

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560683

研究課題名(和文) 減災に向けた連続する大地震の揺れ・液状化に対する重要諸施設の詳細応答予測手法構築

研究課題名(英文) Detailed Building Response Analysis Method for Important Facilities under Large Ground Motions and Liquefaction

研究代表者

護 雅史 (MORI, MASAFUMI)

名古屋大学・減災連携研究センター・特任教授

研究者番号：40447842

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、被害が東海から近畿、四国、九州に広がるとも予測されている国難とも言うべき南海トラフで発生する巨大地震から、人の命を守り被害を最小限に留めるため、特に役所・学校や病院、エネルギー施設など、災害時に非常に重要となる諸施設の耐震性能の精度の良い評価に向け、大都市の人口が集中する軟弱地盤の拳動や建物を支える基礎と地盤との動的な相互作用効果を考慮した精度の高い地震応答解析法の構築に関する検討を実施した。

研究成果の概要(英文)：In order to protect people, government offices, schools, hospitals and energy facilities from large earthquake at Nankai Trough, the accurate evaluation of the seismic performance of the various facilities is very important. In this research, a study on the construction of high-precision seismic response analysis method considering the dynamic soil-foundation interaction effect is carried out for above mentioned objective. And new analysis models are improved. Further more, it is mentioned that the importance of the dynamic soil-foundation interaction effect under large earthquake to estimate building responses accurately.

研究分野：耐震工学、地震工学

キーワード：地震防災 耐震安全性

1. 研究開始当初の背景

近年の被害地震においては、RC 建物等について、入力地震動の大きさに比べてその被害が小さかった事例が見られており、その原因として、基礎の滑りや浮上り、あるいは杭基礎と周辺地盤の剥離といった、いわゆる幾何学的非線形動的相互作用効果が挙げられることがある。この点を明らかにするために、これまでに複数の研究者が被災シミュレーション解析を実施してきているが、上述した幾何学的非線形動的相互作用効果に対するモデル化が不十分であるため、現象が完全に解明されるまでには至っていない。また、2011年3月11日に発生した東日本大震災においては、津波や液状化によって、女川では杭基礎建物が転倒し、また、浦安では道路の陥没や対策がなされていなかった住宅で不同沈下が生じ、その後の生活に大きな支障をきたしている。上部建物に比べてあまり重要視されてこなかった基礎構造や地盤変状による被害が今回の地震によって再認識されたと考えられ、今後、地盤や基礎の耐震安全性に対する要望が高まることが予想される。

また、これまでは本震に対する被害推定だけが実施されているが、東日本大震災で見られたように、その後の余震や誘発地震に伴う被災度の進展、あるいは新たな被害が多発することを考えれば、特に災害時の重要諸施設については、これらの地震に対する継続使用可能性を含めた耐震安全性の事前検討が非常に重要である。しかし、この点に着目した研究は、特に基礎構造については、応募者の知る限りほとんど行われていない。また、地盤データ、および地盤モデルの高度化が、これらの検討に不可欠である。

一方、これらの手法は事前対策だけではなく、事後対策にも有効に利用すべきである。南海トラフで発生する巨大地震は、東日本大震災を上回る広域な地震災害をもたらす可能性が十分にある。そのような被害状況下では、人海戦術をもってしても被害の全貌を把握するには相当の時間を有することは火を見るより明らかである。本研究で提案するような即時予測システムは、アイデアとしての斬新さはない。しかし、応募者らはこれまでに東海地域を中心に、様々な機関と共同で、非常に多くの地盤点や建物での戦略的地震観測を実施し、「大都市圏強震動総合観測ネットワーク（東海版）」（飛田他、2007）等のシステム構築も行っている。このシステムを用いれば、ほぼリアルタイムに地震観測記録を入手可能である。さらに、応募者らは、学校や集合住宅の上部構造に対する実情を考慮した解析モデルを構築してきており（榊原他（2007）、白瀬他（2011））、このような成果を本システムの構築にあたり有効に活かすことができる。このシステムや既往の研究成果と本研究の主たる項目である高精度な地震応答予測法を統合することによって、リアルタイム被害予測システムが構築できる。

