

令和 2 年 5 月 29 日現在

機関番号：82113

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03347

研究課題名(和文) 微動観測に基づく既存宅地の地震時地盤変状発生予測システムの開発

研究課題名(英文) A Practical Method to Estimate Seismic Deformation of Residential Land Based on Microtremor Measurement

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・上席研究員

研究者番号：40302947

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：大地震に対する宅地防災において、地盤変状による被害の発生を簡便に予測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、任意の地震動レベルに対する既存宅地の地表水平変位の簡易算定法を導出し、宅地の造成記録と建設時の簡素な地盤調査データに微動1点観測を追加することで、地盤変状被害の発生を簡便に予測するシステムを構築し、その妥当性と有効性および適用限界を近年の国内の大地震における被害・無被害宅地に対する被害発生予測結果から検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で導出した既存宅地の地表水平変位の簡易算定法は、既往の手法に比べて、解の見通しが抜群に優れており、住宅の設計実務への適用・普及において格段に有利である。また、本研究成果により、宅地の造成記録と建設時の地盤調査データに簡単な微動観測を追加するだけで、地震時の地盤変状被害の発生の有無を予測できるようになり、従来は経験的・定性的に行われてきた宅地の地震リスク評価を、力学的・定量的に行うことが可能となるため、その工学的意義は極めて高い。

研究成果の概要(英文)：A practical method evaluating seismic deformation of residential land is proposed by using both the simplified formulas to compute lateral ground displacement during earthquakes and the microtremor measurement techniques. The accuracy and reliability of the proposed method are investigated through the strong motion simulations with the geological information and S-wave velocity profiles estimated from microtremor surveys at the damaged sites for the past huge earthquakes.

研究分野：建築基礎構造・地盤地震工学

キーワード：地震防災 地盤変状 発生予測 既存宅地 微動

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

近年の国内の大地震では、様々な環境に造成された宅地において、敷地地盤の変状（以下、地盤変状）により住宅の基礎構造が損傷した事例が多発している。また、住宅が構造的被害を受けなくても、建物に大きな沈下や傾斜が生じて、その原状復帰が困難なことから、結果的に取り壊して建て直しとなる場合も少なくない。これらの宅地の地震被害様相には、大きな地盤変状の発生の有無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宅地防災において、まず、地盤変状により被害の発生する可能性を簡便かつ適切に予測する手法が不可欠である。

これらの課題を解決する方策として、次のアイデアが考えられる。近年の申請者の研究では、硬質な基盤上に堆積した軟弱地盤において、建築基準法の要求する地震動レベルに対する設計用の地表水平変位を単純な四則演算のみから算定する方法が提案されている。この方法を、計算の簡便性を損わず、任意の地震動レベルに対して拡張することは、容易に可能と考えられる。

上記の提案法による地表水平変位の計算では、堆積地盤を構成する主な土質と地盤のせん断波速度（S波速度）の深さ方向分布（S波速度構造）の情報が必要とされる。提案法を既存宅地に適用するにあたり、地盤の土質については、宅地の造成記録などから把握できる。一方、地盤のS波速度構造については、宅地造成記録などから把握することは不可能で、簡便かつ迅速に地盤のS波速度構造を調査できる別の方法が必須となる。

