

洪水時における免震建物の浸水対策に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON FLOOD PROTECTION MEASURES
FOR BASE-ISOLATED BUILDINGS DURING FLOODS

丸尾 純也^{*1}, 鈴木 健司^{*1}, 稲井 慎介^{*1}, 加藤 敦史^{*2}, 中村 匠^{*3}, 得能 将紀^{*3}
*MARUO Junya, SUZUKI Kenji, INAI Shinsuke, KATOU Atsushi, NAKAMURA Takumi
 and TOKUNOU Masaki*

To control inundation of the base-isolation layer through the slit during flooding, we developed a flood protection measure using waterproof rubber, and conducted experiments to verify its waterproofing performance. In this method, the lower part of the rubber is fixed to the side of the rising wall, whereas the upper part is kept in contact with the lower section of the seismic isolation apron, thereby suppressing external water intrusion. To verify the waterproofing performance of the rubber, we conducted experiments using specimens simulating both straight and corner sections of the base-isolation layer.

The experiments yielded the following results:

1. Compared to the estimated leakage in the absence of waterproof rubber, applying it reduced water leakage into the base-isolation layer by more than 99.5%. This demonstrates that the waterproofing performance of the rubber is extremely high.
2. With this method, the total water leakage for the entire building could be handled by a single 100 L/min drainage pump. This suggests that the waterproof rubber, when used with drainage pumps, effectively prevents inundation of the base-isolation layer through the second-stage ditch.

Keywords: Base-Isolated Building, Flood, Flood Protection Measure, Waterproof Rubber, Waterproof Performance

免震建物, 洪水, 浸水対策, 止水ゴム, 止水性能

1. はじめに

近年、豪雨や大型台風等による水害が激甚化しており、都市活動や生活の脅威となっている。水害に対しては土木分野の治水インフラが対応してきたが、水害の激甚化によってその対応力だけでは限界を迎えている状況であり、建築分野においても水害対策の必要性が提言されている¹⁾。東北地方太平洋沖地震では免震層内への浸水が生じ、免震部材に錆が生じる被害が発生した²⁾。この事例では水没による免震部材の性能劣化は報告されなかったものの、事例は限られており、免震層内への浸水が生じた場合には免震部材の交換等が必要になる場合も考えられ、水害発生後の速やかな免震性能の復旧が困難になる可能性がある。そのため、基礎免震構造を提案する際には免震層内への浸水を弱点と捉えられる場合がある。

そこで本報では、洪水時における免震スリット部から免震層内への浸水対策として、止水ゴムにより浸水を抑制する手法を開発し、その止水性能を実験的に検証した結果を報告する。なお、本手法は完全止水を目的としたものではなく、その性能に応じた排水ポンプの併用を検討・提案することを想定している。

2. 浸水対策の概要

2.1 対策箇所

浸水対策を行う免震スリット部の概要を図1に示す。建物外部と免震層の間に2つの側溝を設けることを想定しており、それらの側溝間の立ち上がり壁上面と免震エプロン下面の間が免震スリットとなる。洪水時はまず1段目の側溝に水が溜まり、満水になると水が免震スリットを通過して2段目側溝に流れ、その後、2段目側溝も満水になると免震層内へ浸水する。本報では、免震スリット部に水門で採用されている止水ゴムを設置し、なおかつ、2段目側溝に排水ポンプを設けることで免震層内への浸水を抑制する計画とする。

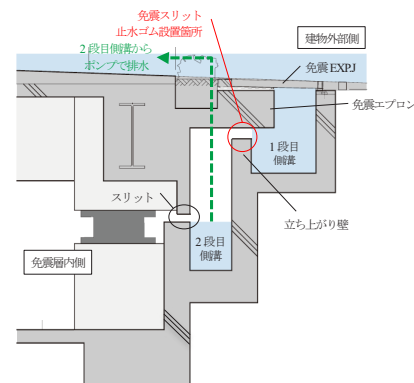


図1 免震スリット部の概要

* 1 戸田建設(株)技術研究所 修士(工学)

* 2 戸田建設(株)本社建築設計第1部 修士(工学)

* 3 戸田建設(株)本社構造設計部 修士(工学)

Technology Research Institute, TODA CORPORATION, M.Eng.
 1st Design Division (Building Construction), TODA CORPORATION, M.Eng.
 Structural Design Division, TODA CORPORATION, M.Eng.

