

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26249079

研究課題名(和文) 倒壊限界と地震動被災を考慮した津波による建物の崩壊メカニズムに関する研究

研究課題名(英文) Collapse mechanism of buildings by Tsunami waves after response to earthquake motions

研究代表者

壁谷澤 寿海 (Kabeyasawa, Toshimi)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：00134479

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,500,000円

研究成果の概要(和文)：鉄筋コンクリート造建築物の縮小試験体が崩壊に至る水理実験を実施して特に地震動による損傷と漂流物による閉塞効果の影響を検証した。2014年度にはピロティ構造の震動実験と孤立波による水理実験を実施し、地震動による損傷が津波による倒壊危険性を増大させることを実証した。2016年度には純ラーメン構造が連続波と漂流物によって倒壊に至る水理実験を実施し、漂流物の開口閉塞効果により大幅に増大する津波荷重を定量的に明らかにした。2015年度、2017年度には静的加力実験を行い、水理実験の試験体の耐力を確認した。以上の実験結果および検討成果を総括して津波避難ビル設計用津波荷重の評価法を提案した。

研究成果の概要(英文)：Hydraulic collapse tests were conducted on scaled specimens of reinforced concrete building structures including the effects of seismic vibration and floating wreckage. Soft first-story structures were tested under soliton wave with or without preceding shake table tests in 2014. It was experimentally verified that residual damages due to the prior ground shaking could increase the possibility of collapse by tsunami loading later on. Open frame structures were tested under continuous waves and with floating wreckage in 2016. The wave loads were measured and analyzed from the tests which increased drastically due to obstruction by the wreckage against the wave flow through openings. Static loading tests were also conducted to measure the rigorous capacities of the specimens in 2015 and 2017. A method of evaluating design wave loading on tsunami evacuation buildings is proposed reflecting the experimental results and associated analyses.

研究分野：耐震工学

キーワード：津波避難ビル 水理実験 連続波 鉄筋コンクリート建物 漂流物 津波荷重 静的加力実験 倒壊

1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日の東日本大震災では、浸水深10mを超える津波により、木造建築物や鉄骨造建築物はもとより、鉄筋コンクリート建築物にも崩壊や転倒等の甚大な被害がみられた。津波による被害例では杭基礎建築物の転倒被害や橋脚の基礎底部被害等が確認されており、既往の地震動被害とは異なる破壊形式が顕著であった。この崩壊形式は水理実験等から計測されている水平外力の波圧分布とは明らかに矛盾していたことから、構造物を崩壊させる津波荷重については実験等により再検証する必要がある。一方、当時進行中であった筆者らによる別課題（平成25年～平成26年度）で水理実験を実施してきたが、それらの近年の実験結果では津波避難ビル設計ガイドラインによる「設計用浸水深」の3倍の高さの静水圧荷重を仮定して設計法は津波荷重を過大評価している可能性があることを示唆するものであった。ただし、以上の実験は極小モデルによる予備的な実験であったため、構造物の崩壊荷重の評価に関しては、実験手法として水平外力の直接計測などを含む組織的かつ大規模な実験研究の必要性が認識されていた。

倒壊を生じさせる津波荷重の評価では外力分布、時刻歴、浮力の影響、構造物側では耐力評価のばらつき、崩壊モード、倒壊限界、さらに地震動による損傷や漂流物の影響も考慮する必要がある。建物の倒壊現象と津波荷重の関係、損傷や漂流物の影響が検証された水理実験例は少なく、実験結果は津波避難ビルの設計実務の背景としても極めて有意義である。

2. 研究の目的

本研究では建築構造物が津波によって倒壊するときの津波荷重の評価法を水理実験および解析により検証する。本課題では実際的な構造物モデルの水理実験を実施して特に振動被害の影響と漂流物による閉塞効果の影響を水理実験により検証する。

3. 研究の方法

(1) ピロティ構造の震動実験と水理実験（平成26年度）

建築物の耐力と津波荷重の関係および地震動による損傷が津波による崩壊に与える影響を把握することを目的としてピロティ構造の鉄筋コンクリート造建築物の縮小試験体により津波での崩壊を模擬した水理実験と震動実験を行った。1階が柱のみのピロティ建物に作用する津波荷重を定量化するとともに水理実験前の震動実験による損傷の影響を検討した。

