールと伝播距離の関係において、実際の表層地盤の模擬として適切な範囲で媒質と入力周波数を変化させる(R6-R8年度)．挙動が単純な等価均質媒質から計測を開始させ(R6-R7年度)、弱い不均質を持つ媒質、波線理論が適用できる成層構造媒質など、既存の枠組みで定量的な説明が可能なモデルへと変化させ、最後に空隙を多く含む強い不均質を持つ媒質へとモデル媒質を発展させる(R8-R9年度)．計測によって得られた記録を解析し、強い不均質を持つ媒質に対する弾性波の透過特性を明らかにする(R8-R10年度)．

(7) 令和6年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

【模擬表層地盤に対する繰り返し強震動入力試験】強震動による表層地盤の弾性波応答特性の変化を調べるための実験装置の整備を実施した(写真1)．強震動は模擬砂層地盤の下に設置された振動板により水平方向成分が与えられ、これとは別にモニタリング用の微弱な振動が埋設された振動スピーカーより断続的に放射される．これらに対応する振動は同じく埋設されている加速度計によって記録され、連続収録される．この装置を用いることにより、定量的に模擬砂層地盤の弾性波応答特性、ならびにその強震動による影響を評価できるようになった．

【高空隙率の媒質に対する透過弾性波計測試験】不均質媒質に対する弾性波の伝播特性は、不均質の空間的な分布、不均質の特徴的なサイズ、弾性波の波長、不均質の強さなどのさまざまな要素が複合的に絡み合っており決まる．特に多孔質媒質における弾性波の伝播特性は、地表付近の地震波の振る舞いを検討する際などにおいて重要である．強い不均質を持つ媒質として、セメントモルタル中に人工的に空隙を埋設した単純な円柱形の模擬媒質を作成し、この媒質に弾性波を透過させ、その応答を計測した．空隙は中空のPP球によって実現させ、ある円柱断面に約45度間隔で8個のPP球をほぼ円周状に配置し、中心のものと合わせて9個を配置した(写真2)．別の円柱断面にも、互いにPP球の位置が円柱断面の直交方向から見て約22.5度ずつずれるようにしながら同様に配置した．弾性波計測は正確な波動を計測するために、Nishizawa *et al.* (1997, BSSA)などによって提案されているレーザードップラー速度計(LDV)を採用した．片方の端面の中央に送信用の厚み振動型圧電振動子を貼り付けて、繰り返し電圧パルスを加えることで弾性波を繰り返し放射させた．LDVは直交する3方向で受信し、3成分波形を得た．LDVは正確かつ振動方向が明確な波動を計測することができる反面、ノイズの影響を受けやすい．そのため得られた弾性波を確認したところ、硬質岩よりも有意に信号強度が低く、600 kHz程度までしか信号強度が十分ではないことが判明した．これはセメントモルタルを硬化させる際に、PP球以外の小規模な空隙が形成されてしまい、散乱減衰の影響が大きくなったことが原因であると推定される．そこで、セメントモルタルの硬化方法について再検討し、低空隙率で透過率を向上させたセメントモルタル媒質の作成手順の目途を立てることができた．

また、高空隙率媒質の弾性波伝播特性の理解を深化させるために、青森県今別市で取得された多孔質安山岩の不均質特性を参考にして計算モデルを作成し、OpenSWPC (Maeda *et al.*, 2017, EPS)を利用して3次元差分法による波動伝播シミュレーションを実施し、Matsuda *et al.* (2023, AGU)によって計測済み波形記録との比較をおこなった．空隙のサイズと位置が波動場形成に強く影響していることを支持する計測波形と計算波形の一致が見られ、アレイ状の複数観測点で得られた波形から不均質の

位置やサイズが推定できる可能性が示唆された。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

表層地盤が強震動に及ぼす影響に関する知見を増やすことができれば、強震動予測の精緻化など災害軽減に資するものとなる。強震動入力試験については装置が整備されたので、次年度以降にデータを得られることが期待される。また、高い空隙率を持つ媒質に対する弾性波の伝播特性についての知見を得る準備を進めているが、この成果もより現実的なグリーン関数を得ることにつながるものと期待される。

(8) 令和6年度の成果に関連の深いもので、令和6年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

吉光奈奈・松田航洋，2024，計測波形と数値計算波形の比較を通じた実験試料内の不均質場が波形に与える影響の評価，日本地球惑星連合2024年大会，SSS07-11

川方裕則，2024，不均質媒質を透過する弾性波のふるまい（2） ～不均質強さによる差異を明らかにするために～，日本地震学会2024年度秋季大会，S01-02

安本陵巧・川方裕則・平野史朗，2024，湾地形におけるLg波の伝播特性 — 数値解析的アプローチ —，日本地震学会2024年度秋季大会，S01-03

市部悠斗・川方裕則・平野史朗，2024，2次元の数値シミュレーションにおける仮定する震源時間関数とレシーバ関数の関係，日本地震学会2024年度秋季大会，S01P-07