2. 研究の目的

以上のような背景に基づき、本研究では、被害が東海から近畿、四国、九州に広がることも予測されている国難とも言うべき南海トラフで発生する巨大地震から、人の命を守り被害を最小限に留めるため、特に役所・学校や病院、エネルギー施設など、災害時に非常に重要となる諸施設の耐震性能について、大都市の人口が集中する軟弱地盤の挙動や建物を支える基礎と地盤との動的な相互作用効果を考慮した精度の高い地震応答解析の構築を通して明らかにする。また、巨大地震発生時だけではなく、その後の建物継続使用可能性判断に有効である、余震や誘発地震に対する被災後建物の応答予測が可能な手法にまで拡張する。さらには、既設の地震観測システムとの連携を図ることにより、精度の高いリアルタイム被害予測システムを構築し、減災に向けた事前対策や事後対策に結び付けることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために、研究期間内に大きくは以下の項目を実施する。

- (1) 本震・余震時の精度良い建物挙動予測のための新しい地震応答解析モデルの構築
- (2) 精度のよい建物応答予測に必要な地盤の基本データ、及び地盤モデルのデータベース構築
- (3) 既往の地震観測システムと本研究で検討する被害予測手法を統合した、リアルタイム被害予測システムのプロトタイプ構築

4. 研究成果

- (1) 本震・余震時の精度良い建物挙動予測のための新しい地震応答解析モデルの構築

① 浮上りとねじれを考慮した地震応答解析モデルの構築

これまでに、図1に示すような水平2方向の浮上り、およびこれに連成して発生するねじれ挙動、さらには基礎のすべりを考慮できる直接基礎を対象とした、新しい地震応答解析モデルを構築してきた。本研究では、その滑り、浮き上がりの幾何学的非線形性を考慮した解析モデルの見直し、改善を行った。本解析モデルを用いた応答予測は今後実施していく予定である。

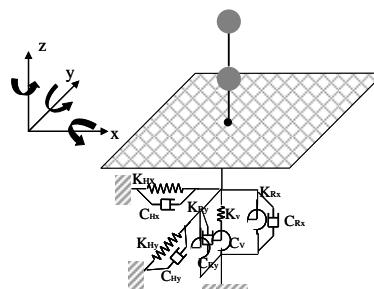


図1 浮上りとねじれを考慮した地震応答解析モデル

② 地下室等の根入れを有する建物への回転入力を考慮した地震時建物非線形挙動に関する検討

地下室などの根入れを有する建物においては、短周期成分の地震波が入力損失効果により、地表面の揺れに比べてやや小さく場合があることが知られており、この効果が設計においても考慮される場合がある。しかし、その一方で、基礎全体が回転する、いわゆる回転動入力が発生するが、この入力が一般建物の地震時挙動に与える影響については十分な検討がされていない。そこで、本研究では、建物応答評価の精度向上を目指して、回転動入力が、上部建物の非線形挙動に与える影響について検討した。

検討においては、上部建物を等価1質点系のせん断型モデルに置換し、バイリニア型の復元力特性を考慮した。また、地盤と建物の動的相互作用効果を考慮するために、振動数依存の地盤インピーダンスをばね剛性とダッシュポット、及び付加質量でモデル化することにより、時刻歴非線形地震応答解析を実現している。本モデル化の考え方自体に新規性はないが、一般建物が多い軟弱地盤においても検討が可能となるパラメータを設定できるようにした点が新たな試みである。

解析では、設定した入力地震動について、基礎固定モデルを用いた場合に想定した最大応答塑性率となるように降伏耐力を設定した上部建物モデルに対して、基礎入力動等、地盤と建物の動的相互作用効果を考慮したモデルとした場合の最大応答塑性率の変動について検討した。また、検討用解析パラメータとしては、根入れ深さ、建物高さ、地盤のせん断波速度を用いた。

解析結果の一例を図2に示す。図2は、建物の等価半径 10m、地盤のせん断波速度  $V_s=100$  m/s、密度  $\rho=1.8t/m^3$ 、ポアソン比  $\nu=0.42$ 、想定した塑性率  $\mu=2$  の場合の検討結果である。横軸は、基礎固定時の建物の固有周期、縦軸は、動的相互作用効果考慮モデルによる最大応答塑性率の想定塑性率  $\mu=2$  に対する比を表している。線種は、根入れ深さの違いであり、建物等価半径に対する比で示している。この図から、1秒付近と2秒周辺での変動が大きいことが分かる。この特性は地震動のスペクトル特性にも依存するが、根入れ基礎による回転動を考慮した場合の

