

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：82113

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289196

研究課題名(和文) 微動探査と地質情報に基づく多次元液状化リスク簡易評価法の開発

研究課題名(英文) A Practical Method of Multi-dimensional Risk Evaluation for Soil Liquefaction Based on Microtremor Survey and Geological Information

研究代表者

新井 洋 (Arai, Hiroshi)

国立研究開発法人建築研究所・構造研究グループ・主任研究員

研究者番号：40302947

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：将来の大地震に対する建物の耐震設計において、液状化地盤の地震応答を広範囲にわたって簡便に評価できる手法の開発が切望されており、解決すべき喫緊の課題と考えられる。本研究では、液状化層のS波速度低下率を明らかにし、既存のボーリング資料等に微動1点観測を追加することで、液状化地盤の水平変位と建物への地震荷重を簡便な地震応答解析から評価する方法を構築し、その有効性と適用限界を種々の地盤構造を有する複数の液状化・非液状化地点の地盤応答の数値シミュレーションから検証し、さらに広範囲にわたる多次元的な液状化リスク評価への応用の可能性を検討した。

研究成果の概要(英文)：A practical method estimating both acceleration response characteristics and lateral displacement of liquefied ground is proposed for aseismic design of buildings with pile foundations, which mainly consists of the one-dimensional equivalent-linear dynamic response analysis with the shear modulus ratio inferred by the adjusted N-value from the standard penetration test. The accuracy and reliability of the proposed method are revealed through the strong motion simulations using the geological information and S-wave velocity profiles estimated from microtremor surveys at the liquefied sites during the past earthquakes.

研究分野：建築基礎構造・地盤地震工学

キーワード：簡易液状化解析 水平地盤変位 建物地震荷重 微動H/Vスペクトル 逆解析 S波速度構造 多次元的  
地震リスク評価

### 1. 研究開始当初の背景

近年の国内の建物の地震被災度に対する社会的コンセンサスは、構造上の安全性を最も重視する考え方から、地震後の継続使用性や資産価値も重視する考え方へと変化している。このこと背景には、過去の大地震における地盤の液状化による建物被害経験（例えば、1995年兵庫県南部地震の神戸沿岸や2011年東北地方太平洋沖地震の東京湾岸の広範囲における杭基礎の損傷や戸建住宅の沈下・傾斜など）が強く影響している。また、これらの被害形態には、液状化地盤の水平変位と建物への地震荷重（地表地震動の加速度応答スペクトル）が密接に関係している。したがって、将来の大地震に対する建物の耐震設計において、液状化地盤の水平変位と建物への地震荷重を簡便かつ適切に評価する手法が必須である。また、その手法は、都市の地震防災の観点から、広範囲にわたって実施可能でなければならない。

液状化地盤の地震応答を評価する方法として、現時点では、有効応力を考慮した地盤の非線形時刻歴地震応答解析に基づく方法（いわゆる有効応力解析：詳細法）と建築学会指針等の液状化安全率に基づく方法（いわゆるFL法：簡易法）が挙げられる。前者は、液状化の現象をシミュレートする方法としては最適であるが、建築の設計実務においては、技術上の問題や、解析に必要な地盤調査・試験に係る費用・時間の問題から、実施が困難な場合が多い。一方、後者は、その簡便性から、建築の設計実務において多用されているものの、液状化地盤の水平変位はある程度評価できるが、建物への地震荷重は評価できない。このため、簡易法と大きく変わらない難易度で、液状化地盤の水平変位と建物への地震荷重の両方を適切に評価できる手法の開発が切望されており、解決すべき喫緊の課題と考えられる。