ここで、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リー振幅比スペクトル（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S波速度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。このため、1点微動探査法は、既存宅地のS波速度構造を調査する方法として、格段に高い適性を有している。ただし、1点微動探査法には、推定結果の信頼性が必ずしも高くない場合など、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、申請者の提案する設計用地表水平変位の算定法を任意の地震動レベルに対して拡張し、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、両者を組み合わせることで、既存宅地の地震時地表水平変位を簡便に算定できるようになる。この地表水平変位の算定結果と実際の地盤変状被害の発生状況との対比から、被害の発生する地表水平変位のクライテリアを決定することで、被害発生の有無を予測するシステムの構築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、任意の地震動レベルに対する既存宅地の地表水平変位の簡易算定法を導出し、宅地の造成記録などに微動1点観測を追加することで、地盤変状被害の発生を簡便に予測するシステムを構築し、その妥当性と有効性および適用限界を近年の国内の大地震における複数の被害・無被害宅地に対する被害発生予測結果から検証し、さらに、広範囲にわたる宅地の地盤変状被害発生に関する地震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) 任意の地震動レベルに対する既存宅地の地表水平変位の簡易算定法の導出
- (2) 微動1点観測から既存宅地のS波速度構造を推定する手法の適用限界の明確化
- (3) (1)(2)の結果を反映した既存宅地の地震時の地盤変状被害発生予測システムの構築および妥当性・有効性と適用限界の検討
- (4) (3)で構築した地盤変状被害発生予測システムの地震リスク評価への応用の可能性の検討

### 3. 研究の方法

- (1) 任意の地震動レベルに対する既存宅地の地表水平変位の簡易算定法の導出

水平多層地盤を2層地盤系および基礎固定の多質点系に置換し、両者の系における地表変位の数式表現を等置して整理する。また、土の非線形性を室内試験データに適合させた数式モデルにより表現し、地震荷重を応答スペクトルの加速度一定および速度一定領域の値により規定する。以上に基づいて、電卓のみで演算可能な地表水平変位の簡易算定法を構築する。算定法の妥当性と有効性は、多数地点の地盤モデルを用いた地震応答解析結果との対比から検証される。

- (2) 微動1点観測から既存宅地のS波速度構造を推定する手法の適用限界の明確化

埋没谷状の不整形地盤を有する丘陵地の再開発事業で造成された宅地領域において、既存の調査等に基づく地盤断面と微動のH/Vスペクトルの場所による変化との比較から、造成宅地における微動探査の可能性を検討する。ここでは、関西地方の丘陵地に開発中の造成宅地の一区画を検討対象とした。

- (3) (1)(2)の結果を反映した既存宅地の地震時の地盤変状被害発生予測システムの構築および妥当性・有効性と適用限界の検討

(1)(2)で開発した既存宅地の地表水平変位の算定プログラムと微動1点観測からS波速度構造を推定するプログラムを現有の微動観測システムに搭載し、2016年熊本地震の被害・無被害宅地で適用することにより、提案するシステムの妥当性・有効性と適用限界に関するデータを蓄積する。

(4) (3)で構築した地盤変状被害発生予測システムの地震リスク評価への応用の可能性の検討  
 (3)を継続し、開発したシステムの妥当性・有効性と適用限界に関するデータを蓄積するため、2018年北海道胆振地震の被害・無被害宅地を対象として、同様の検討を行う。

#### 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。

地盤は表層と工学的基盤から成る水平多層構造とし、地表から第*i*番目の層の厚さ $H_i$  (m)、単位体積重量 $\gamma_i$  (kN/m<sup>3</sup>)、初期S波速度 $V_{S0i}$  (m/s)、表層の厚さ $\Sigma H_i$  (m)、工学的基盤の単位体積重量 $\gamma_B$  (kN/m<sup>3</sup>)、S波速度 $V_{SB}$  (m/s)とする。地盤は、粘性土か砂質土のいずれかに区分し、液状化は発生しないものとする。地震荷重は工学的基盤か地表面のいずれかで設定するものとし、地表水平変位 $D_{\max}$  (m)は式1または式2により算定する。

$$D_{\max} = C_1(\alpha^2 - 1)f_A \Sigma H_i \quad (\text{地震荷重を工学的基盤で設定}) \quad (1)$$

$$D_{\max} = C_1(\alpha^2 - 1)f_A \Sigma H_i \left\{ C_2 \left( 1 - \frac{1}{\alpha^2} \right) + \frac{2R_{Z0}}{\alpha} \right\} \quad (\text{地震荷重を地表で設定}) \quad (2)$$