2.2 止水ゴム

止水ゴムの形状および実験ケースを図2に、止水ゴム取付部の詳細を図3、写真1にそれぞれ示す。止水ゴムにはLゴムあるいはPゴムを用いた。免震スリット高さは50mmとした。止水ゴムの下部を立ち上がり壁側面に固定し、上部は免震エプロン下部に密着させることで、外部からの浸水を抑制する仕組みとなっている。ゴム密着部のコンクリートの不陸による漏水が懸念されたため、ステンレスプレート（以降、SUSPLと表記）を設置した漏水対策仕様（図2（b）、（c）、（d））を含む4ケースについて実験を実施した。

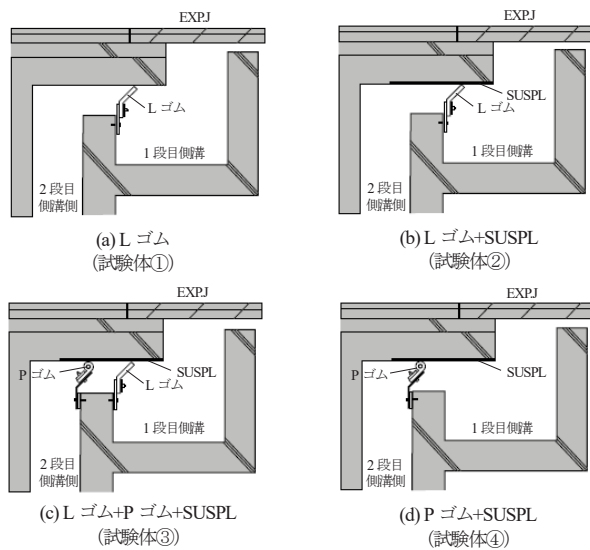


図2 止水ゴムの形状および実験ケース

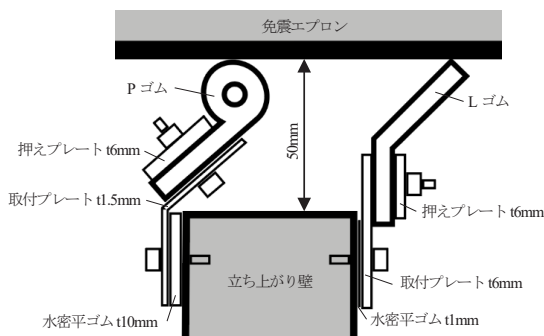


図3 止水ゴム取付部の詳細図

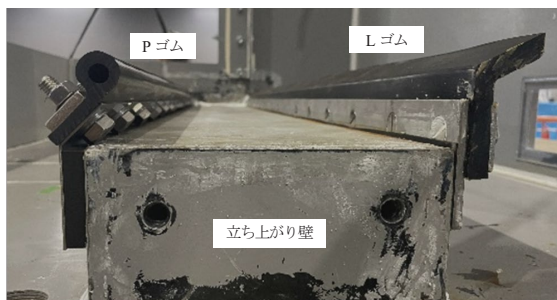


写真1 止水ゴム

3. 実験の概要

3.1 試験体概要

試験体の概要を図4、図5に示す。試験体は上述した浸水対策の一部箇所を模擬した免震スリット部と止水ゴム（Lゴム、Pゴム）、および建物外部の浸水状況を模擬して水を貯めるための貯水槽で構成されている。建物全周に浸水対策を行うことを想定し、試験体は直線部とコーナー部の2種類とした。また、建物全周にゴムを設置するには一定の長さ毎にゴムを接合する必要があるため、試験体にもジョイント部を設けた（図中の▼Joint表示の箇所、止水ゴム同士を接着剤により接合）。実験ケースをまとめて表1に示す。また、試験体全景を写真2、写真3に示す。

なお、Lゴム・Pゴムは鉛直方向の自由長に対して免震エプロン下面に約4mm押え付けるように部材高さを設計した。また、実施工では止水ゴムは連続して設置するために途切れることはないが、本実験では試験体の都