これらの問題点を解決する方法として、次のアイデアが考えられる。近年の申請者らの研究では、液状化地盤の水平変位を、簡便な地震応答解析（1次元等価線形解析）を用いて評価する手法が提案されている。この手法では、地盤各層のボーリング資料等（土質と標準貫入試験N値、地下水位）S波速度（ $V_s$ ）、液状化時の $V_s$ 低下率の情報が必要となる。ただし、現時点では、液状化層の $V_s$ 低下率を適切に推定する方法がないため、液状化時の建物への地震荷重を十分な精度で評価できない。一方で、近年、国内外の多くの機関により、液状化地盤において地表と地中で同時観測された強震記録（鉛直アレイ強震記録）が地盤情報とともに公開されている。申請者らも独自に、大型せん断土槽および縮小模型を用いた液状化地盤の室内震動実験を行い、それらの時刻歴応答データを得ている。液状化地盤の地震応答は、液状化層の低下した $V_s$ に支配される。したがって、これらの公開および独自の液状化地盤応答データを

分析することで、液状化層の $V_s$ 低下率を適切に推定する方法を導くことができると考えられる。

また、実際には、地盤のボーリング資料等は容易に入手できるが、 $V_s$ 構造は不明な場合が多い。地盤の $V_s$ 構造は、ボーリング孔を用いた速度検層を行って求められるが、これを広範囲にわたって実施することは経済的・時間的に困難である。一方で、近年の申請者らの研究では、地表1地点のみで行う微動観測から水平動と上下動のフーリエ振幅比スペクトル（H/Vスペクトル）を求め、これを表面波によるものと考えて逆解析を行い、直下地盤の $V_s$ 構造を推定できる可能性（1点微動探査法）が示されている。微動は、時と場所を選ばず、地表で簡単に観測できる。このため、1点微動探査法を前述の申請者らの提案手法に組み込むことで、広範囲にわたる液状化リスク評価が可能になると考えられる。ただし、1点微動探査法には、推定結果の信頼性が低い場合など、適用限界の不明確な部分が残されており、これを明確にする必要がある。

すなわち、液状化層の $V_s$ 低下率を適切に推定する方法と、1点微動探査法の適用限界の明確化の問題を解消すれば、申請者らの提案手法に基づいて、液状化地盤の水平変位と建物への地震荷重を、広範囲にわたって多次元的に評価することが可能になると考えられる。

### 2. 研究の目的

以上の背景から、本研究では、液状化層のS波速度（ $V_s$ ）低下率を明らかにし、既存のボーリング資料等に微動1点観測を追加することで、液状化地盤の水平変位と建物への地震荷重（地表面地震動の加速度応答スペクトル）を簡便な地震応答解析（1次元等価線形解析）から評価する方法を構築し、その有効性と適用限界を種々の地盤構造を有する複数の液状化・非液状化地点の地盤応答の数値シミュレーションから検証し、さらに広範囲にわたる多次元的な液状化リスク評価への応用の可能性を検討することを目的とする。具体的には、以下の検討を行う。

- (1) 液状化層のS波速度（ $V_s$ ）低下率を適切に推定する方法の導出
- (2) 微動1点観測から地盤の $V_s$ 構造を推定する手法の適用限界の明確化
- (3) (1)、(2)の結果を反映した液状化地盤の水平変位と建物への地震荷重（地表面地震動の加速度応答スペクトル）の簡易評価法の構築および有効性・適用限界の検討
- (4) (3)で構築した簡易液状化解析法の多次元的な液状化リスク評価への応用の可能性の検討

### 3. 研究の方法

- (1) 液状化層のS波速度（ $V_s$ ）低下率を適切

に推定する方法の導出

国内外の過去の大地震における液状化地盤で様々な機関により観測・公開された鉛直アレイ強震記録に対して、申請者らの提案手法や有効応力解析を用いて、地盤の水平変位と地表面地震動の加速度応答スペクトルの数値シミュレーション（再現解析）を行い、その結果が実測値と適合するような液状化層のVs低下率を同定する。