ここに、 $C_1$ : 表層の土質の $G$ - $\gamma$ 関係から決まる定数(粘性土で0.0028, 砂質土で0.0015),  $C_2$ : 表層の土質の減衰特性から決まる定数(粘性土で0.53, 砂質土で0.66),  $\alpha$ : 地盤の地震時の固有周期の伸び,  $f_A$ : 地震荷重の加速度一定領域の影響を考慮する補正係数,  $R_{Z0}$ : 地盤の表層と工学的基盤の初期インピーダンス比。  $\alpha$ ,  $f_A$ ,  $R_{Z0}$ は、それぞれ式3, 式4, 式5で与えられる。

$$\alpha = 1 + \frac{LZC_\alpha T_0}{\Sigma H_i} \quad \text{ただし} \quad \alpha \leq 4 \quad (3)$$

$$f_A = \min(1.6\alpha T_0, 1) \quad (4)$$

$$R_{Z0} = \frac{\Sigma \gamma_i V_{S0i} H_i}{\gamma_B V_{SB} \Sigma H_i} \quad (5)$$

ここに、 $L$ : 地震荷重レベルにより決まる定数(レベル1で0.2, レベル2で1.0),  $Z$ : 地域係数,  $C_\alpha$ : 表層の土質の動的変形特性から決まる定数(粘性土で25, 砂質土で40),  $T_0$  (s): 地盤の初期固有周期。なお、地盤の液状化する可能性がある場合、建築基礎構造設計指針による液状化判定を行い、得られた液状化層の動的水平変位 $D_{cy}$ を $D_{\max}$ に加算する。

(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。

図1に、ある造成宅地における測線に沿う微動のH/Vスペクトルを、造成記録や建設時の地盤調査データに基づく推定地盤断面図とともに示す。図から、場所によらず、観測H/Vスペクトルの周期1秒付近に明瞭なピークが見られる。一方、周期1秒以下のH/Vスペクトルの形状は、場所により大きく変化している。よって、ここでは、沖積層による埋没谷を横断する方向の地盤構造の変化を反映する微動特性として、周期1秒以下のH/Vスペクトルの形状に着目する。