試験体は1層に開口部を有する地上5階ピロティ型構造物を想定した1/8スケールの縮

小模型を用いた。図1に示すように、高さ1.6m、幅1.25m、奥行0.65mの上屋部分を基礎部の上に構成し、1層ピロティ部分の階高は0.3mである。1層の柱寸法が異なる2種類の試験体で、柱幅が50mm（S1試験体）、75mm（S2試験体）である。

試験体前面とピロティ天井面には波圧計を設置して、柱には高さ150mmの位置に間隙水圧計を設置した。試験体の背面では左右の側面から100mm内側の点で、かつ上端から50mmおよび250mm下部の計4点の絶対変位をレーザー変位計により測定した。

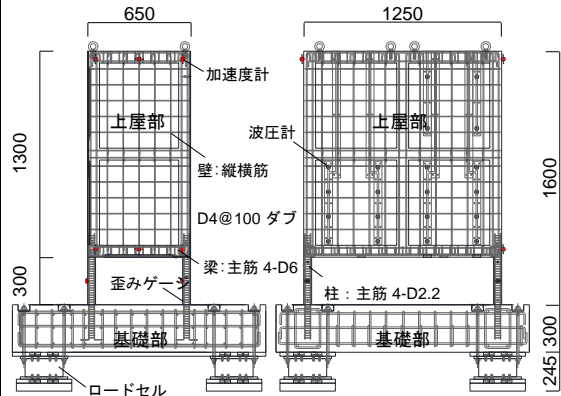


図1 ピロティ構造試験体

表1に実験結果の概要を示した。S1-1とS1-2の実験結果を比較すると、Run2において同じ津波入力に対する応答に顕著な差異が生じた。これはRun1における入力波および外力レベルの違いに起因するものと考えられる。S2はRun1においてS1-2よりも大きな水平力が作用したにも関わらずRun2の津波外力に対して1層の最大層間変形角R1が1/526(rad)の応答に留まった。

Run1で弾性応答を示すS1-1はRun2でQが計算値Quを上回るにも関わらずR1=1/211に留まった。繰り返し作用しない津波荷重はQuを超える外力が作用しても十分な継続時間がなければ倒壊に至らない。一方、Run1で応答が増大したがRun2で外力がQuを下回りR1=1/1/526に留まった。地震による損傷を受けた試験体であっても、Quを下回る津波荷重下では応答が増大しない結果となった。S1-2ではRun1でQuを超えるQが作用しR1=1/85まで応答が増大したことでRun2では剛性低下が見られ倒壊に至った。Quを超える外力が倒壊に必要な作用継続時間を持たない津波条件下であっても、地震動による損傷が累積した状態では同条件の津波荷重で倒壊に至る危険性があることが実験的に示された。

前面の波高hwと建物のせん断力Qの関係を図2に示す。hw<0.4mの範囲では実験値は概ね静水荷重に相当しているが、2層部分に相当するhw=0.4m到達時にQが急激に増大し

ている。これは従来の実験結果にはなかった特徴である。遮流面積が小さい1層部分では波の流が堰き止められずに、通過波到達時の流速を保ったまま遮流面積の大きな2層部分に水位が到達したことで、静水荷重と比較して大きな水平力が急激に作用したと考えられる。最大水平力時における波圧の高さ方向分布を表す図3より、分布の勾配は概ね静水圧分布に相当し低層部のピロティ形式が波圧分布に与える影響はみられない。波高検定水位に相当する静水圧分布を最大計測波圧が上回っていることから、水位の堰上げによる波圧の上昇が確認できるが、最大水位相当の静水圧分布に達していない。

表 1 入力条件および実験結果一覧

Unit	Q_0 [kN]	Run	Input	Q_{max} [kN]	R_{max} [rad]
S1-1	4.71	H1	T20H80	3.08	1/541
		H2	T20H100	6.96	1/211
S1-2	4.71	E1	Ishi450	5.77	1/85
		H2	T20H100	6.63	倒壊
S2	7.07	E1	Ishi600	9.43	1/57
		H2	T20H100	6.35	1/526

