

清水建設技術研究所新風洞棟

清水建設
土屋宏明



同
堀 富博



同
大山 巧



同
猿田正明



1. はじめに

清水建設は、2004年9月に着工した技術研究新風洞実験棟に、新しい免震システムとして開発した「パーシャルフロート」を採用した。パーシャルフロートとは建物を「掘割り」と称する地下貯水槽の水中で積層ゴム上に設置し、浮力と積層ゴムとで建物重量を支えることで、積層ゴムの支持力負担を軽減し地盤との絶縁性を高めて固有周期の長周期化を図るとともに、掘割内の水の運動エネルギーを逸散させて建物の振動に減衰を与える免震システムである^{1)~8)}。

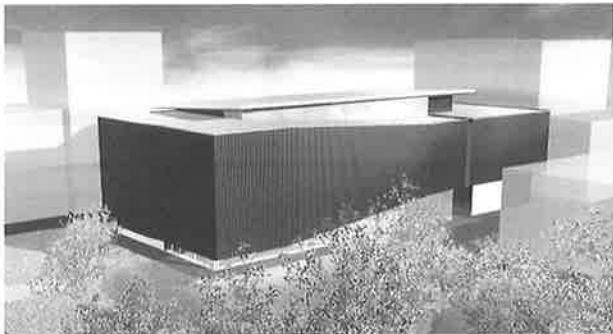


図-1 外観パース

施工者：清水建設株式会社

用途：研究施設

建築面積：951.86m²

延床面積：1253.09m²

階数：地下1階、地上2階

軒高：13.75m

最高高さ：13.90m

構造種別：鉄筋コンクリート造（一部鉄骨造）

基礎形式：杭基礎

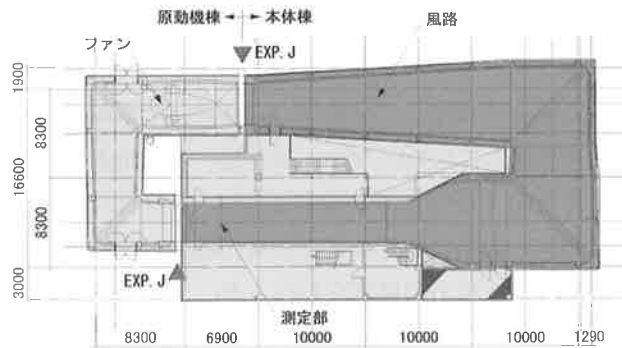


図-2 2階平面図

2. 建物概要

新風洞棟は、地下1階、地上2階建ての建物で、2階に置かれる回流式の風路を中心に、その周囲と下階に計測室、実験室、見学ホール、来客施設などを配置した研究施設である。

建設地：東京都江東区越中島3-4-17

建築主：清水建設株式会社

設計者：清水建設一級建築士事務所

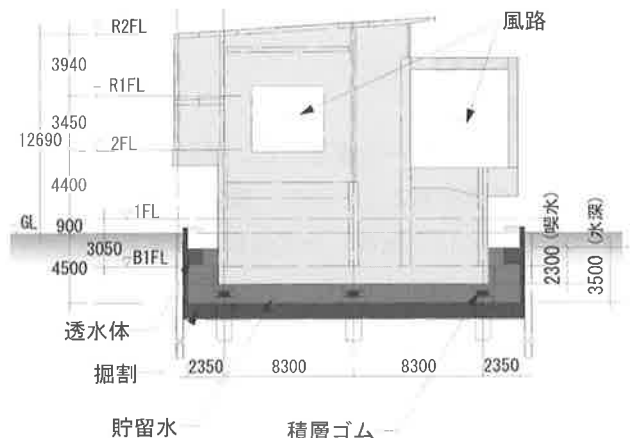


図-3 断面図

3. 構造計画概要

3-1 上部構造

主体構造はX、Y方向共耐震壁併用RCラーメン構造を採用し、2階立上がりと屋根をブレース併用鉄骨ラーメン構造とした。また、計測部に風洞ファンの振動が伝わらないように、本体と原動機棟はエキスパンションジョイントで切り離れた。地下は常時水中に置かれるため、コンクリート外壁にウレタン塗膜の外防水を施している。地下室の床下は二重スラブによるピットとし、万一漏水した場合でも、喫水部分の水量はピット内で処理できるよう配慮した。