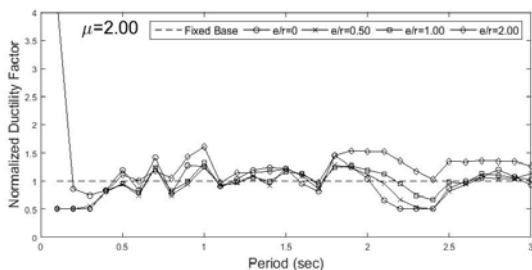


図2 動的相互作用効果考慮モデルによる最大応答塑性率の基礎固定時に想定した塑性率  $\mu=2$  に対する比

応答が大きくなる場合があることがわかり、まだ限られた検討範囲であるが、応答予測精度の向上の点から、回転動入力について注意すべきケースがあることが明らかとなった。

③ 南海トラフの巨大地震に対する地盤と建物の非線形動的相互作用効果を考慮した事務所建物や小学校建物の応答予測

東海地方での大地震における建物被害を予測するため、南海トラフの地震に対する模擬地震動を用いて、図3に示すような東海地方の事務所建物や小学校建物を対象とした地震応答解析を実施した。解析においては、地盤と建物の動的相互作用を考慮できるスウェー・ロッキングモデル (以下 SR モデル) を採用した。また、地盤が軟弱で液状化危険度の高い解析地点においては、有効応力解析により推定した地震動を用いることとした。

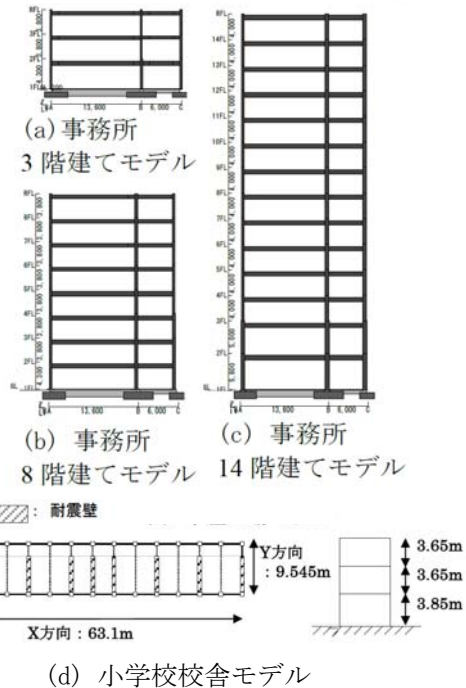


図3 解析に用いた各種対象建物概要

事務所建物は鉄骨 (S) 造を想定し、多質点系等価せん断型モデルに置換した。上部建物の層せん断力一層間変形関係には非線形性を考慮し、ノーマルトリニアモデルを適用した。骨格曲線については、静的増分解析により設定した。減衰定数は、初期剛性に対して 2%の瞬間剛性比例型とした。一方、小学校建物については、鉄筋コンクリート (RC) 造とし、S 造建物と同様に多質点系せん断型モデルとした。復元力特性は  $I_s$  値が相対的に低い桁行方向に対する地震応答解析を実施することとし、骨格曲線は既往の文献に因った。なお、降伏後の耐力低下は考慮していない。また、降伏耐力は、 $I_s$  値から各層で設定するが、本検討では、最小  $I_s$  値が  $I_s \geq 0.6$  となる複数の建物の階数ごとの平均値を用いた。S 造 3 階建事務所建物と RC 造

表1 S造3階建事務所建物の解析諸元

階数	重量 (kN)	階高 (cm)	長辺方向(X方向)				
			剛性(kN/m)			強度(kN)	
			$K_1$	$K_2$	$K_3$	$Q_1$	$Q_2$
3	5443	380	$1.93 \times 10^5$	$1.49 \times 10^5$	$7.23 \times 10^3$	3379	5511
2	4982	380	$1.76 \times 10^5$	$1.13 \times 10^5$	$4.18 \times 10^3$	3515	5556
1	5383	430	$1.76 \times 10^5$	$5.74 \times 10^4$	$6.73 \times 10^3$	5215	7083

