

令和 6 年 4 月 19 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04334

研究課題名（和文）複合災害時の建物機能診断モニタリングシステムによるレジリエンスの向上に関する研究

研究課題名（英文）Research on enhancement of resilience by building monitoring system considering complex disasters.

研究代表者

藤田 皓平 (Fujita, Kohei)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：40648713

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、津波や大雨などにより浸水した状態で地震が発生するという複合災害を対象とし、水没した状態の建物の地震時挙動に焦点を当て、浸水の程度によって建物挙動の変化について解析的検討と実験的実証を行った。検討対象建物は基礎免震建物とし、免震ピットに流体が滞留している状態で長時間長周期地震動が作用することを想定した。滞留した流体は地震入力による慣性力に加えて、免震基礎スラブが動くことによっても流体の波高変化が生じることを実験的に実証した。さらに、流体-構造連成振動解析により免震クリアランスや浸水深によっては水没した状態の免震建物の免震性能は低下し、上部構造の加速度が増大することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果を活用することで、都市を構成する建物において様々な災害が同時に発生するというような通常の設計や建物の運用では想定されていない事態が起こったとしても、建物の安全性や機能維持の判断のための建物応答特性を事前に把握することができる。今後は、本研究の成果をさらに展開することで、複合的な災害に対しても様々な対策レシピを建物単体や地域レベルでの事業継続計画の策定などで対応することが可能となることが期待される。

研究成果の概要（英文）：This study focuses on the seismic behavior of buildings in the event of earthquakes occurring in states affected by compound disasters such as tsunamis or heavy rainfall. Analytical investigations and experimental demonstrations were conducted to examine how the degree of inundation affects the behavior of buildings. The target buildings are base-isolated structures, and the study assumes prolonged exposure to long-period seismic motions while fluid remains in the isolation pits. The presence of still fluid was experimentally demonstrated to result in changes in wave height not only due to inertial forces from seismic input but also from movement of the base-isolation slab. Furthermore, through fluid-structure interaction vibration analysis, it was revealed that the seismic performance of base-isolated buildings in submerged states may deteriorate depending on factors such as isolation clearance and inundation depth, leading to increased acceleration of the upper structure.

研究分野：建築構造

キーワード：複合災害 連成振動 免震建物 地震時応答 長周期長時間地震動

1. 研究開始当初の背景

地震大国である日本では、十分な耐震性を有した建物で構造躯体の損傷が比較的軽微な場合であっても、ライフライン（電気・水道・ガス）が広域で途絶することで建築設備等が機能不全になることや建物内の非構造部材の損傷によって建物を継続して利用不可となる事例が挙げられる。さらに、地球環境の変化に起因するとされる異常気象に伴い、台風の大型化による暴風雨や線状降水帯による局所的に激しい降水による浸水被害などもBCPの対象とすることが求められている。種々の災害シナリオ（マルチハザード）に対して事業継続性を確保するために、建物の構造的安全性や建物に求められる機能性を評価するモニタリングシステムの構築とその効果的な運用は、レジリエンス指標において災害発生時の機能低下を抑制し、事業再開可能なレベルまで早期回復することを可能にすることが期待される(Fig.1)。そのため、災害拠点病院をはじめとした重要防災拠点のBCPレベルを高度化するという観点で、信頼性の高いモニタリングシステムの構築が社会的に強く要請されている。

建物を対象としたモニタリングシステムの多くは、地震計などの加速度の計測を主体としたもので、地震時の建物の揺れから構造性能の健全性の評価が主体である。しかしながら、機能維持に影響する非構造部材や建築設備の物理的な損傷や破損や、地震以外の災害に起因する建物の機能損失など多様な災害に対応するためには、加速度センサのみではなく、種々のセンサ（例えば、監視カメラなどの映像データなど）からの情報を統合して利用できるプラットフォームを構築し、災害時に建物の機能復元性を高めることは解決すべき課題である。