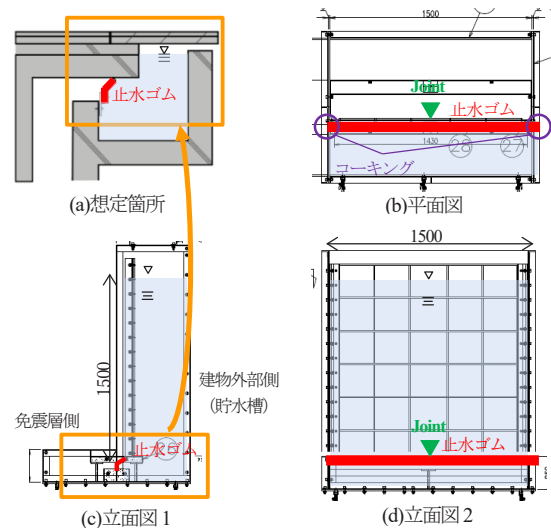


図4 直線部試験体

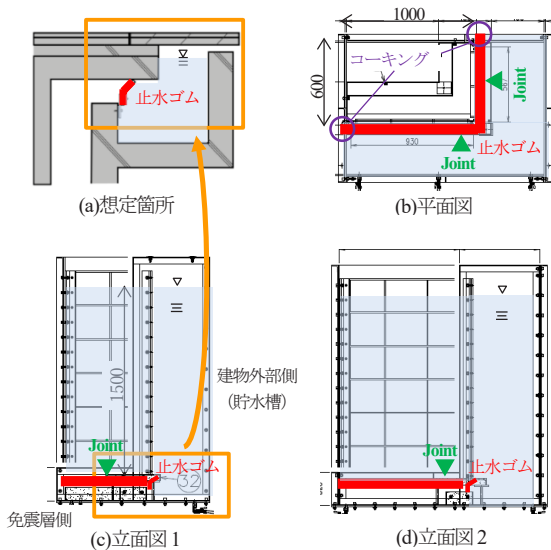


図5 コーナー部試験体

表1 実験ケース一覧

| 実験ケース名 | 止水ゴム | SUSPL | 対象部 |
|--------|---------|-------|-------|
| ①S | Lゴム | 無 | 直線部 |
| ②S | Lゴム | 有 | 直線部 |
| ③S | Lゴム+Pゴム | 有 | 直線部 |
| ④S | Pゴム | 有 | 直線部 |
| ①C | Lゴム | 無 | コーナー部 |
| ②C | Lゴム | 有 | コーナー部 |
| ③C | Lゴム+Pゴム | 有 | コーナー部 |
| ④C | Pゴム | 有 | コーナー部 |



写真2 直線部試験体



写真3 コーナー部試験体



写真4 Lゴム端部



写真5 Pゴム端部

合上、止水ゴムには端部ができ、端部と試験体壁の間にコーキングを施して止水ゴム端部-試験体壁間からの漏水が生じないように施工した(写真4, 写真5)。

3.2 実験方法

実験方法を図6に示す。貯水槽上部に注水用ホースを設置し、貯水槽に設定した浸水高さまで水を貯め、止水ゴムから漏出した水は免震層側の下部に設けた排水口からホースをつないでタンクに貯めるようにした。

止水性能の確認は単位時間当たりの漏水量を測定することにより行った。浸水高さは、各実験ケースとも止水ゴムの上端から1.5m, 1.0m, 0.5mの3種類とした(写真6~写真8)。なお、写真のリボンテープは貯水槽底からの高さを示しているが、浸水高さは止水ゴム上端からの高さを示すため、写真ではリボンテープの1.65m, 1.15m, 0.65mの高さが設定浸水高さとなる。また、注水量を確認するため、貯水槽への注水用ホースには流量計を設置した。免震層側で漏水した水の重量を測定するため、免震層側のタンク下部に荷重計を設置した(写真9)。

実験の具体的な手順は、注水速度3cm/min(想定水深0.5~2.0m)³⁾で1.5mの高さまで貯水槽に注水した後、1時間放置し、免震層側で漏水した水の重量を測定した。

次に、貯水槽から排水して浸水高さを1.0mに調整し、1時間の漏水量を測定した。同様に再度排水して浸水高さを0.5mに調整し、1時間の漏水重量を測定した。なお、貯水槽の水位が漏水によって設定浸水高さよりも1cm以上低下した際には、適宜注水することで水位を概ね一定に保った。