Hironori Kawakata, 2024, Frequency dependence on propagation manner of elastic waves traveling through porous media, 2024 AGU Fall Meeting, NS41B-1142

Ryota Yasumoto, Hironori Kawakata, Shiro Hirano, 2024, Effect of bay topography on an Lg wave — Numerical approach —, 2024 AGU Fall Meeting, S41E-3356

Yuto Ichibe, Hironori Kawakata, Shiro Hirano, 2024, Relationship between the source time function and imaging reliability in synthetic receiver function analysis, 2024 AGU Fall Meeting, S53E-3376

Masayuki Nakayama, Hironori Kawakata, Issei Doi, 2024, Changes in slowness before and after rainfall by active seismic monitoring on a slope, 2024 AGU Fall Meeting, S11E-3442

安本陵巧・川方裕則・平野史朗，2024，湾地形におけるLg波の伝播特性 — 数値解析的アプローチ —，日本地震学会2024年度秋季大会，S01-03

(9) 令和6年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(10) 令和7年度実施計画の概要：

【模擬表層地盤に対する繰り返し強震動入力試験】整備された実験装置を用いて、地盤内に応答測定用の加速度計アレイを構築し、強震動が与えられた際の地盤の応答特性の変化の定量的評価を開始する。

【高空隙率の媒質に対する透過弾性波計測試験】弾性波速度が3000 m/s程度に改善されたセメントモルタルおよび高空隙率の天然の岩石を媒質とする弾性波透過試験を実施する。入力周波数、空隙サイズを変えることにより特徴的な不均質スケールに幅を持たせ、波長で規格化された不均質スケールと伝播距離の関係において、実際の表層地盤の模擬として適切な範囲での計測を目指す。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

川方 裕則（立命館大学総合科学技術研究機構）

他機関との共同研究の有無：有

土井 一生（京都大学防災研究所）, 吉光 奈奈（京都大学大学院工学研究科）, 平野 史朗（弘前大学大学院理工学研究科）

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：立命館大学研究部B K C リサーチオフィス

電話：077-561-2815

e-mail：ml-b-kanri@ml.ritsumei.ac.jp

URL：http://www.ritsumei.ac.jp/research/center/sci/

(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：川方 裕則

所属：立命館大学総合科学技術研究機構

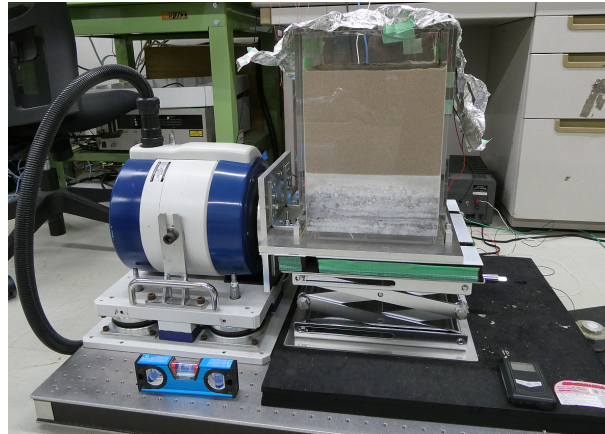


写真1．強震動による表層地盤の弾性波応答特性の変化を調べるための実験装置。

強震動はアクリル容器内に作成された模擬砂層地盤の下に設置された振動板により水平方向成分が与えられ、これとは別にモニタリング用の微弱な振動を与える振動スピーカーが模擬砂層地盤内に埋設されている。

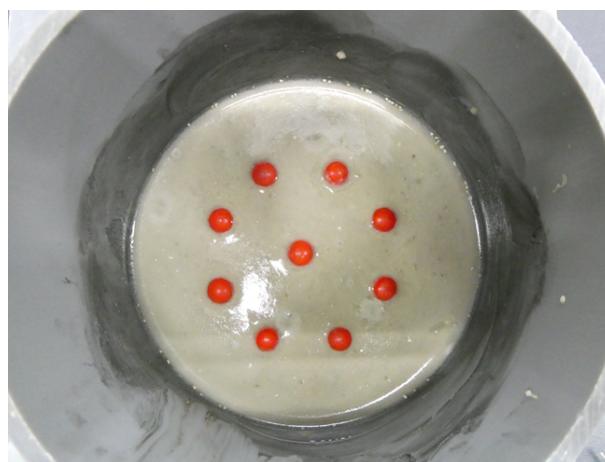


写真2．作成途上のセメントモルタル媒質の様子。

塩ビ管にセメントモルタルを注入し、中空のPP球（赤い球状の物体）を配置した状態。