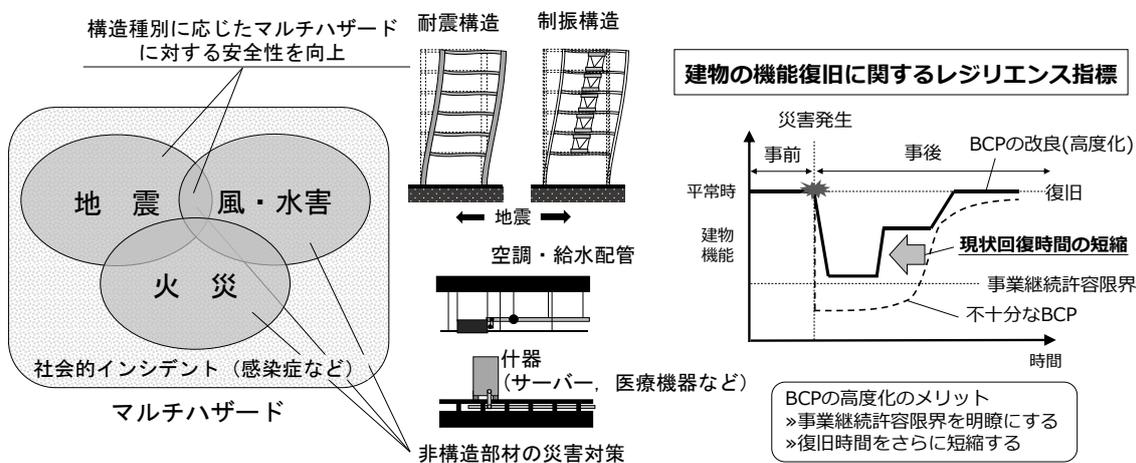


図1 種々の災害シナリオ（マルチハザード）を想定したレジリエンス指標

2. 研究の目的

当研究課題の研究開始当初の研究目的は、上述の背景も踏まえて複合的な災害に対応するために、加速度計による既存の構造ヘルスマニタリングに加えて、画像センサなどを活用して種々のデータを統合した次世代型モニタリングシステムを開発することと、収集したデータから建物の健全性や機能維持性に影響を及ぼす要因を抽出することとしていた。しかしながら、次世代型モニタリングシステムの構築を進める上で、当研究が対象とする複合災害をどのように定義するのかという疑問点が生じた。インフラ等が広域で機能不全に至っている場合は建物単体でのモニタリングの必要性・重要度はそれほど高くはないと考えられる。これは設備機器の稼働状況の把握は既存のシステムでも十分に対応が可能であるためである。そこで、建物単体でのモニタリングシステムを構築する意義や有用性を鑑みて、当研究課題では建物が浸水した状態で地震が発生するシナリオを想定した。このとき、浸水深や浸水が生じている場所などの浸水状況と加速度計測による建物の揺れの相関性は不明である。また、既往の関連研究でも浸水災害と地震災害を同時に発生するという複合災害を扱ったものはほとんど見受けられなかったことから、浸水災害と地震災害を同時に考慮した時の建物の挙動を明らかにすることを本研究課題の当初の研究目的を達成するための課題として研究の目的とする。

具体的な研究対象としては、浸水被害を受ける可能性が高い地下階に免震層を有する基礎免震建物を対象とした。免震層が浸水した状態で免震建物に地震動が作用することを想定した時、免震スラブの動き、すなわち免震層変形が流体の挙動にも影響を及ぼす。流体-構造連成振動問題である。そこで、免震ピット内が水没した状態で地震入力を受けた時の現象を把握することを目的とした振動台実験による実験的検討と、流体解析による数値シミュレーションにより免震基礎スラブに作用する流体力の評価を行う。流体-構造連成解析手法として、流体解析と構造解析を連動させる方法を構築した上で、水没した免震建物の地震時応答として免震層変位や上部構造応答に及ぼす影響を解析的に検討する。