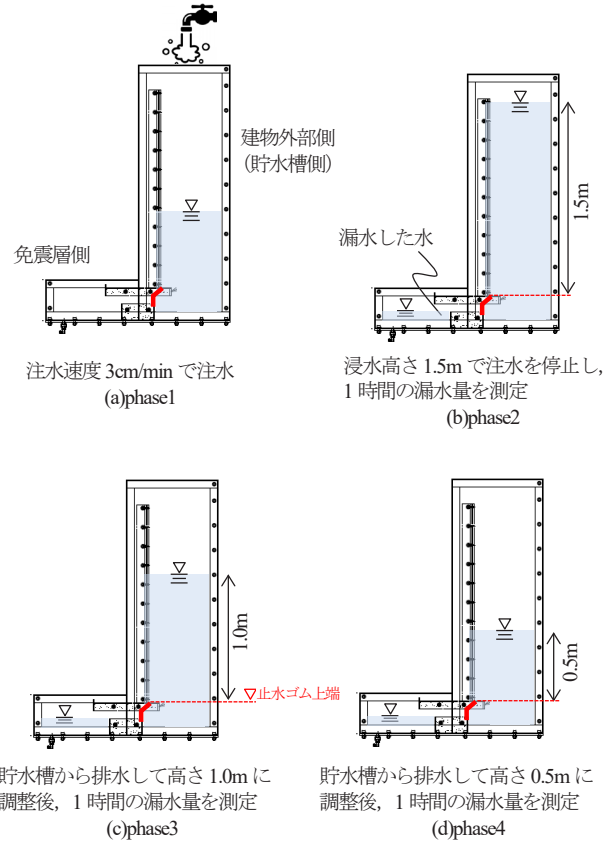


図6 実験方法

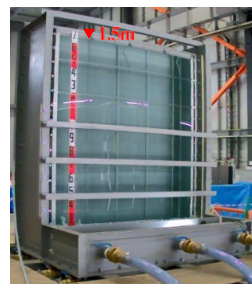


写真6 浸水高さ 1.5m

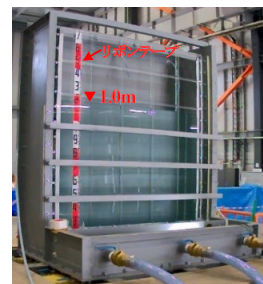


写真7 浸水高さ 1.0m

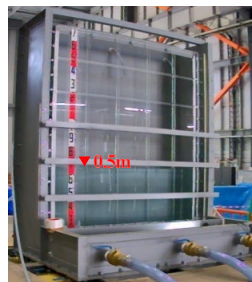
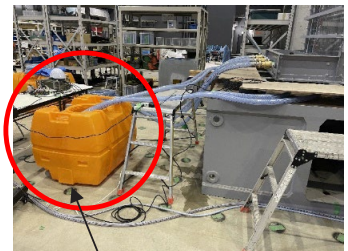


写真8 浸水高さ 0.5m



タンク下に荷重計を設置

写真9 漏水量測定用タンク

3.3 止水性能評価指標

本対策の止水性能を表2に示すJIS等級⁴⁾で評価した。JIS等級では漏水量の単位を $m^3/(hm^2)$ としており、漏水の体積を単位時間1時間と開口面積で除している。本実験でも同様に、1時間の漏水量を免震スリットの開口面積(直線部試験体： $0.05m \times 1.5m = 0.075m^2$ ，コーナー部試験体： $0.05m \times 1.6m = 0.08m^2$)で除し、JIS等級との比較を行った。

表2 JIS等級による漏水量⁴⁾

| JIS等級 | JIS表記 | |
|-------|------------------------|--|
| | 漏水量 $W[m^3/(hm^2)]$ | 解説 |
| Ws-1 | $0.05 < W \leq 0.2$ | 比較的簡易な浸水防水用設備。一般的な土のうよりは浸水防水性能が高い。多少の浸水を許容できる場所又は排水設備が設置されている場所。(倉庫、駐車場など) |
| Ws-2 | $0.02 < W \leq 0.05$ | |
| Ws-3 | $0.01 < W \leq 0.02$ | 最も一般的に用いられる浸水防水性能。浸水に対して比較的重要な高い場所。(機器室、一般家屋など) |
| Ws-4 | $0.004 < W \leq 0.01$ | |
| Ws-5 | $0.001 < W \leq 0.004$ | |
| Ws-6 | $W \leq 0.001$ | 最も浸水防水性能が高い。重要度が高く、できる限り浸水を防止したい場所に用いる。(電気室、ポンプ室など) |

4. 実験結果

直線部試験体およびコーナー部試験体における、浸水高さに対する1時間漏水量の測定結果を図7に示す。同図には各浸水高さ3点のプロットに対して、線形の近似線とその決定係数 R^2 を併記した。なお、各実験ケースにおける具体的な漏水状況は附録Aに示す。

4.1 直線部試験体における浸水高さ1.5m時の漏水量

試験体①S(Lゴム_SUSPLなし)および試験体②S(Lゴム_SUSPLあり)の漏水量は特に少なく、JIS等級でWs-1相当の性能を有することが確認できた。また、試験体①Sの方が試験体②Sよりも漏水量は小さくなり、SUSPLがない方が止水性能は高くなる結果となった。一方で、試験体③S(Lゴム+Pゴム_SUSPLあり)は試験体②Sの約2.0倍、試験体④S(Pゴム_SUSPLあり)は試験体②Sの約4.6倍の漏水が生じ、Lゴムの止水性能はPゴムよりも優れていると考えられる結果であった。

なお、Lゴム+Pゴムの試験体③Sの漏水量がLゴム単体の試験体②Sよりも大きくなっているのは止水ゴム端部のコーキングの不備が原因である。本実験における止水性能は、止水ゴム-免震エプロン下部間の漏水量を評価の対象としているものの、止水ゴム端部と試験体壁の間のコーキングから漏水が生じる実験ケースも見られ(写真10、写真11)、実験ケースごとにおいて止水ゴム端部-試験体壁間の漏水量にばらつきが生じたと推測される。