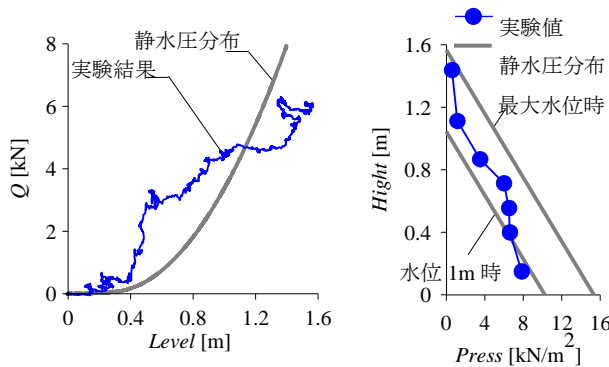


図 2 水位・水平力関係

図 3 波圧分布

(2) 連続波と漂流物による純ラーメン構造の水理実験 (平成 28 年度)

大型津波氾濫水路において連続波と木造建物漂流物を想定して、漂流物の閉塞効果によって大開口を有する鉄筋コンクリート造構造物が崩壊に至る実験を行い、作用する津波荷重の違いについて検討した。

試験体は 4 層 1×1 スパンの鉄筋コンクリート造純ラーメンの 1/10 縮小スケールモデル 5 体 (FA-FE) で、FA-FD は共通の設計であるが、FA-FC は水理崩壊実験用、FD は静的加力実験用、FE は波圧検定試験用非破壊試験体である。平面図および立面図を図 4 に示す。試験体の幅および奥行スパンは 650 mm、階高は 330mm、下部には高さ 1500mm、幅 1100mm、奥行 1200mm の基礎版、その下に通しボルト

により固定する防水型 3 方向ロードセル 4 基を設けて、水路内既設ピットの底部鋼板にボルトで固定できるように設計した。ピット外構と試験体基礎外周の間には 30mm 程度の隙隙を有して、地下ピット内は常に浸水している状態にある。

試験体 FA-FD の部材断面図を図 4 に重ねて示す。各階の柱および梁断面は 45mm 角とし、スラブ厚は 25mm である。検定用試験体 FE の柱主筋は 8-D4、梁主筋は 4-D4、せん断補強筋を $\phi 2@15$ とした。倒壊実験用試験体 FA-FD では柱主筋は 4-D2.2、梁主筋は 4-D2.2、せん断補強筋を $\phi 2@15$ とした。スラブ筋は D4@20 のシングル配筋とし、桁行方向の梁耐力には寄与しないような詳細にした。設計では仮想仕事法により 1 階層崩壊と 2 層部分崩壊が概ね同程度の静水圧荷重により生じるように柱および梁断面の配筋を調整した。

漂流物は 2 階建て木造住宅を想定した直方体の木製模型とし、閉塞内部底面に鋼製錘を設置して比重を調整した。外形は X720×Y900×H770 mm とし、図心位置で加速度 3 方向成分を計測した。重量は木造建物の比重にもとづいて重量型 220kg (比重 0.44)、軽量型 113kg (0.22) の 2 種類を製作した。漂流物実験の状況を写真 1 に示す。漂流物は (1) 試験体前面に接して配置した状態 (写真 1(a))、(2) 試験体上流約 3m から実験開始 30 秒後に水面に投下し漂流衝突させる方法 (写真 1(b))、としたが、(1) を主体に実験して主に閉塞効果の影響を検討した。設置位置は試験体上流側下階で、水流に対して縦長方向、横長方向 2 ケースとした。漂流物底面四角には高さ約 50 mm のゴム製の脚を取り付けた。