### 3. 研究の方法

本研究で対象とする事象は、浸水災害に起因して免震ピット内に流体が滞留している状態で免震建物に地震が発生することである。この事象の特徴として滞留している流体は、地震動による強制変位入力(いわゆる地震慣性力)と免震基礎スラブと擁壁までのクリアランスが免震層の変形によって時々刻々動的に変化することで、免震基礎スラブの動きも流体のスロッピングへの起振力になる。したがって、流体の波高変化はこれらの両者の影響を考慮する必要がある。一方、免震基礎スラブにおける動的な釣合いを考えると、地震時慣性力と積層ゴムやオイルダンパーによる復元力と減衰力、上部構造ベースシア(第1層の層せん断力)に加えて、免震基礎スラブに壁面に作用する流体力(=水圧差)が釣合うことになる。すなわち、免震基礎スラブの動きは、流体の有無によって異なるものと考えられる。このような問題を直接扱うためには、流体の動きを解析する流体解析と免震建物の地震時応答を評価する構造解析を連動させる必要がある。図2には、流体-構造連成振動問題の概要を示す。流体解析では地動入力と免震基礎スラブの位置を時々刻々変化させながら流体力を算出する。得られた流体力は免震建物への強制外力とみなせることから地震と流体力を入力とした構造解析を行う。これを時間ステップごとに交互に行うことで、流体の影響を考慮した免震建物の応答を評価することが可能となる。

流体解析は、オープンソースであるOpenFOAMで実行し、構造解析はせん断質点系に対する時刻歴応答解析により行う。ただし、流体解析と構造解析では、解析が不安定にならないための時間ステップが異なり、特に流体解析は十分小さな時間ステップでの解析が必要となる。また、結果の出力用の時間刻みを細かくするとファイル書き出し・読み取りの時間が増えることから解析時間の増大につながるため、現実的な解析時間で解析を実行するためには適切な時間刻みの設定が必要となる。一方、免震構造では、免震1次周期が比較的長いことから時間ステップ0.01s程度でも十分である。本研究では、両者の解析を統合させた一連の解析コードを作成し、浸水深や免震クリアランスなどの種々の影響因子によって水没した免震建物の免震性能がどの程度変化するのか、上部構造の加速度などに着目してその影響度を定量的に評価する。

また、この事象について流体力の影響を定性的に評価するため、振動台実験による検証実験も計画した。図3は、免震建物を模した模型が水没した状態で加振を行う実験装置の模式図である。本実験では、得られた擁壁部と免震基礎スラブの動きを流体解析上で入力することで、流体の波高変化を比較する。これにより流体解析の妥当性を検証することが可能となった。

