

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 15 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420592

研究課題名(和文) 津波荷重に対する免震建物の構造安全性評価と安全性確保のための構造設計ガイドライン

研究課題名(英文) A PROPOSAL OF EVALUATION CRITERIA OF STRUCTURAL SAFETY AND STRUCTURAL DESIGN  
GUIDELINE FOR SEISMICALLY ISOLATED BUILDINGS AGAINST TSUNAMI LOAD

研究代表者

小林 正人 (Masahito, Kobayashi)

明治大学・理工学部・専任教授

研究者番号：50373022

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)：2011年に発生した東北地方太平洋沖地震では、津波により沿岸部に壊滅的な被害が生じた。本研究では、免震建物について南海トラフ地震を想定した津波浸水予想に関する調査および分析を行った。さらに、津波荷重に対する免震建物の構造安全性の判定手法を提案するとともに、その適用性を検証した。加えて、津波荷重の動的な作用と免震建物の応答の関係について弾性理論解および時刻歴応答解析により分析を行った。

研究成果の概要(英文)：The Pacific coast of Tohoku Earthquake in 2011 caused destructive damages by tsunami in the coastal area.

In this study, we survey and analyze the expectation of tsunami inundation triggered by Nankai Trough earthquake for seismically isolated buildings. And, we propose evaluation techniques of structural safety of seismically isolated buildings against tsunami load and exhibit applicability of the evaluation criteria. In addition, the relationship between dynamic effect by tsunami load and response of seismically isolated buildings is explained by elastic theoretical solution and time history response analysis.

研究分野：建築構造

キーワード：建築構造・材料 構造解析 免震 津波 耐震設計 構造設計

## 1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では津波による災害は甚大なものとなった。また、今後発生が予想されている南海トラフ沿いの海溝型巨大地震においても甚大な津波被害の発生が懸念されている。これまで、各省庁や沿岸部の自治体は、従前の津波避難に関するガイドラインの見直しを行うとともに、多岐にわたる津波対策に着手している。また、建築構造に関わる取り組みとしては、建物の津波被害に整合した津波荷重算定法の提案、津波避難ビルの構造設計法の提案などが挙げられる。

東北地方太平洋沖地震後の調査によると、地震後に津波避難ビルに指定された建物の用途は、教育施設が最も多く、次いで居住施設であることが判明している。これらの用途には一般に建築主や使用者から高い耐震性能が求められ、近年、免震構造の採用の要求が急速に高まっている。したがって、津波浸水予想地域において免震構造が採用される可能性は極めて高く、すでに基本設計の検討事例などが報告されている状況にある。

一方、免震構造の津波被害については、4m浸水した建物が調査されているが、免震部材の取付部の発錆などが報告されている以外には、構造被害は確認されていない状況にあり、津波に対する免震建物の構造挙動の詳細は、明らかになっていないのが実情である。

## 2. 研究の目的

津波浸水予想地域に建つ免震建物の構造安全性確保のための構造設計ガイドラインの提案を最終目的として、免震構造の終局挙動を踏まえた安全性確保のための設計条件を提示する。設計条件の抽出には、ケーススタディを中心に行い、その際、地震荷重に対する上部構造の耐力余裕度、免震部材の大変形時の特性から、津波荷重に対する抵抗性と耐震性能の関係を明らかにする。さらに、実際の津波は動的に作用することから、津波荷重の動的な作用と免震建物の応答の関係について、応答解析を行い、安全性を検証する。

## 3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために次の3つの検討を行う。

(1) 南海トラフ地震を想定した津波浸水予想地域内の免震建物調査

全国の免震建物調査を行い、その位置情報を把握する。また、近年、津波を伴う大地震として懸念されている南海トラフ地震による津波浸水予想の調査を行う。これらの結果より、想定した地震が発生した際に津波により浸水が予想される免震建物を把握する。

(2) 津波荷重に対する免震建物の構造安全性の判定手法の提案

津波荷重に対する免震建物の簡易な構造安全性の判定手法の提案を行う。加えて、鉄筋コンクリート造建物を事例として、提案す

る判定手法の適用性を示す。

(3) 津波荷重の動的な作用と免震建物の応答の分析

津波荷重の時間変化を考慮した津波荷重の時刻歴モデルを作成し、その荷重に対する1質点系モデルの変位応答を解析することで、津波荷重が免震建物の応答に及ぼす動的作用の有無やその影響について分析する。