大型せん断土槽および縮小模型を用いた液状化地盤の室内震動実験の時刻歴応答データに対して、上記と同様の再現解析を行い、液状化層のVs低下率を同定する。

の検討事例を蓄積するとともに結果を総括し、液状化層のVs低下率を適切に推定する方法として取りまとめる。

(2) 微動1点観測から地盤のVs構造を推定する手法の適用限界の明確化

現場でリアルタイムに、観測微動のH/Vスペクトルを確認し、その逆解析を行って地盤のVs構造を推定できる、従来よりも小型・軽量の新しい微動観測処理解析システムを開発する。

開発した微動観測処理解析システムの妥当性と有効性を、地盤構造が既知の数地点における現場実験から確認する。

地盤構造が狭い範囲で大きく変化している地域を試験サイトとして、開発した観測処理解析システムを用いて微動の移動1点観測を行い、観測点直下の地盤のVs構造を推定する。推定結果と既存の地盤情報や周辺の地形・堆積環境等との対比から、1点微動探査法の有効性と適用限界について検討する。

の検討事例を蓄積するとともに結果を総括し、1点微動探査法の有効性と適用限界を明確にする。

(3) (1), (2)の結果を反映した液状化地盤の水平変位と建物への地震荷重（地表面地震動の加速度応答スペクトル）の簡易評価法の構築および有効性・適用限界の検討

国内の過去の大地震における液状化・非液状化地点のうち、地盤のボーリング資料等があり、かつ、当該地点あるいは近傍地点で強震記録が得られており、工学的基盤上面の露頭波を適当地震応答解析から推定できる場合について、(2)で開発した観測処理解析システムを用いて微動の移動1点観測を行い、各地点のS波速度(Vs)構造を推定する。

推定Vs構造とボーリング資料等、工学的基盤上面の露頭波、および(1)で得られた液状化層のVs低下率の知見を用いて、申請者らの提案手法により、各地点の地盤の水平変位と地表面地震動の加速度応答スペクトルを推定する。当該地点で強震記録が得られている場合には、これと直接的に比較して、推定結果の妥当性を定量的に検証する。一方、強震記録が得られていない場合には、地表の噴砂痕（液状化発生）の有無や地盤変状・沈

下の大小と間接的に対比して、推定結果の妥当性を定性的に考察する。

の検討事例を蓄積するとともに結果を総括し、提案する簡易液状化解析法の妥当性および有効性・適用限界について取りまとめる。

(4) (3)で構築した簡易液状化解析法の多次元的な液状化リスク評価への応用の可能性の検討

将来、大規模な建物被災が想定される大阪（上町断層帯地震）の市街地域を試験サイトとして、(3)で構築した簡易液状化解析法を広範囲の多地点で適用し、液状化地盤の水平変位と地表地震動の加速度応答スペクトルの平面的分布を推定する。

推定された液状化地盤応答の多次元的（水平面および深さ方向）分布について、これらに寄与する要因（地盤構造、地震動特性、各地域の地形・堆積環境や建物特性に関連する種々のパラメタ）の感度解析を行うことで、液状化リスクを評価する可能性について検討する。

#### 4. 研究成果

(1) 研究の方法(1)に沿って検討を行い、主として次の成果を得た。

近年の大地震で液状化した地点のうち、地盤データと強震記録が公開されている国内3地点を対象に、地盤変位と地表の加速度応答スペクトルの同時逆解析を行い、液状化層のせん断剛性比の値を推定した（図1）。また、図1から、液状化地盤の簡易地震応答解析における液状化層のせん断剛性比 $r_G$ の設定方法として、次式を提案した。