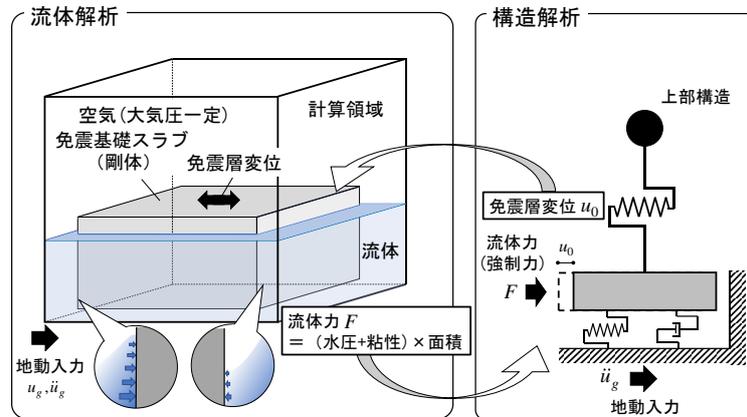


図2 免震ピット内への浸水と地震入力を同時に考慮した流体-構造連成振動問題

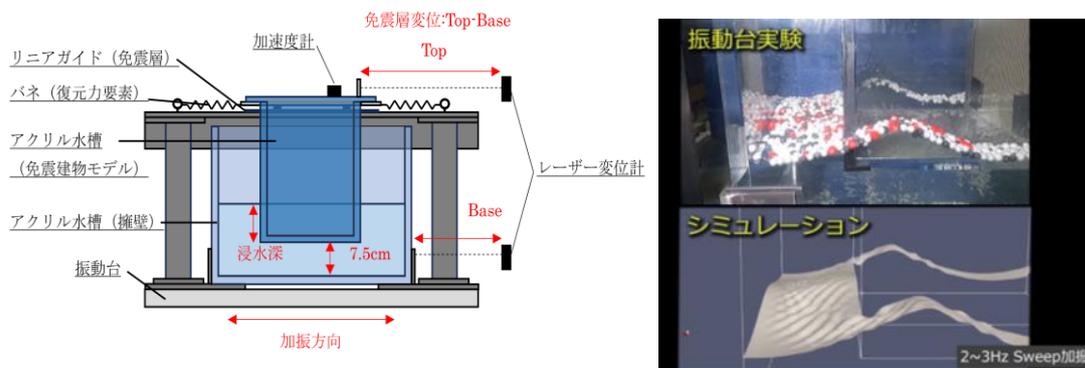


図3 振動台実験と流体解析シミュレーションとの比較

#### 4. 研究成果

免震建物への地震入力として、長周期長時間地震動を想定すると特定の振動数の多サイクル正弦波を入力動として採用した。流体解析では変位制御で計算領域全体を加振することから、変位振幅を0.1mで一定とし、正弦波の周期を1.0s~4.5sまで0.5sごとに変化させた場合の応答の変化について検討した。具体的な免震建物の規模としては、免震層基礎スラブ30m×30mとし、免震クリアランスを1m、浸水深の基準値を3mとした。図4に本解析により得られた免震層最大絶対加速度、免震層最大層間変位について、入力周期ごとの変化を示す。図中の黒線が浸水なし（免震建物単体）、赤線・青線が浸水あり（連成解析）を表す。入力周期が短い場合は、流体力が過渡的な応答となったが、多くの場合は定常的な流体力が建物に作用することが確認している。また、図より免震建物の上部構造の応答に関しては、免震層の共振周期が短周期側にずれており、最大値は減少傾向にある。また、それに伴い免震層加速度応答は増加している。これは、免震層に流体が滞留することで、免震層変位が減じられ上部構造の加速度応答が増大することを示唆している。特に、入力周期3.5[s]では、従来の免震周期時の最大加速度を上回るような応答となっている。入力周期1.0[s]の入力で応答が増大している理由は、変位振幅一定の入力であるため入力速度が大きくなり、瞬間的な応答が大きくなっているためである。

次に、免震クリアランスの違いについて検討した。図5(a)では、免震クリアランスを変数とした場合の結果を示す。ただし、浸水深については3.0[m]で固定する。図より、免震クリアランスが小さいほど加速度増大の影響が大きくなっていることがわかる。これは、免震クリアランスが小さいほど、免震層の動きの影響度が相対的に大きくなるためであると考えられる。免震クリアランスが異なると、応答がピークになる入力周期も変化しており、スロッシングの周期が異なるためである。次に、浸水深の違いについて検討する。図5(b)では、浸水深を変数とした場合の結果を示す。ただし、免震クリアランスは1.0[m]で固定する。図より、浸水深1.0[m]は浸水なしの時とほとんど変化がないことがわかる。また、浸水深が2.0[m]と3.0[m]では、応答がピークになる入力周期は変わらず、応答の周期的な特性に変化はないといえる。しかしながら、浸水深が大きいほど、流体との免震基礎スラブの接地面積が増えることから流体力の影響が相対的に大きくなり、応答は増大する場合もあることを明らかにした。