## 4. 研究成果

本研究により、以下のような研究成果が得られた。

(1) 南海トラフ地震を想定した津波浸水予想地域内の免震建物調査

① 既存免震建物の調査

(財)日本建築センターが発行する「ビルディングレター」に掲載されている性能評価シートにより、全国の免震建物調査を行った。

1987～2014年に掲載された性能評価シートを調査した結果、全国の免震建物の約半数にあたる1501棟の情報を収集することができた。図1にその位置情報を示す。免震建物は東京都や愛知県、大阪府などの大都市に集中している。また、大都市以外にも、過去に震災を受けた地域に多く建設されており、地震に対する防災意識の高さがうかがえる。このようなことから、全国の既存免震建物棟数の約半数にあたる1501棟の免震建物の情報で、全国の免震建物の分布特性を概ね再現することができているといえる。さらに、海岸付近にも比較的多くの免震建物が建設されていることから、津波に対する免震建物の構造安全性を確認する必要性が認められる。

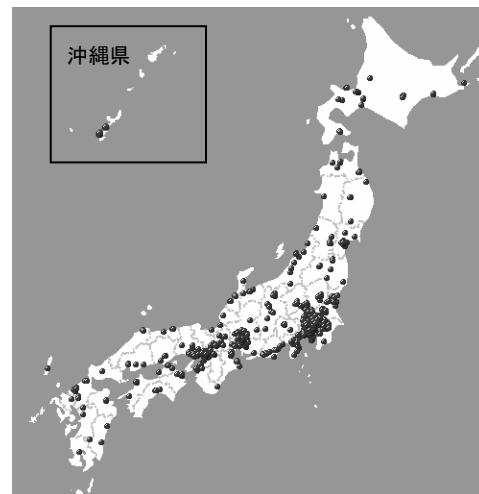


図1 免震建物分布図

② 津波浸水予想の調査

内閣府および各自治体から公表されている津波浸水予想やハザードマップにより、南海トラフ地震を想定した際の津波浸水予想の調査を行った。現在公表されている津波浸水予想は、10mメッシュで計算されたものであり、海域や陸域、堤防の地形データ等の詳細地形も考慮されており、関係都府県において津波浸水想定が公表されている。また、津

波浸水予想は想定する地震発生条件により大きく異なる。そのため、浸水予想は断層すべりが生じる領域や規模に応じて様々なケースが想定されており、各ケースについて津波浸水予想が公表されている。ここで、南海トラフ地震発生時の津波により浸水が予想される免震建物の調査手順を以下に示す。

- 手順1. ①の調査結果より得られた建物所在地を地図上で確認する。
- 手順2. 内閣府および各自治体から公表された浸水予想の調査を行う。
- 手順3. 1.と2.を比較し、免震建物の浸水の有無および浸水深を把握する。

なお、地域によって浸水深が最大となるケースが異なるため、内閣府や各自治体で公表されているデータにおいて、地域ごとに全ケースの浸水予想を調査し、そのうちの最大値を当該地域の予想浸水深として採用した。さらに、内閣府と各自治体が公表している浸水予想が異なる場合には、予想浸水深が大きい方の値を採用した。

南海トラフ地震を想定した津波により浸水すると予想される免震建物を調査した結果、1501棟の免震建物のうち、62棟が南海トラフ地震による津波により浸水する予想となった。図2に各都道府県の免震建物棟数および南海トラフ地震発生時の津波により浸水が予想される免震建物棟数を示す。なお、



図2 免震建物棟数と浸水予想棟数

図2の図中の数字は免震建物棟数、( )内にはそのうち津波の影響で浸水が予想される免震建物棟数を示す。図2より、南海トラフ地震による津波で浸水が予想される都道府県の免震建物棟数は、高知県では8棟のうち7棟にのぼるが、他の都道府県においては各都道府県の免震建物棟数の半数以下であった。また、浸水する建物のうち大半が2m以下の浸水予想であったが、2mを超える浸水が予想される免震建物は10棟存在した。さらに、浸水が予想される建物に多く用いられている免震部材は、積層ゴムでは天然ゴム系積層ゴムと鉛プラグ入り積層ゴム、その他は、すべり支承が特に多く確認された。