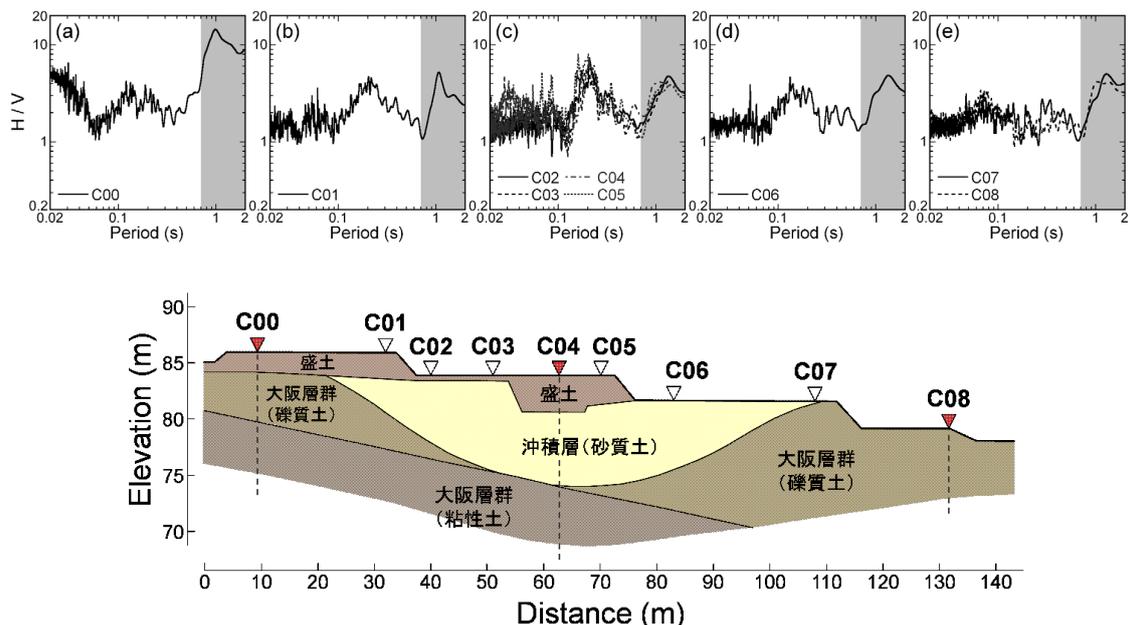


図1 ある造成宅地における測線に沿う微動H/Vスペクトルと推定地盤断面図との比較

図1から、観測H/Vスペクトルの周期1秒以下の形状は、周期0.2秒付近に明瞭なピークが見られる場合、ピークが見られない場合、両者の中間の3パターンに分類できる。ここで、推定地盤断面との比較から、大阪層群が露頭している、あるいは沖積層による埋没谷の端部付近の地点では、H/Vスペクトルの周期1秒以下にはピークが見られない場合が多い。しかし、大阪層群上の堆積土の厚さが大きくなると、H/Vスペクトルには、周期0.1-0.2秒付近に不明瞭なピークが現れるようになり、埋没谷の中央部では、周期0.2秒付近に明瞭なピークが見られる傾向がある。すなわち、この宅地では、微動のH/Vスペクトルから、沖積層による埋没谷となっている範囲の大凡を判別できる可能性を示唆している。微動の移動1点観測は、宅地内のどこで地盤調査を行うべきかを定める先験的情報を得るための方法として有効と考えられる。

ただし、上記の傾向において、微動H/Vスペクトルの場所による変化と直下地盤の堆積土の厚さのそれとの関係は、必ずしも一対一でない。この原因として、不整形地盤の微動H/Vスペクトルは直下の地盤特性のみで決まらない場合のあることが考えられるが、現時点では不明である。今後の課題としたい。なお、各地点の切盛分布や盛土の厚さと微動H/Vスペクトルの形状との間に相関性は見られなかった。

(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。

2016年熊本地震による益城町中心部の甚大な建物被害のメカニズムを解明する上で、この地域の地盤特性を適切に把握する必要がある。そこで、既往の地盤調査に加えて、地盤特性に関する基礎的データを収集する目的で、微動の移動1点観測を多地点で行い、H/Vスペクトルについて検討した。

図2の濃淡は、日本建築学会九州支部が行った悉皆調査のうち倉庫や神社等を除く2340棟の建物（うち木造1955棟）の大破率の分布を示している。この地域の被害率に差異が見られた範囲を概ね網羅するよう、同図に○印で示す138地点で、微動観測を行った。各地点で得られた微動データに対してH/Vスペクトルを求めた。H/Vスペクトルには、多くの場合、比較的明瞭な単一のピークが見られた。図2には、各地点のH/Vスペクトルの最大ピークを示す周期 $T_p$ の分布も示している。微動H/Vスペクトルの最大ピーク周期 $T_p$ は、0.2-1.2sの範囲で、場所により異なっている。

微動H/Vスペクトルの最大ピーク周期 $T_p$ と、その観測地点を含む1/16地域メッシュおよび周囲8メッシュの計3×3メッシュの範囲に位置する建物の棟数ならびに被害率（大破率・倒壊率）との関係を図3に示す。 $T_p$ に対して、建物棟数は20-80程度の範囲で概ね均等に分布しているが、一方で、被害率には多少の偏りが見られる。ただし、その偏りが明瞭に見られるのは $T_p > 0.9s$ 程度の場合に限られる。すなわち、この地域では、微動H/Vスペクトルや地盤構造を2016年熊本地震による建物被害と直接的に関係づけることは難しいと想像される。