$$r_G = N_a / 1000$$

ここに、 $N_a$ は液状化層の補正N値で、標準貫入試験N値から原位置の拘束圧と細粒分の影響を補正して得られる。

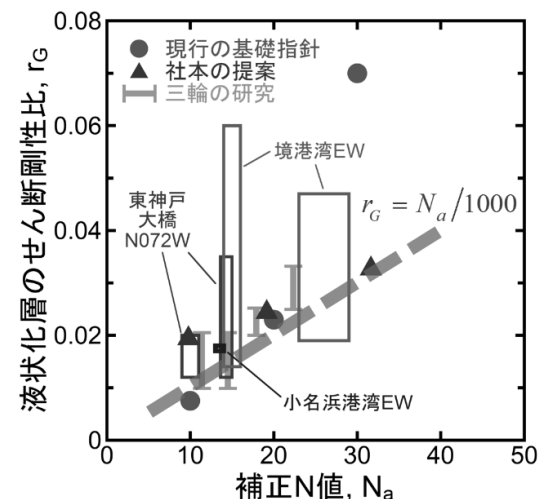


図1 液状化層の推定せん断剛性比と補正N値の関係

(2) 研究の方法(2)に沿って検討を行い、主として次の成果を得た。

地盤構造が既知の複数地点において微動の3成分1点観測を行い、下記の条件を満足する場合は、H/V スペクトルの逆解析から直下地盤のVs 構造を推定できることを示した。

- ・地盤が概ね水平成層構造であること。
- ・基盤層と堆積層のS波速度コントラストが明瞭(概ね3程度以上)で、また、H/V スペクトルのピークが単一かつ明瞭であること。

図2は、大阪盆地の3次元地盤構造モデルに対する模擬微動の有限差分法(FDM)シミュレーション結果を観測データと見なして、そのH/V スペクトルの逆解析から直下の1次元地盤構造を推定した例である。上記の条件を満足する水平成層領域において、地盤のS波速度構造が適切に推定されていることが確認される。

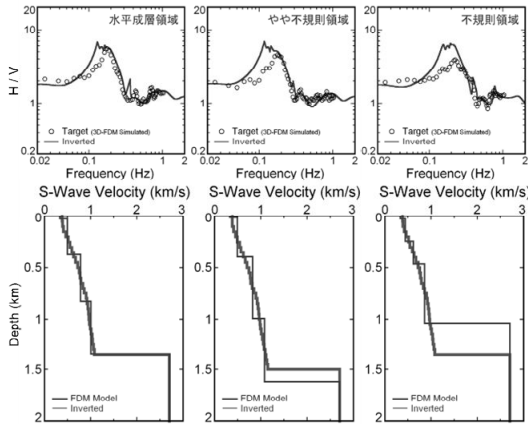


図2 大阪盆地の模擬微動 H/V スペクトルに対する水平成層構造を仮定した逆解析の例

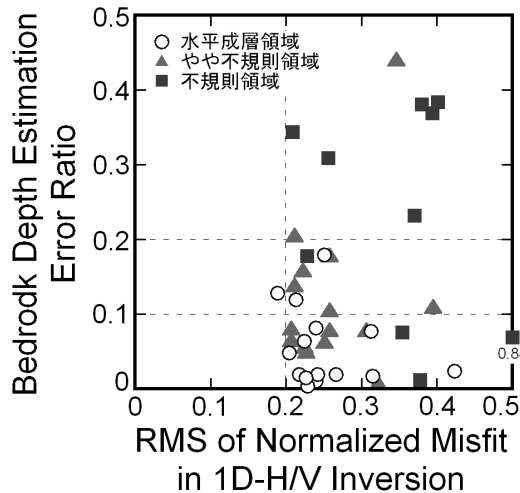


図3 水平成層構造を仮定した逆解析におけるH/V スペクトルの残差率と基盤深度の推定誤差率との比較

図3は、図2の検討を行った大阪盆地41地点の逆解析におけるH/V スペクトルの残差率と基盤深度の推定誤差率との関係を示している。図3から、地盤構造が不規則な地点では、水平成層仮定のH/V スペクトル逆解析から基盤深度を適切に推定できない場合の多いこと、また、逆解析で適合度の高い結果が得られても、推定された基盤深度に3-4割程度の誤差が含まれる場合のあることが示唆される。