3-2 基礎、掘割り

地下貯水槽となる掘割りは、杭支持されたマットスラブと周囲の側壁で構成されるRC造としている。掘割深さ4.5m、水深3.5mで貯水量は約1500tonである。建物の喫水高さを2.3mとして、建物重量約2900tonのうち約半分を浮力で支持させている。建物地下部の外壁と掘割側面とのクリアランスについては、数値解析^{3),5)}による検討結果に基づき、地震による動水圧の建物への影響が無視できる距離として2.0mと設定した。杭は当敷地で1971年に建設され2004年に解体された既存建物に使用されていた鋼管杭25本を再利用し、今回新たに打設した既製杭25本とで併用している。なお、既存杭、新設杭ともに支持層をGL-38m以深の砂礫層とし、既存杭については鋼材の引張試験等による材質の確認と急速載荷試験による支持力の確認を行なった。コンクリート壁は山留めSMWの芯鉄骨と300mm厚の鉄筋側壁をスタッドボルトで一体化させた合成構造とし、仮設材の本体利用を図った。

4. 免震材料

4-1 積層ゴム

パーシャルフロート構造では、積層ゴムを水中に設置する必要があることから、装置全体をライニングゴム (EPDM) で被覆した高減衰積層ゴム⁷⁾を掘割底盤上に14台 (650φ×7台、700φ×7台) 配置した。積層ゴムのゴム径は、常時建物に浮力が作用している状態に対して基準面圧以下となるように設定されており、浮力を利用しない通常の免震の場合に比べて15cm小さいサイズとなっている。その結果、

200%変形時の固有周期は4.1秒となり、通常免震の場合の3.3秒よりも長周期化されている。

一般に、ゴム材料の耐水性が高いことは知られている。しかし、今回は0.5ppmと非常に低濃度ではあるが臭素系の消毒剤を添加した水中に置かれることから、実際の10倍の濃度の薬液を用いた浸漬試験により、積層ゴムの特性値およびゴム素材の基本物性に有意な変化が見られないことを14ヶ月目まで確認しており⁷⁾、現在も試験は継続中である。