表2 RC造小学校建物の解析諸元

階数	重量 (kN)	階高 (m)	桁行方向(X方向) II期Is値0.6~				
			剛性(kN/m)			強度(kN)	
			K1	K2	K3	Q1	Q2
1	5721	3.85	$1.38 \times 10^7$	$3.32 \times 10^6$	$2.77 \times 10^4$	1777	13777
2	6504	3.85	$1.46 \times 10^7$	$3.51 \times 10^6$	$2.92 \times 10^4$	1877	14551
3	6504	3.85	$1.42 \times 10^7$	$3.40 \times 10^6$	$2.84 \times 10^4$	1820	14111

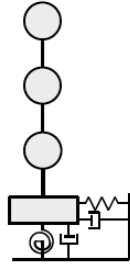


図4 解析に用いたSRモデル

小学校建物の解析諸元を表1、2に示す。

検討では、根入れ(1.5 m)を考慮した基礎入力動を入力に用いる場合や、図4に示すSRモデルを用いて解析を行った。また、事務所14階モデルについてはSRモデルの他、軟弱地盤上では支持杭基礎を想定することで、ロッキングの影響が小さいと考え、スウェイモデル(以下、Sモデル)による検討を行っている。

地震波としては、内閣府より2012年に公表された工学的基盤の模擬地震波のうち、名古屋市内の9地点を選択し、逐次非線形解析により表層地盤の非線形増幅特性を考慮した地表の地震波を用いた。解析に用いた入力波の減衰定数5%のトリパタイトスペクトルの一例を図5に示す。

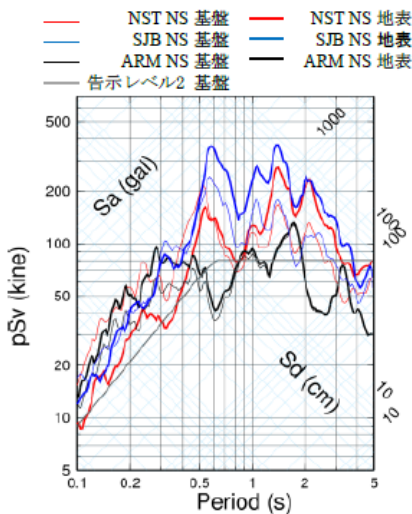


図5 解析に用いた入力地震波のトリパタイトスペクトル(減衰定数5%)

図6にS造事務所建物の最大応答結果(累積塑性変形倍率)、図7にS造事務所建物の最大応答結果(ベースシア係数)、また、図中には参考のため、2011年東北地方太平洋沖地震で観測されたK-NET古川(MYG006)のEW方向の波形を用いた推定結果(コ)、あるいは、相互作用効果を考慮しない基礎固定モデルの結果を合わせて示している。図6より、事務所14階モデルの基礎固定モデルでは、累積塑性変形倍率が10以下となったが、SモデルあるいはSRモデルの場合には、事務所3階モデルと同様に軟弱地盤であるウ:NST、ク:SJB、ケ:TTBでは15以上と大きくなった。また、図7よりベースシア係数は、1以上となる地点が見られ、2次設計で用いられる外力よりも大きな地震力が作用する可能性がある事が示唆される。特に、SRモデルにおいて大きな累積塑性変形倍率を示したウ:NST、ク:SJB、ケ:TTBで15以上となった地点でベースシア2程度の値が推定された。

ア:ARM イ:CHC ウ:NST エ:NUN オ:NUT カ:OYO キ:SDB ク:SJB  
ケ:TTB コ:MYG006 ア〜ケはNS成分 コはEW成分

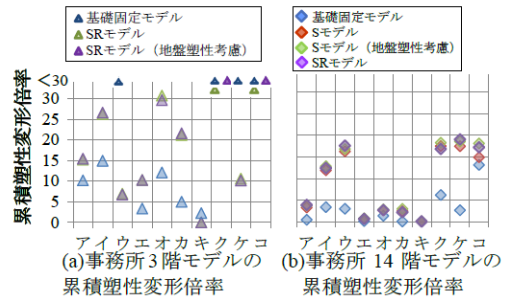


図6 S造事務所建物の最大応答結果(累積塑性変形倍率)