## (2) 津波荷重に対する免震建物の構造安全性の判定手法の提案

### ① 提案する判定手法

本研究で提案する津波荷重に対する免震建物の構造安全性評価基準(以下、評価基準)を図3に示す。本手法は、免震層の水平挙動に着目し、免震層の復元力特性と津波荷重の関係から構造安全性を評価し、積層ゴムのハードニング特性に合わせて3段階で判定する。

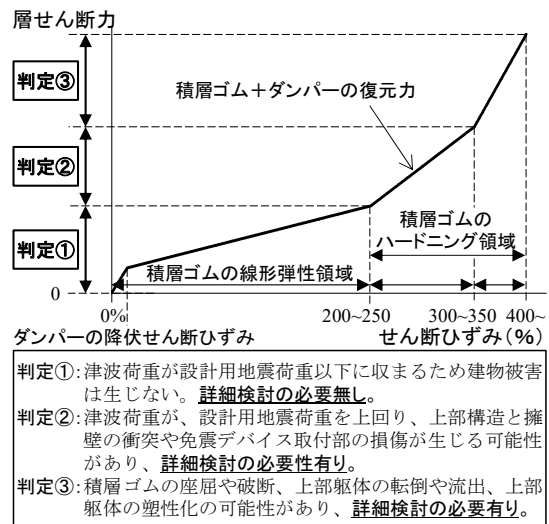


図3 津波荷重に対する免震建物の構造安全性評価基準

### ② 評価基準の適用性

提案する評価基準の適用性を津波荷重および地震荷重作用時の免震建物の構造挙動の違いに着目することで検証する。

解析対象建物は、板状共同住宅を想定した基礎免震建物モデル(以下、共同住宅モデル)および事務所ビルを想定した基礎免震建物モデルである。本報告では、共同住宅モデルの結果を示す。共同住宅モデルは、地上10階建ての鉄筋コンクリート造、免震部材に天然ゴム系積層ゴム一体型鋼材ダンパーを使用している。図4に基準階伏図、図5にX1通り軸組図、図6に免震部材配置図、表1に免震部材諸元を示す。

各部材の部材モデルおよび履歴則は、柱をファイバーモデル、大梁をM-θモデルとし

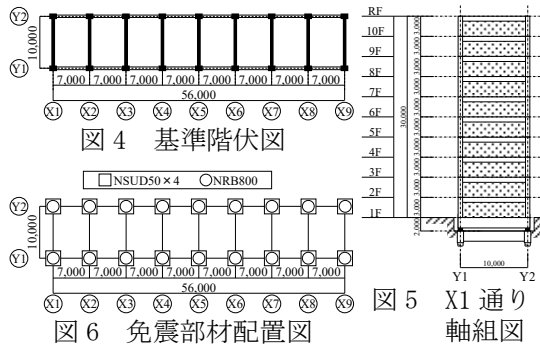


図4 基準階伏図

図6 免震部材配置図

図5 X1 通り 軸組図

表1 免震部材諸元

| 免震部材の種類 | NRB800                       | ダンパーの種類    | NSUD50×4 |
|---------|------------------------------|------------|----------|
| 基数      | 18                           | 基数         | 18       |
| 有効ゴム径   | 800                          | 鋼材         | SN490B   |
| 寸法・基準値  | せん断弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> ) | ダンパーの本数    | 4        |
|         | ゴムの総厚(mm)                    | 限界変形量(mm)  | 750      |
|         | 基準面圧(N/mm <sup>2</sup> )     | 降伏荷重(kN)   | 232      |
|         | 水平剛性(kN/m)                   | 一次剛性(kN/m) | 8320     |
|         | 限界ひずみ(%)                     | 二次剛性(kN/m) | 144      |
|         | 375                          | 降伏変位(mm)   | 27.9     |

復元力特性は武田モデルとする。また、積層ゴムにはハードニング特性を考慮する。ハードニング特性は、せん断ひずみ 250%までを線形限界とし、250%から一次剛性の3倍、350%から一次剛性の7倍の剛性とする。