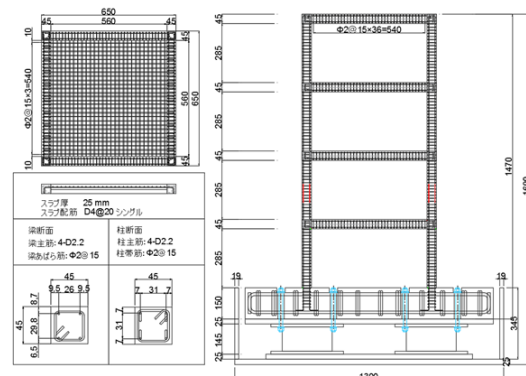


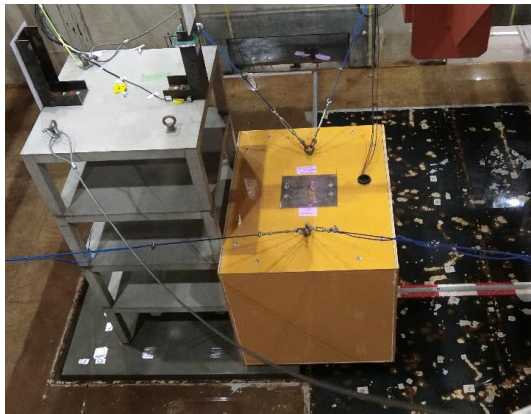
図 4 純ラーメン構造試験体

実験は電力中央研究所の津波氾濫水路において 2016 年 10 月から 11 月に実施された。水路は長さ 20m、高さ 2.5m、幅 4m で貯水した水を落下させることで最大 7m/sec の連続波を生成する。

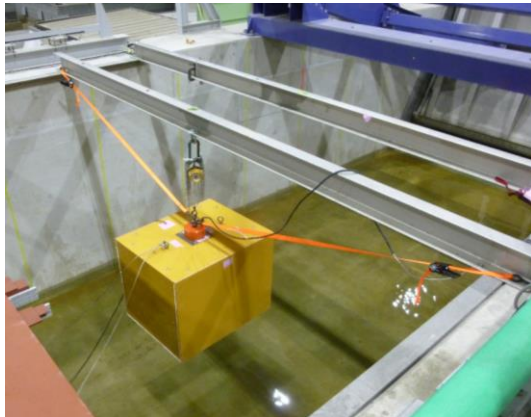
試験体に作用する波力は試験体基礎下の 3 軸ロードセルおよび波圧計により計測して

いる。絶対水平変位については試験体背面の頂部から高さ 40mm、280mm 下位置においてレーザー変位計により計測した。波圧は各階において前後構面の柱中央位置、直交梁中央で計測しているが、漂流物流下時には試験体上部では計測していない。絶対加速度を試験体各層の図心位置で計測している。また、水路内各位置では水位計により水位を計測している。歪みゲージは 1 階のヒンジメカニズムを想定し、柱および梁主筋の 1 階部分合計 6 か所に添付した。

実験計画および結果概要（条件と最大応答せん断力、変位）を表 2 に示す。まず、予備的に非破壊試験体 FE（下流側で補強）により、入力条件を変えて開口がある場合、漂流物を試験体前面に設置した場合の波力検定試験を行った FE1～FE5)。また、上流から漂流物を放流する方法で衝撃力も検定した (FE6～FE8)。



(a) 近傍設置



(b) 漂流落下

写真 1 漂流物の設置・落下の方法

FA 試験体では 2 階から 4 階に鋼板外壁を装着して開口率の影響を検証した (FA1～FA5)。試験体 FB では漂流物および波力を変えて、放流する場合、さらに最大波力と重量型漂流物で倒壊に至る実験とした (FB1～FB4)。試験体 FC では 3 回の実験で同じ波力を与えた。漂流物を設けない場合 (FC1)、軽量型の漂流

物を縦向き設置した場合 (FC2) では試験体は残存したが、横向き設置とした場合 (FC3) には倒壊した。試験体は柱頭柱脚で曲げ破壊が生じ、1 階層崩壊に至った。上記 3 ケースの実験結果から漂流物の堆積によって建物に生じる波力は増加し、波力のみでは大きな波圧を受けない場合であっても倒壊に至る可能性があることが実験的に示された。

表 2 入力条件および実験結果一覧

Run	漂流物等	波形	H(m)	Q(kN)	D(mm)
FE1-5	波力検定	1	-	-	-
FE6-8	設置/漂流	1	-	-	-
FA1	開口 76%	1	0.91	0.48	0.23
FA2	開口 51%	1	0.98	0.97	0.57
FA3	開口 19%	1	0.95	1.61	0.96
FA4	開口 19%	2	1.08	2.22	1.60
FA5	開口 19%	3	1.38	3.51	10.9
FB1	軽-横長設置	1	0.83	2.68	1.99
FB2	重-横長設置	1	0.82	2.66	1.73
FB3	軽-横長漂流	1	0.91	1.41	19.5
FB4	重-横長設置	3	1.43	3.71	倒壊
FC1	なし	3	1.51	1.29	0.82
FC2	軽-縦長設置	3	1.49	3.68	14.6
FC3	軽-横長設置	3	1.23	3.82	倒壊