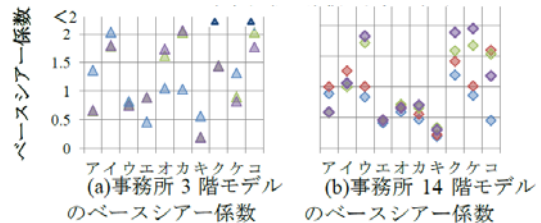


図7 S造事務所建物の最大応答結果(ベースシア係数)

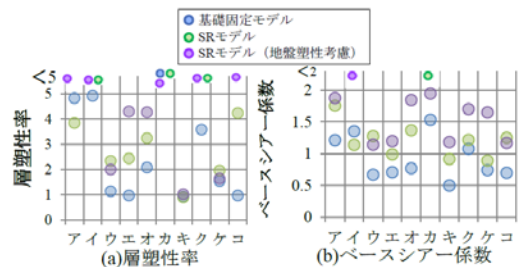


図8 RC造小学校建物の最大応答結果



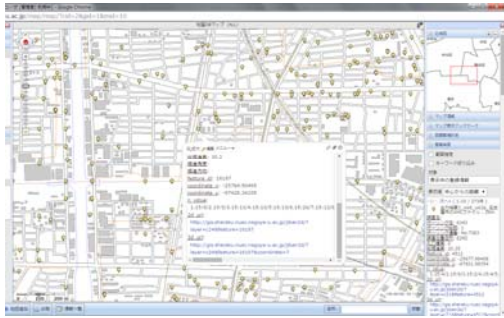


図9 ボーリング地点表示画面 (例)

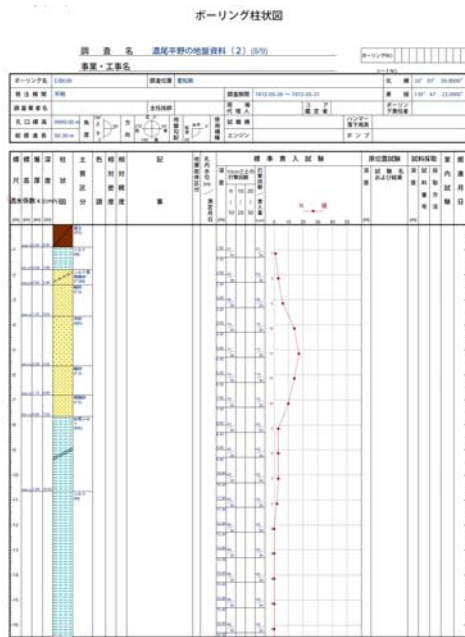


図10 ボーリング柱状図表示画面の一例

図8に、RC造小学校建物の最大応答結果を示す。これより、基礎固定モデルではア:ARM、イ:CHC、カ:OYO、ク:SJBで大きな層塑性率を示しており、大きな損傷が生じる可能性を示している。これらの地点では応答スペクトルより、建物の固有周期付近に大きな入力があったためと考えられる。ベースシア係数については、基礎固定モデルではどの地点でも1程度であり、入力レベルには大きな差は見られない。SRモデルでは基礎固定モデルに比べて大きくなる傾向が見られる。低層RC造はSRモデルにすることによる周期の増大がその要因の一つと考えられる。

以上の検討結果から、基礎固定モデルでの解析結果では設計範囲内であっても、動的相互作用を考慮することにより2次設計で用いられるベースシア係数を超える可能性がある地点があること、特にRC造小学校のような建物は動的相互作用の効果により固有周期の伸びが大きく、長周期成分を多く含む地震波に対しては影響を受けやすいと考えられること、南海トラフの巨大地震では継続時間の長い揺れが予想されるため、S造ではベースシア係数が1以下でも累積塑性変形倍率が大きくなり損傷を受ける可能性があることなどが明らかとなった。

- (2) 高精度な地盤モデルの構築に向けた地盤の基本データ、及び地盤モデルのデータベース構築

本研究では、解析に必要な地盤モデルの構築に向け、これまでに収集してきた複数の機関がボーリング調査結果のデジタル化、データベース化を行った。図9にボーリングデータの位置情報を、GISを用いて表示した例を示す。このシステムそのものは本研究の成果ではないが、ここに表示される土質情報を分かりやすく示すための土質柱状図が表示できるように、pdf化を行った。その一例を図10に示す。