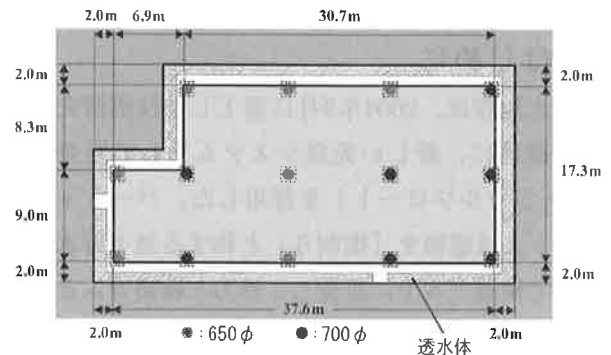


図-4 積層ゴム配置

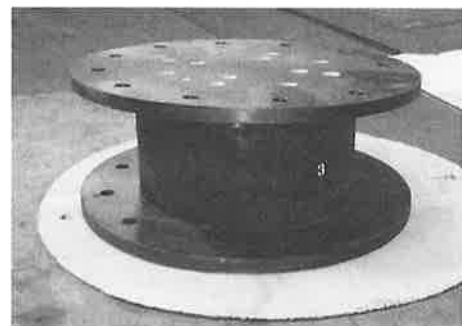


図-5 防水型積層ゴム

4-2 透水減衰材料

水の運動エネルギーを逸散させるための減衰装置として、糸状のポリプロピレン材を立体網目状に形成した透水体⁵⁾を掘割の内側側面に水面より1.0m下までの範囲に取り付けている。本透水体の空隙率は0.93であり、透水実験により平均的な流体抵抗係数 μ (1/s) は、 $\mu = 1.7 + 15.63U$ (U : 透水流速 (m/s)) であることが確認されている。地震時の貯留水の応答速度は今回0.5m/s以内であり、その範囲内では流体の等価減衰定数は4~10%となる。



図-6 透水体

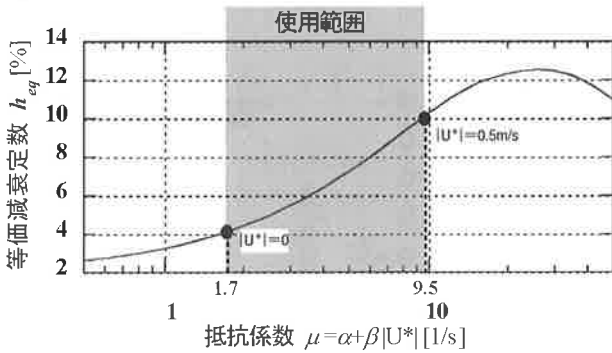


図-7 透水体の等価減衰定数

5. 時刻歴応答解析

5-1 耐震性能目標

本建物における耐震性能目標は下表のように設定した。

表-1 耐震性能目標

入力レベル	レベル1	レベル2
種類	観測波	観測波 サイト波 告示波
上部構造	短期許容応力度以内	短期許容応力度以内
下部構造	短期許容応力度以内	短期許容応力度以内
積層ゴム	安定変形以内 ($\gamma=150\%$) 積層ゴムに引張りは 生じない	性能保証変形以内 ($\gamma=225\%$) 積層ゴムの引張りは 限界引張応力度以内

5-2 設計用入力地震動

建設地における模擬地震動(サイト波)としては「関東地震」と「首都圏直下地震」を採用した。「関東地震」については建設地において想定される最大級の地震であり、耐震性能を確認するうえで最も重要な地震であるとの判断から、異なる作成法で評価

表-2 設計用入力地震動一覧

レベル	地震波	方向	最大加速度 (cm/s^2)	最大速度 (cm/s)	備考
レベル1	EL CENTRO 1940 NS	-	255	25.0	
	TAFT 1952 EW	-	248	25.0	
	HACHINOHE 1968 NS	-	165	25.0	
レベル2	EL CENTRO 1940 NS	-	511	50.0	
	TAFT 1952 EW	-	496	50.0	
	HACHINOHE 1968 NS	-	330	50.0	
	KANTO1(関東地震)	X	213	40.0	1987千葉県東方沖地震を要素地震とし、 一様断層モデルによる関東地震模擬波
		Y	229	38.2	
	KANTO2(関東地震)	NS	161	47.8	1990神奈川県西部地震を要素地震とし、 非一様断層モデルによる関東地震模擬波
		EW	170	48.2	
	TOKYO(首都圏直下地震)	X	237	46.6	1987千葉県東方沖地震を要素地震とし、 建設地直下に断層を想定した模擬波
		Y	205	45.2	
	KOKUJI1(ランダム位相)	-	264	60.4	告示スペクトル、一様乱数による位相
KOKUJI2(遠距離位相)	-	295	60.0	告示スペクトル、1923関東地震の東京気象庁での再現波の位相	

された模擬地震波を2波採用し、耐震安全性評価の信頼性を高めることとした。「首都圏直下地震」については、活断層の存在が認められていないユーラシアプレート内部で発生する地震を想定した。これらのほか表-2に示す観測地震波と告示波を採用した。