(a) 倒壊直前



(b) 倒壊後

写真 2 試験体 FC3 倒壊の状況

実験により明らかにされた点を要約する。

(1) 標準波力（波形 1、波高 0.8m）では、漂流物がない場合に対して（FA1）に対して、漂流物横長設置（FE6、FE7）により、応答せん断力は 7～8 倍に増大した。最大波力（波形 3、波高 1.4m）では試験体耐力で決まる倒壊時せん断力は漂流物がない場合に対して 3 倍程度（FC3/FC1）であった。

(2) 鋼製の壁で開口を閉塞した場合、開口率が小さくなるほど試験体の応答せん断力は増大した。2 階から 4 階をすべて閉塞した場合、最大波力の実験（FA5）では、塑性変形（10.9 mm）が生じたが、倒壊はしなかった。

(3) 漂流物を漂流衝突させた場合（FB3）、波力による応答せん断力は小さかったが、衝撃荷重により試験体には大きな塑性変形（19.5 mm）が生じた。それ以前に実施した同じ波力による漂流物横長隣接設置試験（FB1、FB2）では、試験体はやや変形したが、変形は小さかった（2 mm 以下）。

(4) 漂流物衝突試験の後で、漂流物を横置隣接設置して最大波力にした場合（FB4）、試験体は倒壊した。

(5) 開口閉塞も漂流物もない場合の実験においては、最大波力（FC1）によっても試験体では若干の変形（0.83 mm）が生じたが、残存した。

(6) 漂流物を縦長隣接設置して最大波力にした場合（FC2）、試験体は大きく変形した（14.58 mm）。

(7) その後漂流物を横長設置して最大波力にした場合（FC3）、試験体は倒壊した。

(8) 水理実験による応答せん断力の最大値（ $Q=3.5\sim 3.7\text{kN}$ ）は試験体終局耐力の計算値（ $Q_u=2.1\text{kN}$ ）あるいは主筋破断強度による上限値（ $Q_u=2.9\text{kN}$ ）を上回った。この耐力は次年度の静的加力実験（写真 3）との比較あるいは荷重作用位置などを詳細に検討した結果、概ね計算値に対応することがわかった。



写真 3 純ラーメン構造試験体の静的加力実験
（東京大学地震研究所）

4. 研究成果

(1) ピロティ形式の RC 試験体に対して津波外力を想定した水理実験と振動実験を行った結果、試験体の静的な耐力と津波荷重の関係に整合する試験体損傷が生じる結果となった。津波外力のみで倒壊に至らない試験体も、地震動による損傷が累積した状態では同条件の津波荷重で倒壊に至る危険性があることが実験的に示された。

(2) 2016 年度には純ラーメン構造が連続波と漂流物によって倒壊に至る水理実験を実施し、漂流物の開口閉塞効果により大幅に増大する津波荷重を定量的に明らかにした。

(3) 2015 年度、2017 年度には静的加力実験を行い、水理実験の試験体の耐力を確認した。以上の実験結果および検討成果を総括して津波避難ビルの設計用津波荷重の評価法を提案した。

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 13 件）

- (1) Toshikazu Kabeyasawa, Toshimi Kabeyasawa, Taro Arikawa, Hydraulic collapse tests on a reinforced concrete wall under impulsive wave load, 11th US National Conference on Earthquake Engineering (Paper ID 261, 10pp.), 2018.6, 査読有
- (2) 壁谷澤寿一, 壁谷澤寿海, 有川太郎, 地震後に津波波力を受けるピロティ建物の応答性状, 構造工学論文集, Vol.64B, 793-798, 2018.3, 査読有
- (3) 壁谷澤寿一(分担執筆), 災害拠点建築物の設計ガイドライン(案), 国土技術政策総合研究所, 41, 2018.1, 査読無
- (4) 壁谷澤寿一, 壁谷澤寿海, 有川太郎, 鉄筋コンクリート造構造物の波力に対する動的応答性状に関する解析的研究, 日本地震工学会(P1-22, 4pp), 2017.11, 査読無
- (5) 壁谷澤寿海, 壁谷澤寿一, 李禹彤, 松山昌史, 木原直人, 連続波津波と漂流物閉塞による鉄筋コンクリート建物の崩壊実験, 日本地震工学会, (P1-23, 4pp.), 2017.11, 査読無
- (6) 壁谷澤寿海, 壁谷澤寿一, 李禹彤, 松山昌史, 木原直人, 連続波と漂流物による鉄筋コンクリート建物の津波崩壊実験(その 1 実験計画および実験概要), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.173-174, 2017.8, 査読無
- (7) 壁谷澤寿一, 壁谷澤寿海, 有川太郎, 衝撃波力に対する鉄筋コンクリート造構造物の応答に関する検討, コンクリート