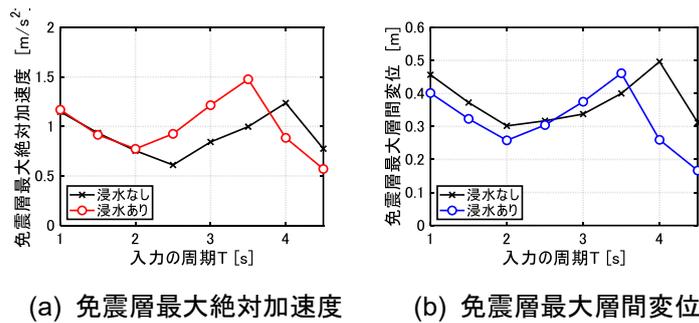


図4 流体-構造連成振動解析結果

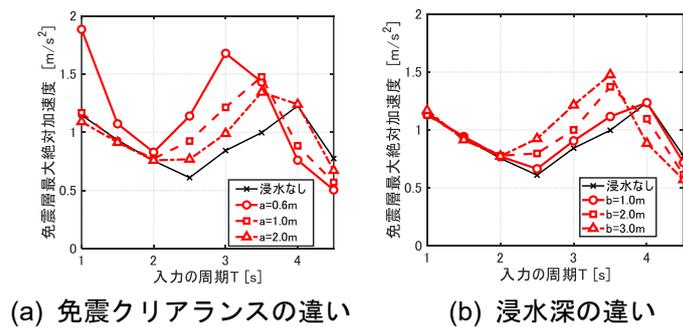


図5 種々のパラメータが流体-構造連成振動に及ぼす影響

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 土田陽奈子, 藤田皓平	4. 巻 89
2. 論文標題 断層近傍地震動を受ける建物内でロッキング振動する質量偏心のある剛体の壁との衝突を考慮した転倒限界	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 148 ~ 156
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.89.148	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hosoda Mizuki, Fujita Kohei	4. 巻 10
2. 論文標題 Robust optimal damper placement based on robustness index simultaneously considering variation of elastoplastic design criteria and input level	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Frontiers in Built Environment	6. 最初と最後の頁 01 ~ 16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fbuilt.2024.1353827	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 藤田 皓平、林 達也	4. 巻 70B
2. 論文標題 間柱型高減衰ゴムダンパーの実効減衰性能を考慮した最適ダンパー配置設計	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 構造工学論文集B	6. 最初と最後の頁 163 ~ 170
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijjse.70B.0_163	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 細田瑞生, 藤田皓平	4. 巻 69B
2. 論文標題 極限的ダブルインパルスを受ける不確定ダンパー付建築構造物の塑性率を指標としたロバスト最適設計	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 構造工学論文集B	6. 最初と最後の頁 181, 189
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijjse.69B.0_181	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 藤田皓平, 綿谷遼太	4. 巻 69B
2. 論文標題 非線形オイルダンパーを有する平面骨組モデルのダンパー減衰性能のばらつきに対する地震時応答上限値の簡易評価法	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 構造工学論文集B	6. 最初と最後の頁 172, 180
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijjse.69B.0_172	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計7件(うち招待講演 0件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 立石海斗
2. 発表標題 基礎免震層への浸水と地震入力を同時に考慮した流体-構造連成解析に基づく免震性能評価(その1 振動台実験及び流体力のモデル化)
3. 学会等名 建築学会大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 藤田皓平
2. 発表標題 基礎免震層への浸水と地震入力を同時に考慮した流体-構造連成解析に基づく免震性能評価(その2 流体-構造連成解析手法と解析結果)
3. 学会等名 建築学会大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Fujita Kohei
2. 発表標題 ULTIMATE SCENARIO EVALUATION OF BASE-ISOLATED BUILDINGS SUBJECTED TO FLOODING DISASTER AND SEISMIC INPUT BASED ON STRUCTURE-FLUID INTERACTION ANALYSIS
3. 学会等名 18th World Conference of Earthquake Engineering (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 木村太喜
2. 発表標題 免震ヒット浸水を想定した流体計算による流体圧力を外力として受ける免震建物の長周期長時間地震時加速度応答
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小宅裕斗
2. 発表標題 オイルダンパーを有する制振建物を対象とした伝達関数のフィッティングに基づくシステム同定
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤田皓平
2. 発表標題 吊り配管の振動台加振実験による画像モニタリングシステムの精度検証
3. 学会等名 近畿支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤田皓平
2. 発表標題 吊り配管を対象とした画像モニタリングシステムの振動台加振実験による精度検証
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------