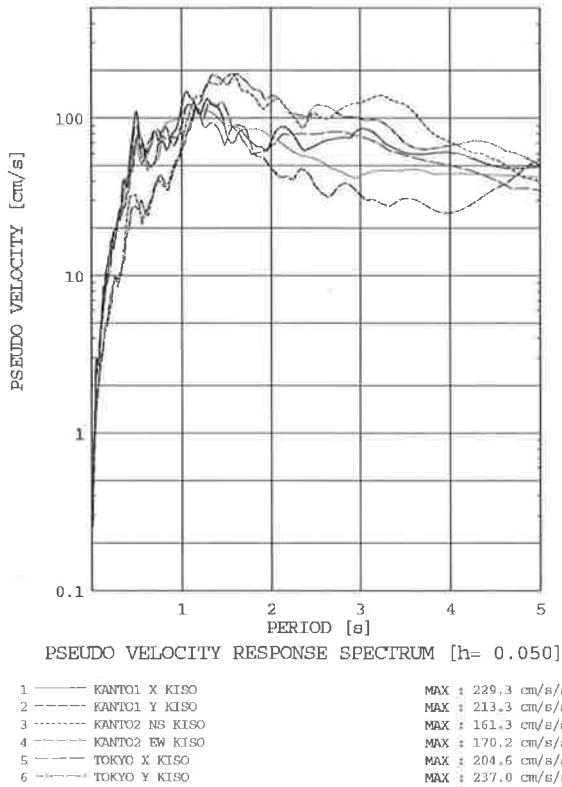


図-8 サイト波の擬似速度応答スペクトル

5-3 解析モデル

図-9には、時刻歴解析に用いた上部構造の質点系モデル(5質点)を示す。積層ゴムを介して建物に輸入される地震外力FMのほかに、没水部に相当する地下部分の質点には、周囲の水から受ける流体力FD+FRが作用するものとした。ここで、FDは掘割壁面の地震動から水を介して建物に輸入される流体外力(ディフラクション流体力)、FRは建物の振動に対して水から受ける流体反力(ラディエーション流体力)であり、後者については、付加質量 ΔM と造波減衰係数C(透水体での消波効果による減衰)を用いて、 $FR = -(\Delta Mx + Cx)$ と表すことができる³⁾。本解析モデルについては、模型実験結果との比較から妥当性が検証されている³⁾。