4.2 コーナー部試験体における浸水高さ1.5m時の漏水量

試験体①C~④Cのいずれも止水性能はWs-1以下となり、コーナー部は直線部よりも漏水量が増加する結

果となった。わずかな差ではあるが、直線部と同様にSUSPLなしの試験体①CがSUSPLありの試験体②Cよりも止水性能は高くなった。また、Lゴム+Pゴムの試験体③Cは最も止水性能が高くなった。一方で、Pゴム単体の試験体④Cの漏水量は他のケースに比べて極めて多く、Pゴムのコーナー部の止水性能はLゴムと比べて大きく劣る結果となった。

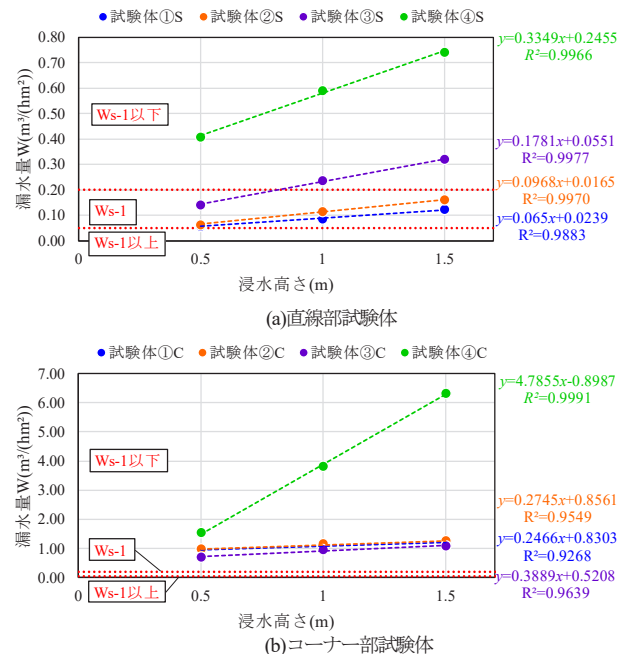


図7 浸水高さに対する1時間漏水量



写真10 Lゴム端部の漏水



写真11 Pゴム端部の漏水

4.3 浸水高さによる漏水量

図7のいずれの実験ケースにおいても、浸水高さが高いほど漏水量が多くなっており、決定係数 R^2 が0.92以上と非常に高いことから浸水高さと漏水量には概ね線形の関係があることが確認された。この結果を用いて、漏水量を浸水高さから近似線による外挿によって予測が可能であることが確認された。

5. 漏水量の試算

5.1 止水ゴムがない状態における漏水量の試算

止水ゴムによる止水性能を検証するため、止水ゴムがない状態における漏水量を、長方形堰の越流量(Govinda Rao and Muranlidharの式)⁵⁾を用いて算出した。Govinda Rao and Muranlidharの式による免震層側に流入する越流

量 Q (m^3/s) を式 (1) に、諸元を図 8 に示す。なお、免震スリットの形状を考慮すると、この式を適用できる範囲は立ち上がり壁先端から $0m \sim 0.05m$ の浸水高さのみである。

$$Q = CBh^{3/2} \quad (1)$$

$$C = 1.642(h/L)^{0.022}; 0 < h/L \leq 0.1 \quad (1a)$$

$$C = 1.552 + 0.083(h/L); 0.1 < h/L \leq 0.4 \quad (1b)$$

$$C = 1.444 + 0.352(h/L); 0.4 < h/L \leq (1.5 \sim 1.9) \quad (1c)$$

$$C = 1.785 + 0.237(h/W); (1.5 \sim 1.9) \leq h/L \quad (1d)$$

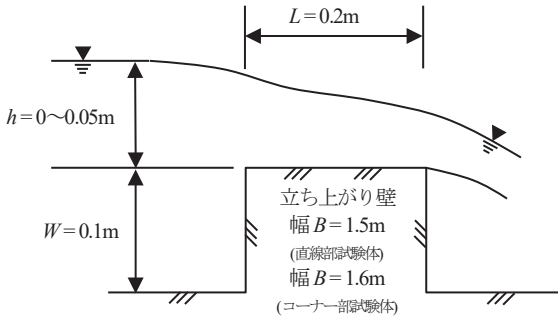


図 8 長方形堰の越流量の諸元

立ち上がり壁先端から $0m \sim 0.05m$ の浸水高さ時の越流量 (単位を $m^3/(hm^2)$ に変換) を図 9 に示す。浸水高さが $0.05m$ のとき越流量は $1266m^3/(hm^2)$ となる。止水ゴムがある漏水量は、図 7 において最も漏水量が多い試験体④ C の浸水高さ $1.5m$ で $6.3m^3/(hm^2)$ であり、止水ゴムによって 2 段目側溝への漏水が 99.5% 以上低減されており、止水ゴムの止水性能が非常に高いことが示された。