このような懸念はあったが、宅地の造成記録や地盤調査データを収集し、(1)(2)に基づく提案法を用いて図2の各地区の地表水平変位の推定を試みた。しかし、この地域における本震時の入力地震動には未だ不明な点も多いことから、実際の地盤変状被害との対比を検討するまでには至っていない。今後の課題としたい。

(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。

2018年9月6日の北海道胆振東部地震では、札幌市清田区里塚地区において、地盤沈下による住宅被害が多数発生した。この被害様相を把握するため、国土技術政策総合研究所、ベターリビング、北海道立総合研究機構と共同で、9月18日と10月5日に悉皆調査を行った。

図4に、里塚地区の調査範囲、顕著な地盤沈下の生じた地域、地形分類で谷底平野または低位段丘面とされる地域を示す。図4から、顕著な地盤沈下は、主として、地形分類で谷底平野とされる長さ300m程度の帯状の地域で生じている。しかし、谷底平野でも顕著な地盤沈下が生じなかった地域も少なくない。調査では、図4に示す335棟の建築物を対象とした。全335棟のうち、327棟が住宅で、321棟が2階建ての専用住宅である。

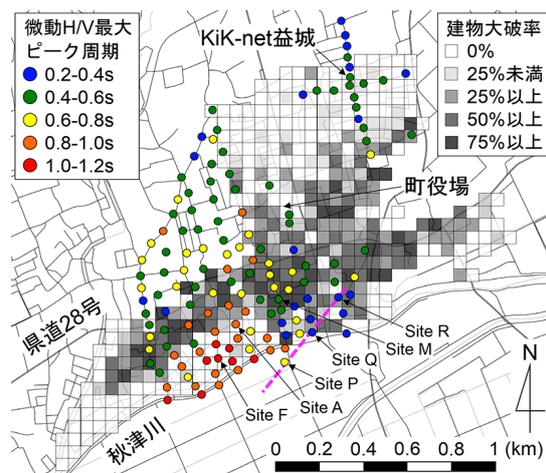


図2 益城町中心部における建物大破率の分布1)および微動の観測地点とH/Vスペクトルの最大ピーク周期 $T_p$ の分布

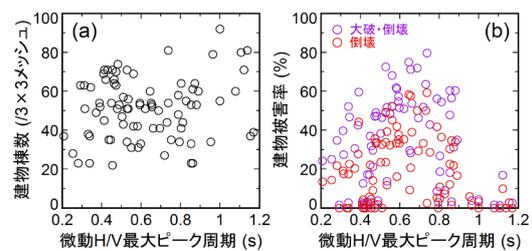


図3 微動H/Vスペクトルの最大ピーク周期 $T_p$ と建物被害率との関係

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)