本検討では、津波荷重と設計用地震荷重を用いて荷重増分解析を行う。津波荷重は式(1)で示される静水圧式と、式(2)で示される松井の評価式(以下、松井式)を用いる。

$$Q_r = \rho g B(1-\gamma) \int_{z_1}^{z_2} (a\eta - z) dz \quad (1)$$

$$F_r = \frac{1}{2} \rho C_d B M_d \quad (2)$$

ここで、 $\rho$ は流体の単位体積質量(t/m<sup>3</sup>)、 $g$ は重力加速度(m/s<sup>2</sup>)、 $B$ は受圧面の幅(m)、 $\gamma$ は壁面開口率、 $z_2$ は津波受圧面上端高さ(m)、 $z_1$ は津波受圧面下端高さ(m)、 $a$ は水深係数、 $\eta$ は設計用浸水深(m)、 $C_d$ は抗力係数、 $M_d$ は運動量流束(m<sup>3</sup>/s<sup>2</sup>)である。本検討では、遮蔽物が有るものとし、浸水深7m以下を対象として、運動量流束 $M_d$ は式(3)より算定する。

$$M_d = 2g\eta^2 \quad (3)$$

また、設計用地震荷重は $A_i$ 分布とし、免震層のせん断力係数 $C_B$ を0.13とした。

各荷重は、短辺方向(Y方向)に作用させる。作用させる津波荷重は、解析モデルの免震層の復元力特性より、図3の評価基準の各判定となる浸水深を選定した。図7に免震層の復元力特性と各荷重の対応関係を、表2に選定した津波荷重のケースおよび津波荷重の算定に用いる諸数値を示す。また、津波荷重を作用させる際には、図8に示すように、高さ方向と受圧幅方向に等間隔となるように負担受圧面積で津波荷重を分担し、柱と梁の節点に集中荷重として作用させる。なお、解析では擁壁は考慮せず、クリアランス限界を超えて変形し続けるものとしている。

さらに、津波荷重を作用させる際は、浮力の有無を考慮する。浮力は、免震層が冠水し、

1階床下の空気溜りや室内への水の流入がない場合を想定し、式(4)により算定する。

$$Q_f = \rho g V \quad (4)$$

ここで、 $V$ は浸水部分の建築物の体積(m<sup>3</sup>)である。

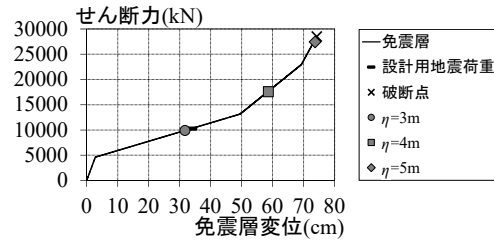


図7 免震層の復元力特性と各荷重の対応

表2 津波荷重算定に用いる諸数値

| 対象モデル   | 共同住宅モデル |       |       |
|---|---------|-------|-------|
| 設計用浸水深 $\eta$ (m)                             | 3       | 4     | 5     |
| 水深係数 $a$                                      | 2       |       |       |
| 抗力係数 $C_d$                                    | 2       |       |       |
| 建物幅 $B$ (m)                                   | 56      |       |       |
| 水の密度 $\rho$ (t/m <sup>3</sup> )               | 1       |       |       |
| 津波遡上高さ $a\eta$ (m)                            | 6       | 8     | 10    |
| 運動量流束 $M_d$ (m <sup>3</sup> /s <sup>2</sup> ) | 176.4   | 313.6 | 490.0 |
| 浮力(kN)  | 16464   | 21952 | 27440 |