また、図-10に示す地盤性状を考慮した地盤-杭-建物連成応答解析も行い、建物と地盤の動的相互作用の影響を確認した。

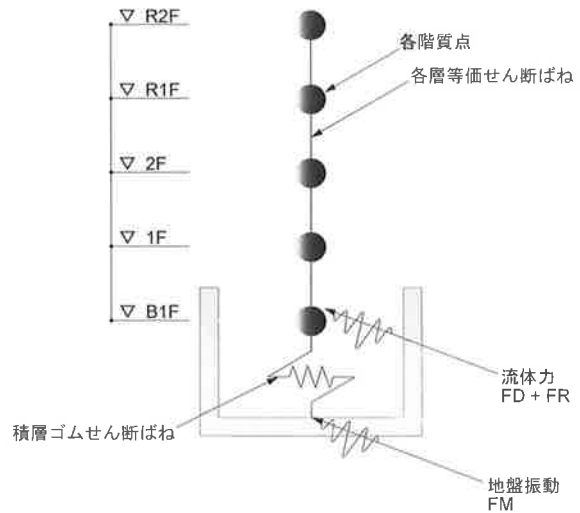


図-9 水平動解析モデル図

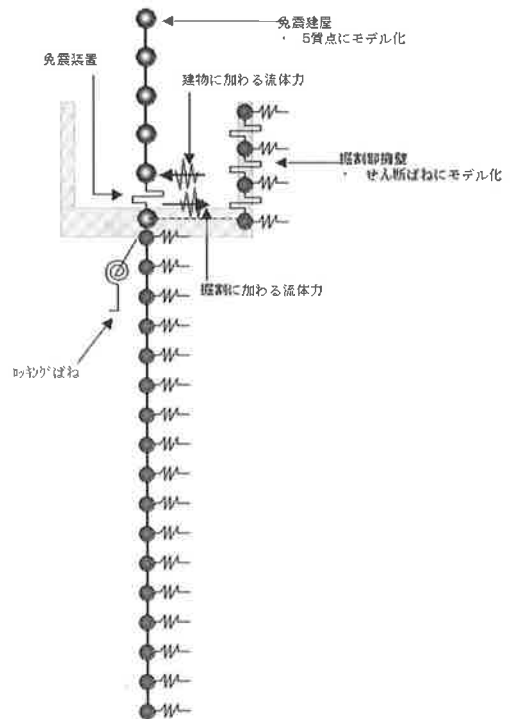
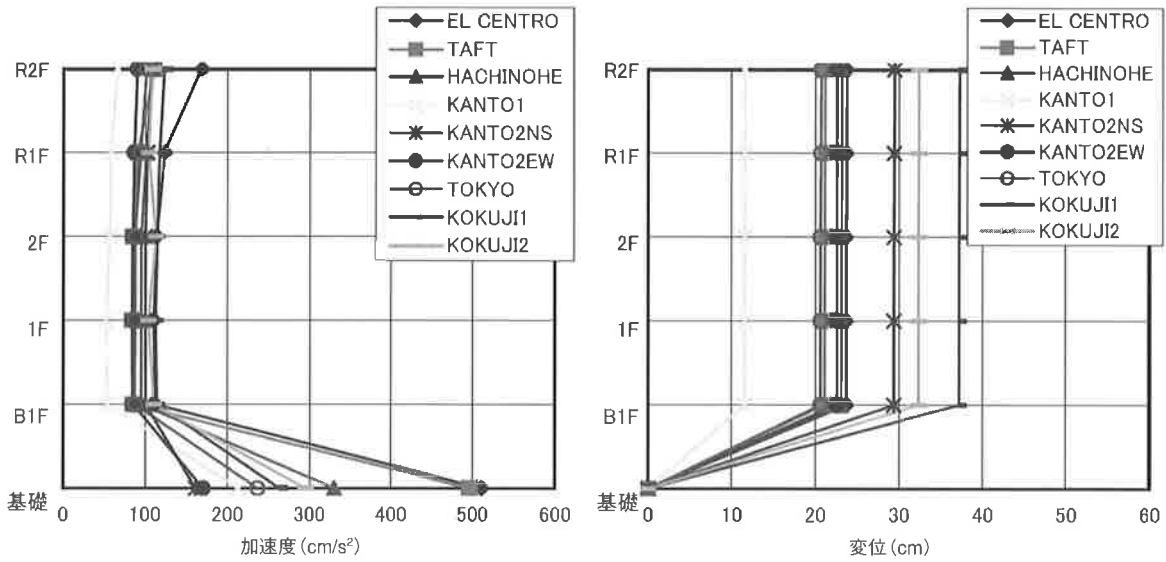