図4 里塚地区の悉皆調査の範囲，顕著な地盤沈下の生じた地域，地形分類

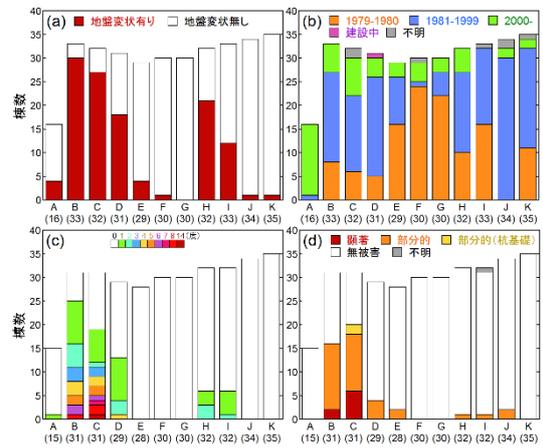


図5 (a)宅地の地盤変状，(b)建築年，(c)基礎の傾斜角度，(d)基礎の損傷被害の分布

図5に，調査結果の一部として，宅地の地盤変状の有無，建築年（2014年度札幌市都市計画基礎調査データを参照し，Google Street Viewの画像情報により補正），基礎立上り部分の傾斜の簡易傾斜計による計測値（梁間方向と桁行方向の合成値），基礎の損傷被害の分布を示す．図の下部の( )内は各地区の棟数である．図4-5の対比から，1979-1980年の建築物が多い地区ほど地盤変状が生じた場合の少ない傾向，顕著な地盤沈下や地盤変状の有無が住宅の基礎の傾斜に強く影響した可能性，住宅の基礎の傾斜が大きくなると基礎の損傷被害も大きくなる傾向，の3点が示唆される．また，図は省略するが，住宅の上部構造の損傷被害の分布は，基礎の傾斜の分布や基礎の損傷被害の分布と，概ね似た形状をしており，住宅の上部構造の損傷被害にも顕著な地盤沈下や地盤変状が少なからず影響した可能性が示唆される．

宅地の造成記録や地盤調査データを収集し，開発した地震時地表水平変位の簡易算定法および1点微動探査法ならびに近傍の本震記録から推定した地震動を用いて，図4の各地区の地表水平変位を推定した．その結果と実際の地盤変状被害の発生の有無との対比から，被害の発生する地表水平変位のクライテリアを検討した．

(5) (1)-(4)の成果を総括し，宅地の簡易な地盤変状被害発生予測法の開発と地震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

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 KASHIWA Hisatoshi、ARAI Hiroshi、NAKAGAWA Hiroto	4. 巻 84
2. 論文標題 SOIL-STRUCTURE INTERACTION EFFECTS ON STRONG MOTION RECORDS AT MASHIKI TOWN OFFICE DURING THE 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKES	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 183 ~ 193
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="http://doi.org/10.3130/aijs.84.183">http://doi.org/10.3130/aijs.84.183</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Arai, H. and Kashiwa, H.
2. 発表標題 Estimation of S-wave Velocity Profiles from Microtremor and Borehole Surveys in Damaged Area during the 2016 Kumamoto Earthquakes, Japan
3. 学会等名 16th European Conference on Earthquake Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 新井洋
2. 発表標題 地盤の液状化による被害と対策
3. 学会等名 日本建築学会大会構造部門 (振動) パネルディスカッション
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 新井洋, 上林宏敏, 柏尚稔
2. 発表標題 熊本県益城町中心部の微動特性と地盤構造に関する一考察
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大村早紀, 新井洋
2. 発表標題 建築基礎構造設計のための動的地盤変位の簡易算定法 (その2)
3. 学会等名 第53回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 新井洋, 柏尚稔
2. 発表標題 2016年熊本地震による益城町中心部の被害調査と微動観測
3. 学会等名 地盤工学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 新井洋, 柏尚稔
2. 発表標題 KiK-net益城の地盤ボーリング調査と微動アレイ探査
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 新井洋
2. 発表標題 地震荷重, 改定によって基礎構造設計指針はどのように変わるのか
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 上林宏敏, 長郁夫, 大堀道広, 新井洋, 永野正行
2. 発表標題 模擬微動波形を用いたアレイ解析と全波動場における位相速度
3. 学会等名 日本地震工学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 新井洋, 柏尚稔
2. 発表標題 微動アレイ観測から推定した益城町中心部の地盤S波速度構造
3. 学会等名 日本地震工学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 新井洋, 柏尚稔, 久世直哉, 大橋征幹, 戸松誠, 竹内慎一, 千葉隆史, 廣瀬亘
2. 発表標題 2018年北海道胆振東部地震による札幌市里塚地区の宅地被害
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 新井洋, 柏尚稔, 久世直哉, 大橋征幹, 戸松誠, 竹内慎一, 千葉隆史, 廣瀬亘
2. 発表標題 2018年北海道胆振東部地震による札幌市里塚地区の宅地被害の悉皆調査
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

[http://smo.kenken.go.jp/~arai/papers\\_j.html](http://smo.kenken.go.jp/~arai/papers_j.html)

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	林 康裕  (Hayashi Yasuhiro)  (70324704)	京都大学・工学研究科・教授    (14301)	