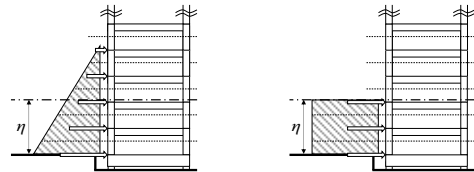


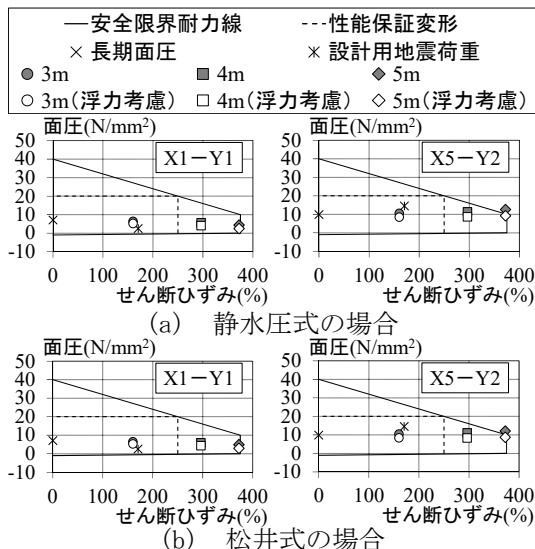
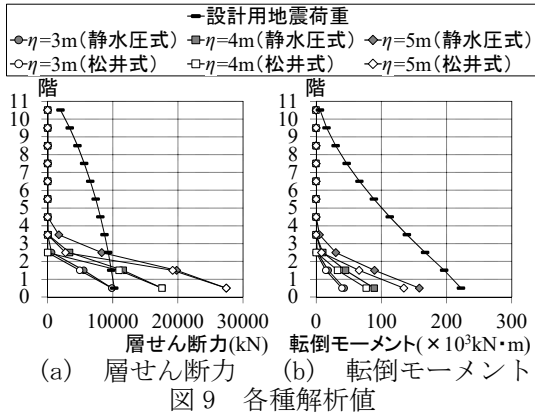
図8 津波荷重作用概念図

図9に各荷重作用時の各種解析値を示す。図9(a)より、各荷重作用時の免震層の層せん断力は図7に示す対応関係となるが、1層の層せん断力においては、 $\eta=4$ (m)、 $5$ (m)のケースで、津波荷重作用時の値が設計用地震荷重作用時の値に比べ大きな値を示している。また、荷重分布の違いから、式(1)は式(2)に比べ、大きな層せん断力を示す層が確認できる。一方で、図9(b)より、転倒モーメントは判定③となる $\eta=5$ (m)のケースにおいても津波荷重作用時の値が設計用地震荷作用時の値を大きく下回っている。また、式(2)に比べ、式(1)の荷重の重心位置が高くなるため、式(1)の場合の方が大きな値を示している。

さらに、水平限界耐力線を用いて、各荷重作用時における積層ゴムの構造挙動を確認した。図10に各荷重作用時の面圧-せん断ひずみの関係を示す。ここでは、特に変動面圧が大きな値となった積層ゴム(X1-Y1 および X5-Y2のNRB800)の結果を示す。 $\eta=5$ (m)のケースで積層ゴムは座屈するが、その他のケースでは、座屈や引抜きは確認されなかった。このことから積層ゴムのせん断ひずみの増加が、転倒モーメントや浮力による面圧の変化の比率を大きく上回ることが確認された。

以上より、津波荷重に対する免震建物の構造挙動は、せん断力による免震層の過大変形

が支配的となる。したがって、免震層の水平挙動に着目し、免震建物の構造安全性を評価する図3の評価基準の適用性が確認された。一方で、津波荷重が作用する層には、地震時を上回るせん断力が作用する場合があるため、免震層だけでなく上部構造についても、詳細な検討が必要となることが確認された。



(3) 津波荷重の動的な作用と免震建物の応答の関係の分析

津波荷重の時間変化を考慮した津波荷重の時刻歴モデルを作成し、その荷重に対する1質点系モデルの変位応答を解析した。

図11に津波荷重の時刻歴モデルを示す。津波は一般に津波先端部衝突時の衝撃力と非先端部の定常的な流れによる抗力に分けられる。また、アメリカ合衆国連邦緊急事態管理庁では、先端部の荷重を非先端部の荷重の1.5倍としている。そこで、本検討では式(5)~式(7)を満たすように作成した。

$$F_2 = 1.5F_1 \quad (5)$$

$$T_1 = 3/4td \quad (6)$$

$$T_2 = 2T_1 \quad (7)$$

応答解析は、弾性理論解による方法と免震層の非線形特性を考慮した時刻歴応答解析による方法とを比較した。弾性理論解による方法では、図11のように時刻歴モデルを3種類の外力の組み合わせであるとし、1質点系の各外力に対す