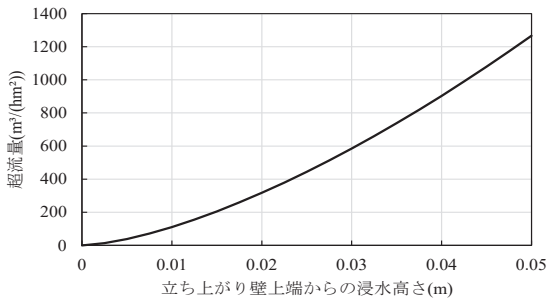


図 9 止水ゴムがない状態における漏水量の試算

5.2 実建物を想定した漏水量の試算

実建物を想定した漏水量の試算結果を図 10 に示す。想定する建物の免震層は 1 辺 $50m$ の正方形平面とし、止水ゴムの長さは全周で $200m$ とする。免震スリット高さは $0.05m$ 、浸水高さは $1.5m$ とし、止水ゴムには L ゴムを用いる想定とした。ただし、上述した止水ゴム端部一試験体壁間のコーキングによる漏水量にばらつきがあるため、安全側の評価として図 7 の L ゴムを用いた試験体①～③の中で最大の漏水量を用いることとし、直線部は試験体③ S の $0.32m^3/(hm^2)$ 、コーナー部は試験体② C の $1.25m^3/(hm^2)$ の漏水量を用いた。漏水量の計算は安全側

の評価として、まず全周長さを直線部として評価し、そのうえでコーナー部の漏水量を加算した。

このとき、建物全周における漏水量は $3600L/h$ となり、全周の開口面積で除すと $0.36m^3/(hm^2)$ になる。これは JIS 等級では $Ws-1$ 以下になるが、2 段目側溝に設ける排水ポンプとして $100L/min$ ($6000L/h$) 仕様 1 台で十分に排出可能なレベルであり、止水ゴムと排水ポンプの組み合わせにより 2 段目側溝から免震層内への浸水を防止できると考えられる試算結果となった。

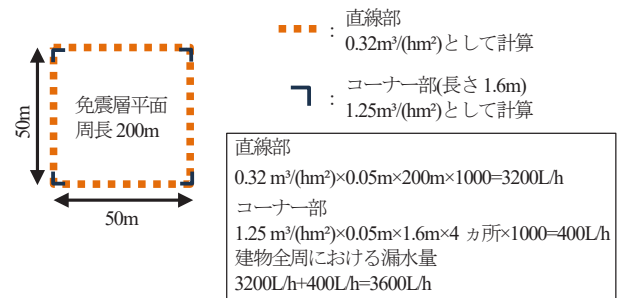


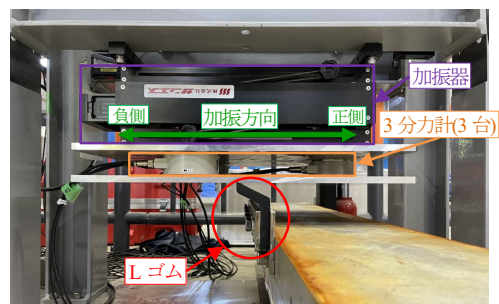
図 10 想定建物全周における漏水量の試算

6. 止水ゴムの摩擦および変形

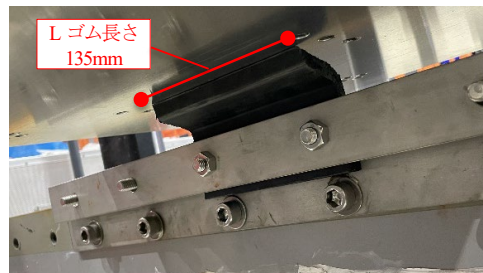
本手法の仕様は止水ゴムを免震エプロン下部に密着させることで外部からの浸水を抑制することが可能な仕組みであるが、地震時には止水ゴムと免震エプロン下部に摩擦が生じ、止水ゴムにも変形が生じると考えられた。免震層の動きを阻害せずに止水性能を確保する必要があるため、止水ゴムによる摩擦や変形を確認する加振実験を行った。なお、上述の通り、L ゴムの止水性能が P ゴムよりも優れていることから、L ゴムのみを対象とした。

6.1 実験方法

加振実験のセットアップを写真 12 に示す。外周フレー



(a) セットアップ全体



(b) L ゴム部分

写真 12 L ゴム加振実験セットアップ

ムに加振器を取り付け、さらに加振器に3分力計を介してSUSPLを取り付けた。Lゴムは下部を固定し、上部をSUSPLに密着させた。加振器によってSUSPLを加振し、3分力計によってLゴムによる摩擦力を測定した。また、SUSPLの変位をレーザー変位計により測定した。なお、加振器の能力の都合上、Lゴムの長さは135mmとした。