(3) 研究の方法(3)に沿って検討を行い、主として次の成果を得た。

図4は、1993年釧路沖地震および1995年兵庫県南部地震において顕著な液状化が確認された釧路港湾および神戸ポートアイランドの本震記録を対象に、(1)の液状化層せん断剛性比の提案式と(2)の微動探査法で得られた地盤S波速度構造に基づいて、提案する簡易液状化解析を行った結果を示している。提案法による解析結果は、観測記録に基づく地盤変位(液状化層による変位の増大を含む)と地表面の地震荷重(加速度応答スペクトルあるいは加速度時刻歴波形)のいずれの特徴もよく再現できており、その妥当性が確認される。

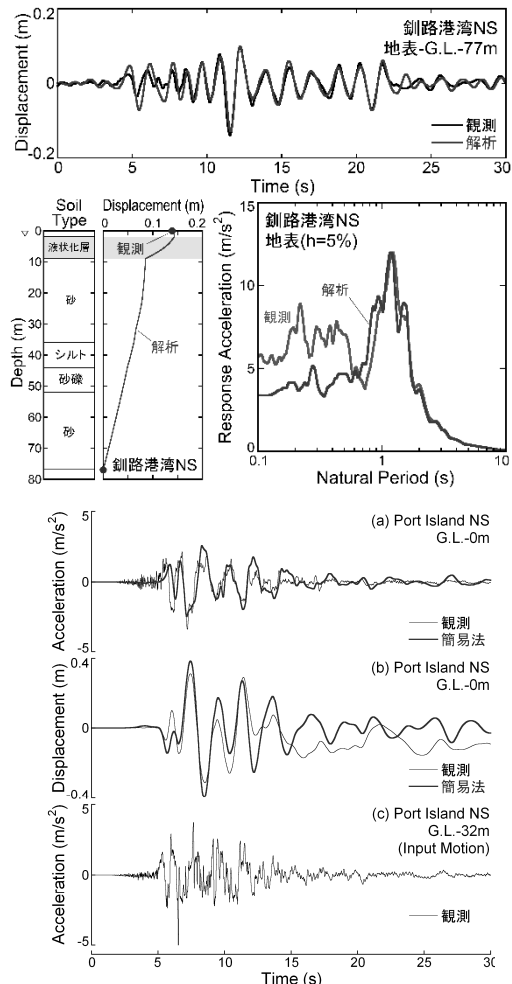


図4 提案する簡易法による液状化地盤の強震記録の再現解析の例(釧路および神戸)

(4) 研究の方法(4)に沿って検討を行い、主として次の成果を得た。

(1)-(3)の成果の地震工学へのアプリケーション的な検討として、大阪府域で地盤調査データの得られた132地点を対象に、想定上町断層帯地震のレベル3(建築基準法の耐震2次設計用地震動レベルを大きく上回る)模擬波に対して提案する簡易液状化解析を行い、得られた地盤変位の大小に基づいて液状化リスクの面的な分布を評価した(図5)。その結果、大阪湾から大阪市域、東大阪市域、生駒断層帯の西側にかけての広い範囲で、液状化リスクが高い地点の多いことが改めて確認された。