る変位応答の弾性理論解から津波荷重の動的な作用と免震建物の応答の関係を分析した。

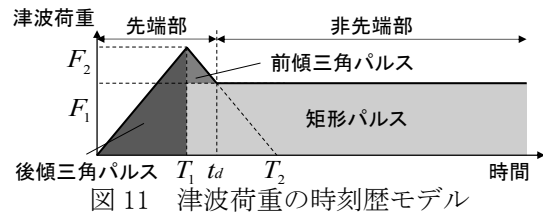
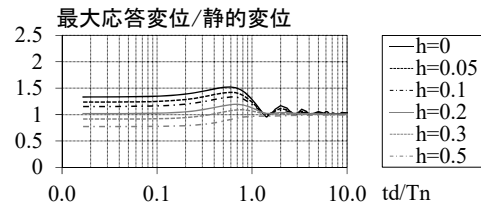


図12に動的応答倍率と先端部の荷重作用時間の関係を示す。なお、動的応答倍率とは、最大応答変位を津波荷重の最大値による静的変位で除した値とする。図12より、動的応答倍率は、建物の固有周期  $T_n$  および先端部の荷重作用時間  $td$  によって変化することが把握された。また、動的応答倍率の最大値は、減衰定数  $h=0\%$  の場合が最も大きく、1.5倍程度となることも把握された。



時刻歴応答解析では、免震建物を想定した積層ゴムと鋼材ダンパーの非線形特性を考慮した1質点系モデルを用いる。表3に解析モデルの諸元を示す。また、津波先端部の最大荷重  $F_2$  は、図3の評価基準の各判定となるように設定した。さらに、津波先端部の荷重作用時間は、不明な点が多いことから、解析パラメータとして変化させた。表4に津波荷重の時刻歴モデルの荷重ケースを示す。

表3 解析モデル諸元

|                  |                |             |     |
|------------------|----------------|-------------|-----|
| 質量 $m$ [ton]     | 10000          |             |     |
| 一次固有周期 $T_n$ [s] | 2.5            | 4.0         | 6.0 |
| 積層ゴム             | ゴム総厚 [mm]      |             |     |
|                  | 200            |             |     |
| 鋼材ダンパー           | 剛性             | せん断ひずみ250%~ |     |
|                  | 降伏せん断力係数 $a_s$ | 一次剛性の3倍     |     |
| 鋼材ダンパー           | 降伏変位 [mm]      | 一次剛性の7倍     |     |
|                  | 降伏せん断力係数 $a_s$ | 0.04        |     |
| 降伏変位 [mm]        | 30             |             |     |

表4 津波荷重の時刻歴モデルの荷重ケース

|                     |                               |       |       |       |
|---------------------|-------------------------------|-------|-------|-------|
| 荷重ケース               | Case1                         | Case2 | Case3 |       |
| 判定                  | 判定①                           | 判定②   | 判定③   |       |
| 免震層変位 [mm]          | 30                            | 500   | 700   |       |
| 先端部の最大荷重 $F_2$ [kN] | $T_n=2.5$                     | 5818  | 35505 | 73405 |
|                     | $T_n=4.0$                     | 4663  | 16260 | 31064 |
|                     | $T_n=6.0$                     | 4252  | 9406  | 15986 |
| 荷重比                 | 1.5:1                         |       |       |       |
| 先端部の荷重作用時間 [s]      | 0.1, 0.3, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, |       |       |       |
|                     | 4.0, 5.0, 7.0, 10.0, 20.0     |       |       |       |

図13に、弾性理論解と時刻歴応答解析の対応を示す。なお、図中のプロットのない実線が図12の減衰定数0%の値となっている。また、図中の横軸は、津波先端部の荷重作用時間  $td$  を最大の動的応答倍率となった  $td$  (以

下,  $t_{dp}$ ) で除した値としている。図 15 より、動的応答倍率の最大値は、応答変位においては、Case1 を除き、弾性理論解による値が時刻歴応答解析の値を上回っている。一方で、せん断力においては、Case2 および Case3 の時刻歴応答解析の値が弾性理論解の値を大きく上回った。これは、免震層の復元力特性の変化による影響であると考えられる。また、免震層の過大変形が生じるレベルの津波荷重においては、応答変位の動的応答倍率は弾性理論解による値とよい対応を示している。