加振は免震層周期を想定し、周期4秒の正弦波加振とした。振幅は加振器の可動範囲により±約50mmとした。また、LゴムのSUSPLへの押え付け量は実際と同じ4mmの他、2mmと6mmの計3ケースとした。

6.2 実験結果

加振試験によるLゴムの荷重変位関係を図11に示す。SUSPLが負側から正側に移動する場合はSUSPLに密着したLゴムの先端が引っ掛かる向きであり、摩擦力が若干の乱れが生じたものの最大摩擦力は押え付け量により56N～62N程度であった。SUSPLが正側から負側に移動する場合はLゴムの抵抗は小さく、最大摩擦力は10N～17N程度であった。

実験で用いたLゴムは長さ135mmであるため、5.2節と同様の1辺50mの免震層として最大摩擦力を換算すると表3となる。なお、1辺50mの正方形平面の建物を想定すると、建物の対辺に向きが反対のLゴムが取り付くことになるため、正負の最大摩擦力の絶対値和が建物2辺に作用する最大摩擦力となる。また、Lゴムに沿う方向(写真12の直交方向)の摩擦力について、加振試験は行っていないがLゴムの先端が引っ掛かる向きの加振時に比べると摩擦力は小さいと想定されるが、ここでは安全側の評価として上記の加力方向に正対する建物2辺の最大摩擦力(正負の最大摩擦力の絶対値和)を2倍した値を建物全周におけるLゴムの摩擦力として試算した。施工誤差を考慮して押え付け量が6mmであったとしてもLゴムから建物へ作用する最大摩擦力は59.0kNとなる。

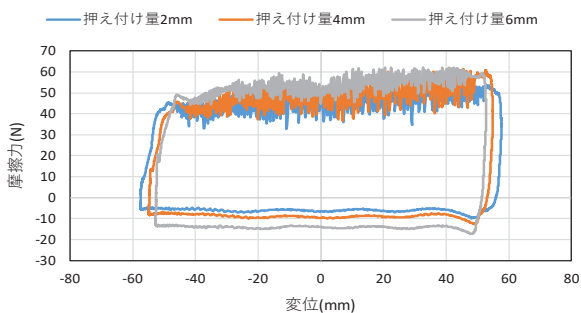


図11 加振実験によるLゴムの荷重変位関係

表3 Lゴムによる最大摩擦力

| 押付量 | 最大摩擦力 | |
|-----|--------------------|-------------------------------|
| | 実験 Lゴム長さ: 135mm | Lゴム長さ: 建物全周換算 (正負の絶対値和の2倍) |
| 2mm | +55.7 N, -10.0 N | 48.6 kN |
| 4mm | +61.3 N, -12.7 N | 54.8 kN |
| 6mm | +62.2 N, -17.4 N | 59.0 kN |

この規模の免震層のせん断力を10000kN程度と仮定するとLゴムによる摩擦力は極めて小さく、免震層の動きを阻害するような摩擦力は生じないことが確認された。

また、加振実験においてLゴムに止水性能を低下させるような変形(Lゴムが逆向きに折れ曲がるような変形)が生じないことも確認された。

7. おわりに

洪水時における免震スリット部から免震層内への浸水対策として、止水ゴムにより浸水を抑制する手法を開発し、その止水性能を実験的に検証した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 止水ゴムの下部を立ち上がり壁側面に固定、上部は免震エプロン下部に密着させる仕組みとして、直線部およびコーナー部を模擬した試験体により、止水ゴムの止水性能を検証する実験を行った。止水ゴムとしてLゴムあるいはPゴムを用いた。また、ゴム密着部のコンクリートの不陸による漏水が懸念されたため、ステンレスプレートを設置した漏水対策仕様についても実験を実施した。
- 2) 直線部試験体ではステンレスプレートの有無によらず、LゴムはJIS等級でWs-1相当の性能を有し、Pゴムよりも高い止水性能であることが確認された。コーナー部試験体ではいずれも止水性能はWs-1以下となり、直線部と比較して漏水量が増加する結果となった。
- 3) 浸水高さが高いほど漏水量が多くなっており、浸水高さとも漏水量には概ね線形の関係があることが確認された。この関係から、漏水量を浸水高さから近似線による外挿によって予測が可能であることを確認した。
- 4) 止水ゴムがない状態での漏水量と比較した結果、Lゴムを使用することで2段目側溝への漏水量を99.5%以上低減できることが確認され、その止水性能が非常に高いことが示された。
- 5) 1辺50mの建物全周における漏水量の試算では、2段目側溝への漏水は100L/min(6000L/h)仕様の排水ポンプ1台で十分に排出可能なレベルであり、止水ゴムと排水ポンプの組み合わせにより2段目側溝から免震層内への浸水を防止できることが示された。
- 6) 実建物を想定したLゴムから建物へ作用する最大摩擦力を評価した結果、その摩擦力は免震層のせん断力と比べて極めて小さく、免震層の動きを阻害するような摩擦力は生じないことが確認された。また、Lゴムには止水性能を低下させるような変形が生じないことも確認された。