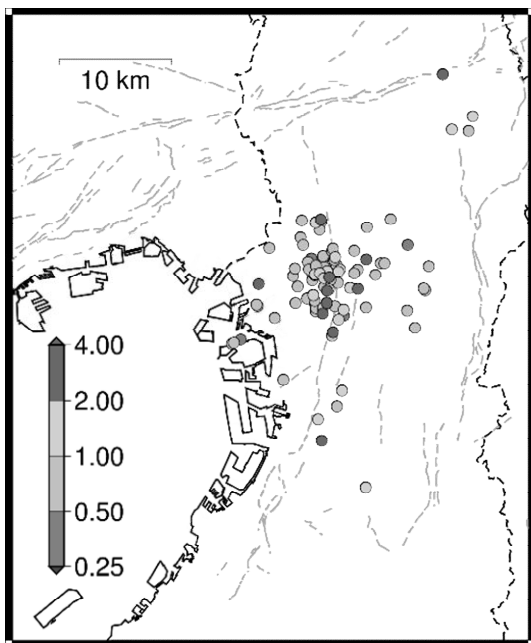


図5 大阪府域における想定上町断層帯地震に対する液状化リスク(安全率)の面的分布の評価例

(5) (1)-(4)の成果を総括し、主として簡易液状化解析法の開発と簡便な微動探査法に基づく多次元的な液状化リスク評価の方法として取りまとめた。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

##### [雑誌論文](計1件)

小林素直, 林康裕, 新井洋: 1次元等価線形解析による簡易液状化解析法の提案, 日本建築学会技術報告集, Vol. 21, No. 48, pp. 563-568, 2015, 6.

##### [学会発表](計8件)

新井洋, 柏尚稔: 地盤と基礎の被害, 2016年熊本地震 災害調査報告会, 日本建築学会大会災害部門 緊急報告会資料, pp. 63-74, 2016, 8.

新井洋: 建築基礎の耐震設計における地盤応答評価と液状化の扱い, 日本地震工学会大会 - 2015 梗概集, 横断セッション(C) 各分野の耐震設計 C-4, 2015, 11.

安本宏, 小林素直, 林康裕, 新井洋: 大阪府域を対象とした大振幅パルス性地震動に対する表層地盤の応答特性評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, pp. 89-90, 2015, 9.

新井洋: 長時間地震動・余震が液状化に与えた影響, 新潟地震から50年 - 液状化地盤における基礎構造耐震設計の進展と課題 -, 日本建築学会大会構造部門(基礎構造)パネルディスカッション資料, pp. 44-61, 2014, 9.

小林素直, 林康裕, 新井洋: 建物設計に用いる液状化地盤のせん断剛性比の簡易推定式の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造I, pp. 647-648, 2014, 9.

新井洋, 上林宏敏: 大阪堆積盆地の不規則地下構造に起因する脈動H/Vスペクトルの変化に関する一検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, pp. 345-346, 2014, 9.

小林素直, 林康裕, 新井洋: 強震記録の逆解析から推定した液状化地盤のせん断剛性比と補正N値の関係, 第49回地盤工学研究発表会講演集, pp. 1553-1554, 2014, 7.

新井洋, 上林宏敏: 大阪堆積盆地において地下構造の不規則性が脈動H/Vスペクトルに与える影響, 第49回地盤工学研究発表会講演集, pp. 1701-1702, 2014, 7.

##### [図書](計4件)

日本建築学会: 建築物荷重指針を活かす設計資料 1, 5.4 簡易液状化評価による事例(分担執筆: 新井洋, 林康裕), pp. 231-242, 2016, 2.

寺本隆幸, 大越俊男, 和田章(監修): 規基準の数値は「何でなの」を探る 第3巻, Q303 表層地盤増幅率の計算, Q309 FL, Dcyと被害の関係, Q310 簡易液状化判定法の適用範囲(分担執筆: 新井洋), pp. 32-33, pp. 40-41, 建築技術, 2015, 11.

日本建築学会: 建築基礎構造設計のための地盤評価・Q&A, 2.4 物理探査による地盤評価(分担執筆: 新井洋), pp. 35-41, 2015, 11.

住まいの液状化対策研究会(編著, 分担執筆: 新井洋), 時松孝次, 安達俊夫, 二木幹夫(監修): Q&Aで知る 住まいの液状化対策, 創樹社, 2015, 6.

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

新井 洋 (ARAI, Hiroshi)

建築研究所・構造研究グループ・主任研究員

研究者番号: 40302947

(2)研究分担者  
なし

(3)連携研究者  
林 康裕 (HAYASHI, Yasuhiro)  
京都大学・工学研究科・教授  
研究者番号：70324704