工学年次論文集, Vol.39, 2017.6, 査読有

- (8) Toshikazu Kabeyasawa, Toshimi Kabeyasawa, Taro Arikawa, Yohei Takayama, Performance of Soft- first- story Buildings against Earthquake Motions and Tsunami Loadings, Proceedings of 16th World Conference on Earthquake Engineering, 2017.1, 査読有
- (9) 壁谷澤 寿一(分担執筆), 津波からの多重防御・減災システムに関する研究, 国総研プロジェクト研究報告, 国土交通省国土技術政策総合研究所, 第 52 号, 2016.6 ISSN 1880-0114, 査読無
- (10) Toshikazu Kabeyasawa, Toshimi Kabeyasawa and Taro Arikawa, Evaluation of Tsunami Loading Based on Collapse Load of Structures, Proceedings of the Tenth Pacific Conference on Earthquake Engineering, 10, Nov. 2015, 査読有
- (11) 高山洋平, 壁谷澤寿一, 壁谷澤寿海, 地震荷重と津波荷重を受ける鉄筋コンクリートピロティ建築物の崩壊実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(構造 IV), 日本建築学会, 425-426, 2015, 査読無
- (12) 壁谷澤 寿一(分担執筆), 建築物荷重指針・同解説 (2015), 10 章津波荷重, 日本建築学会, 2015.3, 査読有
- (13) 壁谷澤寿海, 壁谷澤 寿一(分担執筆), 静岡県建築構造設計指針・同解説, 静岡県くらし・環境部建築住宅局, 2015.1, 査読有

[学会発表] (計 6 件)

- (1) Toshikazu Kabeyasawa, Tsunami Collapse Tests on Soft 1st Story RC Building After Damaged by Dynamic Loading, RSNZ-JSPS Workshop, 4. 2017.11
- (2) Toshimi Kabeyasawa, Tsunami Collapse Tests on Reinforced Concrete Frame Buildings under Continuous Wave with Floating Wreckage, RSNZ-JSPS Workshop, 2017.11
- (3) Toshikazu Kabeyasawa, Koichi Kusunoki and Toshimi Kabeyasawa, Japan experience focused on damages to reinforced buildings, Post Earthquake Data Collection Workshop, 2014.7
- (4) 壁谷澤寿一, 首都直下地震直後の社会活動維持に向けた建築物の性能表示技術の普及および開発, 首都大学東京 第 9 回 施策提案発表会, 2018.7
- (5) 壁谷澤寿一, 規準・指針類に示されていない RC 部材の構造性能 2.13 節, RC 構造 シンポジウム, 日本建築学会, 2017.1
- (6) 壁谷澤寿一, 諏訪田晴彦, 災害拠点建築物を対象とした RC 建築物の地震被災

後継続利用技術開発コンクリートサステイナビリティに関するシンポジウム III, 日本コンクリート工学会, 2016.9

6. 研究組織

(1) 研究代表者

壁谷澤 寿海 (KABEYASAWA TOSHIMI)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号: 00134479

(2) 研究分担者

壁谷澤 寿一 (KABEYASAWA TOSHIKAZU)

研究者番号: 10533953

首都大学東京・都市環境科学研究科・准教授

有川 太郎 (ARIKAWA TARO)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号: 00344317

楠 浩一 (KUSUNOKI KOICHI)

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号: 00292748

井上 波彦 (INOUE NAMHIKO)

独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: 00370693

(3) 連携研究者

松山 昌史 (MATSUYAMA MASAFUMI)

電力中央研究所・地球工学研究所

流体科学領域・主任研究員

研究者番号: 40371471