謝辞

本研究は野村不動産株式会社との共同研究として実施した成果である。また、建築設計第1部の加藤亨氏、関根康季氏には実験に協力いただき、貴重なご意見を頂いた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 日本建築学会気候災害特別調査委員会「気候災害特別調査委員会報告書 激甚化する気候災害への建築分野の取組むべき課題」, 2020.3
- 2) 飯田正敏, 澤田毅, 小川晃「東北地方太平洋沖地震による津

波被害を受けた免震建物に関する調査 その1~その3」, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), pp.493-498, 2013. 8

- 3) 日本建築防災協会「地下街等浸水時避難計画策定の手引き(案)【例編】」, 2004.5
- 4) JIS A 4716 : 2019, 浸水防止用設備建具型構成部材
- 5) N. S. Govinda Rao and D. Muranlidhar 「Discharge characteristics of weirs with finite-crest width」 *La Houille Blanche*, No.5, P.537-545, Aout/Sept., 1963

附録A 実験における漏水状況

各実験ケースにおける浸水高さ1.5mでの漏水状況を写真A1~A8に示す。なお、写真はそれぞれ免震層側から撮影したものである。

A-1. 試験体①S (Lゴム_SUSPLなし)

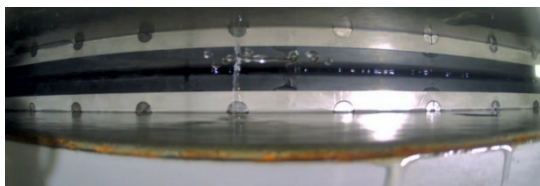
Lゴムとエプロン下部の間から漏水が見られた。また、ボルト穴からの滲み出すような漏水も見られた。



写真A1 試験体①Sの漏水状況

A-2. 試験体②S (Lゴム_SUSPLあり)

試験体①S (Lゴム_SUSPLなし)と漏水箇所は同様だが、Lゴムジョイント部とエプロン下部の間からの漏水量が試験体①Sよりも多く見られた。



写真A2 試験体②Sの漏水状況

A-3. 試験体③S (Lゴム+Pゴム_SUSPLあり)

Lゴムの漏水状況は確認できないが、Pゴム端部からの漏水が主であった。また、Pゴムの固定するボルト穴からもわずかな漏水が見られた。



写真A3 試験体③Sの漏水状況

A-4. 試験体④S (Pゴム_SUSPLあり)

主な漏水箇所は試験体③Sと同様であったが、Pゴム端部からの漏水量は試験体③Sよりも多かった。



写真A4 試験体④Sの漏水状況

A-5. 試験体①C (Lゴム_SUSPLなし)

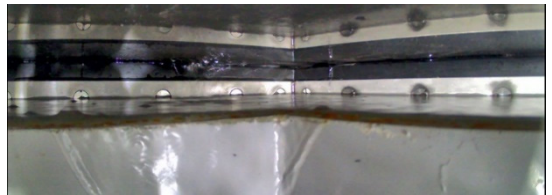
Lゴムコーナー部とエプロン下部の間からの漏水が主であった。Lゴムコーナー部から写真A5の左方向に水が噴射する様子が見られた。Lゴムの直線部はエプロン下部と密着しているがコーナー部には隙間があり、この隙間から水が噴射したと考えられる。直線部を密着させるとコーナー部のLゴム先端が下に押し下げられて隙間が生じるようになっており、これはLゴムの形状では生じてしまう特徴と考えられる。



写真A5 試験体①Cの漏水状況

A-6. 試験体②C (Lゴム_SUSPLあり)

試験体①Cと同様の漏水状況であった。



写真A6 試験体②Cの漏水状況

A-7. 試験体③C (Lゴム+Pゴム_SUSPLあり)

コーナー部においてPゴムとエプロン下部の間からの漏水も見られたが、主な漏水はPゴムと取付プレートの間から生じた。



写真A7 試験体③Cの漏水状況

A-8. 試験体④C (Pゴム_SUSPLあり)

Pゴムと取付プレートの間、および、Pゴムとエプロン下部の間から漏水が見られ、漏水の勢いは全ケースの中で最も激しかった。



写真A8 試験体④Cの漏水状況