- (3) リアルタイム被害予測システムのプロトタイプの構築

本剣道課題については、本研究期間では、十分に実施できなかった。今後これまでの成果を反映させつつ、継続して実施していく予定である。

## 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2件)

- ① 丹羽智是、護雅史、福和伸夫 : 2011年東北地方太平洋沖地震と南海トラフで発生する地震に対する動的相互作用を考慮した建物応答評価、日本建築学会東海支部研究報告集、査読無、第51号、pp. 137-140、2013.2
- ② 周方圓、護雅史、福和伸夫、飛田潤 : 地震観測記録に基づく建物と地盤の相対変位と地震時土圧の関係、日本建築学会構造系論文集、査読有、第77巻、第675号、pp. 685-693、2012.9

[学会発表] (計11件)

- ① 都築和敏、平井敬、護雅史、福和伸夫 : 強震観測記録に基づく濃尾平野における地盤震動特性の変動域、第14回日本地震工学シンポジウム、2014.12、国立オリンピック記念青少年総合センター(東京都・渋谷区)
- ② 小田侑生、護雅史、福和伸夫 : 表層地盤増幅評価手法の違いが地震動強さに与える影響、日本建築学会学術講演梗概集、pp157-158、2014.9、神戸大学(兵庫県・神戸市)
- ③ 都築和敏、護雅史、宮腰淳一、飛田潤、福和伸夫 : 強震観測記録と距離減衰式を用いた愛知県の地盤震動特性に関する研究、日本建築学会学術講演梗概集、pp. 381-382、2014.9、神戸大学(兵庫県・神戸市)
- ④ 川合佳穂、丹羽智是、護雅史、福和伸夫 : 南海トラフ巨大地震に対する被害想定に関する研究 その1 地盤条件やモデル化が表層地盤増幅特性に与える影響、日本建築学会学術講演梗概集、

- pp. 1133-1134、2013. 8、北海道大学（北海道・札幌市）
- ⑤ 丹羽智是、川合佳穂、福和伸夫、護雅史：南海トラフ巨大地震に対する被害想定に関する研究 その 2. 強震動予測結果に基づく動的相互作用を考慮した建物応答評価、日本建築学会学術講演梗概集、pp. 1135-1136、2013. 8、北海道大学（北海道・札幌市）
- ⑥ 杉山拓真、吉田圭佑、護雅史、飛田潤、福和伸夫：大規模工場が立地する不整形地盤の震動特性に関する研究、日本建築学会学術講演梗概集、pp. 205-206、2013. 8、北海道大学（北海道・札幌市）
- ⑦ 護雅史：基礎構造の二次設計も配慮した動的相互作用効果の耐震設計への導入、第 9 回構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム、2013.1、建築会館（東京都・港区）
- ⑧ 護雅史、丹羽智是、福和伸夫：2011 年東北地方太平洋沖地震における動的相互作用を考慮した建物応答評価 その 1 解析概要と鉄骨造建物のマクロ的評価、日本建築学会学術講演梗概集、pp. 645-646、2012. 9、名古屋大学（愛知県・名古屋市）
- ⑨ 丹羽智是、護雅史、福和伸夫：2011 年東北地方太平洋沖地震における動的相互作用を考慮した建物応答評価 その 2 地震応答解析結果とその分析、日本建築学会学術講演梗概集、pp. 647-648、2012. 9、名古屋大学（愛知県・名古屋市）
- ⑩ 周方圓、護雅史、福和伸夫：基礎の浮上りを考慮した低層 RC 建物地震時応答解析、日本建築学会学術講演梗概集、pp. 663-664、2012. 9、名古屋大学（愛知県・名古屋市）

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp/~m.mori/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

護 雅史 (MORI, Masafumi)

名古屋大学減災連携研究センター・特任教授

研究者番号：4 0 4 4 7 8 4 2

### (2) 研究分担者

福和伸夫 (FUKUWA, Nobuo)

名古屋大学減災連携研究センター・教授

研究者番号：2 0 2 3 8 5 2 0

飛田 潤 (TOBITA, Jun)

名古屋大学災害対策室・教授

研究者番号：9 0 2 1 7 5 2 1

### (3) 連携研究者

無し