図-10 地盤-杭-建物連成解析モデル図

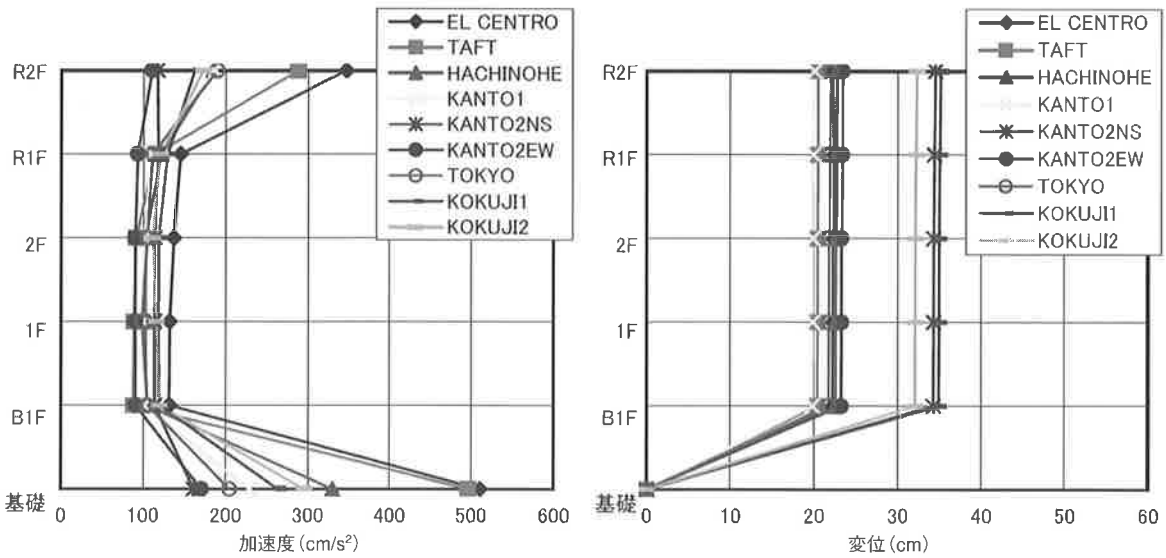
5-4 解析結果

時刻歴応答解析結果(レベル2ゴム剛性標準の場合)を図-11に示す。レベル2での最大応答加速度は屋根を除く居室階で150cm/s²程度、ゴム剛性等のばらつきを考慮した場合でも170cm/s²程度、最大応答変位は37.2cm、ゴム剛性等のばらつきを考慮した場合でも40.5cmで45cm(225%)以内に納まっており、目標の耐震性能が確認された。積層ゴムのせん断ひずみは200%程度で今回のゴム径にとっては比較的大きいが、ゴム面圧が5N/mm²と小さいことから安定的な履歴が得られる範囲内である。



(1) X方向最大応答加速度

(2) X方向最大応答変位



(3) Y方向最大応答加速度

(4) Y方向最大応答変位

図-11 レベル2応答解析結果

図-12には、水平加速度の応答関数(長辺方向)を示す。図中には、透水体での流体抵抗係数(4.2参照)として、透水体内の流速 U を $U=0\text{m/s}$ (最小値)および $U=0.5\text{m/s}$ (最大値)と設定した場合の結果をプロットしている。12秒付近に貯留水のスロッシングの固有周期が存在するが、透水体の減衰効果で応答倍率はかなり低く抑えられ、長周期成分に対するスロッシングの影響を小さくできることがわかる。

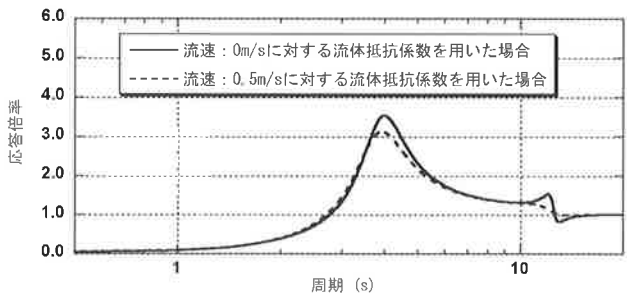
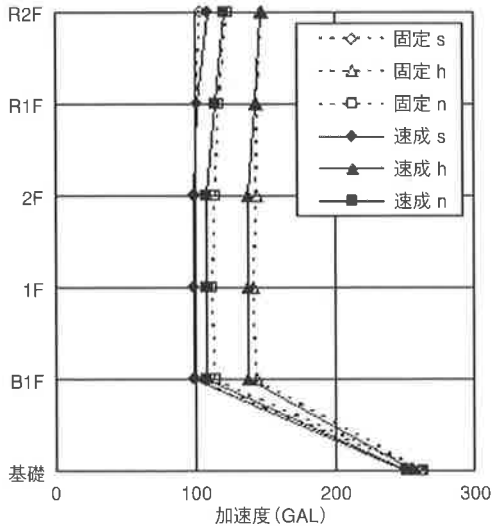