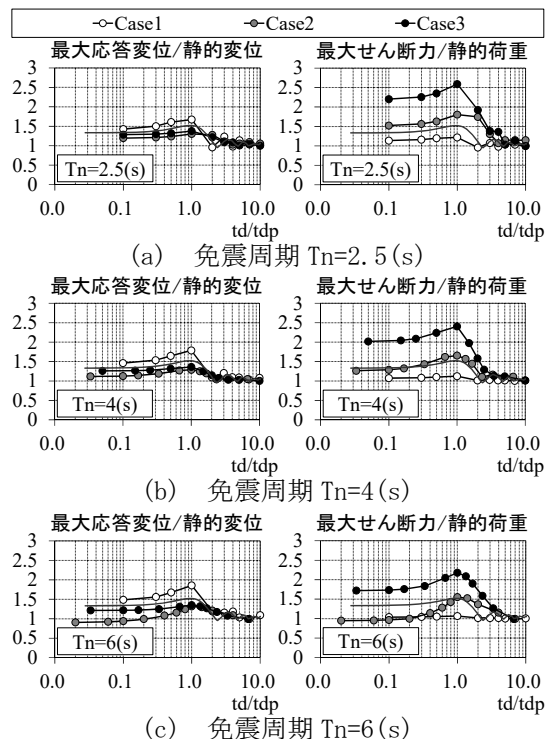


図 13 弾性理論解と時刻歴応答解析の対応

以上より、津波荷重の動的な作用によって、免震層の応答変位は、静的荷重時に対して増幅する可能性があることが示唆された。

#### (4) まとめ

本研究では、全国の免震建物の分布および南海トラフ地震を想定した際の津波浸水予想を調査した。海岸付近にも相当数の免震建物が建設されていることから、津波に対する免震建物の構造安全性を確認する必要性が認められた。また、津波荷重に対する免震建物の構造安全性の判定手法を提案し、ケーススタディによってその適用性が確認された。さらに、津波荷重の動的な作用と免震建物の応答について分析した。動的な作用によって免震層の応答変位は、静的荷重時に対して増幅する可能性があることが示唆された。

#### 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 2 件)

- ① 小林正人, 服部龍太郎, 藤森智, 津波荷

重に対する免震建物の構造安全性評価基準の提案, 日本建築学会技術報告集, 査読有, 第 23 巻, 第 53 号, pp. 71-76, 2017. 2

- ② 小林正人, 守屋有菜, 藤森智, 南海トラフ地震を想定した津波浸水予想地域内の免震建物調査, 日本建築学会技術報告集, 査読有, 第 22 巻, 第 50 号, pp. 133-136, 2016. 2

〔学会発表〕(計 10 件)

- ① 服部龍太郎, 小林正人, 藤森智, 津波荷重に対する免震建物の構造挙動に関する研究(その 1) 津波荷重および地震荷重用時の構造挙動の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 529-530, 2016. 8, 福岡大学
- ② 黒嶋洋平, 服部龍太郎, 小林正人, 藤森智, 津波荷重に対する免震建物の構造挙動に関する研究(その 2) 時間変動を伴う津波荷重に対する免震建物の応答性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 531-532, 2016. 8, 福岡大学
- ③ 守屋有菜, 小林正人, 藤森智, 南海トラフ地震を想定した津波浸水予想地域内の免震建物調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 657-658, 2015. 9, 東海大学
- ④ 長友佳奈, 川澄一史, 守屋有菜, 小林正人, 藤森智, 津波に対する免震建物の構造安全性評価ガイドライン(その 1) 南海トラフ地震における既存免震建物の津波浸水予想, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 559-560, 2014. 9, 神戸大学
- ⑤ 浅野宏一, 川澄一史, 小林正人, 藤森智, 津波荷重に対する免震建物の構造安全性評価に関する研究(その 1) 簡易建物モデルによる構造安全性評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 489-490, 2013. 8, 北海道大学

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

小林 正人 (KOBAYASHI MASAHIITO)  
 明治大学・理工学部・教授  
 研究者番号: 50373022

##### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

##### (3) 連携研究者

( )

研究者番号:

##### (4) 研究協力者

藤森 智 (SATORU FUJIMORI)  
 株式会社 松田平田設計