図-12 加速度応答関数(X方向)

図-13に地盤-杭-建物連成モデルによる応答結果と基礎固定モデルのものとを比べたグラフを示す。両者は概ね同等の応答値を示し、建設地の地盤との動的相互作用による影響は小さいことが確認された。



X方向、kokuji1波に対する最大応答加速度
 固定：基礎固定モデル、連成：連成応答解析モデル
 ゴム剛性ばらつき n: normal、s: soft、h: hard

図-13 地盤-杭-建物連成解析結果

6. 維持管理

6-1 免震部材の定期点検

別置き試験体として掘割り水中に沈めておく積層ゴムと透水体は、定期的に物理特性（ばね定数、透水係数など）を測定する。掘割り内は水中カメラによる状態確認を行なうが、竣工後5年目、10年目、以降10年毎には水を抜き総合的な点検を行なうこととする。水を抜いている約2週間の間を考慮すべき地震動の強さは最大25cm/sとして浮力、流体力が作用しない状態での耐震安全性については別途確認した。

6-2 水位、水質管理

1年間に亘り当該敷地周辺の地下水位の観測を行うとともに、降水量との自己相関解析により、地下水位の予測式を求めた⁹⁾。その結果、地下水の平均水位はGL-0.7m程度にあり、降水の影響による地下水位レベルの変動量が80cm以内（過去の降水量データから最高および最低レベルを再現）であることを確認した。掘割り内の平均水位は、周辺地下水の平均水位とほぼ同じレベル（GL-1m）に設定されており、掘割り壁の内外にはほとんど水圧差が発生し

ない。貯留水の水位管理においては、自動注排水装置を用いて±5cmの管理を行う。

また、貯留水の水質については、「衛生的に問題がなく、外観（濁りなど）も考慮する」ことを管理レベルに設定し、必要に応じて臭素系の薬剤投入と循環ろ過を行なうこととした⁹⁾。なお、掘割り上にはカバーをかけて雨水や光の浸入を遮断することにより、水位・水質管理の簡素化を図っている。

7. おわりに

パーシャルフロート構造は建物の地下部分を没水させてその自重の半分程度を浮力により支持させ、長周期化を図ると同時に流体減衰を利用することにより、従来よりも高い免震機能を持たせるという新しい免震構法であり、陸上建築物を対象とした「浮力利用型の免震構法」としては、世界で初めての実現となる。本構法の開発は、流体、構造、地盤・基礎、地下水、水環境（水質）など複数の分野の技術力を結集することで実現し、実建物への適用が可能となった。本建物は比較的小規模なため固有周期は4秒程度であったが、規模が大きくなると5~6秒程度まで長周期化が可能になる。今後は、本建物についてさまざまなデータを収集し、地震時の免震性能だけでなく、貯留水の複合的利用を踏まえた提案を行っていく予定である。

参考文献

- 1)、2)、3) 社本ら：パーシャルフロート免震構造に関する研究（その1）、（その2）、（その3）、日本建築学会学術講演梗概集、2003
- 4)、5) 大山ら：パーシャルフロート免震構造に関する研究（その4）、（その5）、日本建築学会学術講演梗概集、2004
- 6)、7) 土屋ら：パーシャルフロート免震構造に関する研究（その6）、（その7）、日本建築学会学術講演梗概集、2005
- 8) 大山ら：パーシャルフロート免震構造のコンセプトと免震性能について、MENSIN No.41, pp.40-43, 2003
- 9) 財エンジニアリング振興協会 地下開発利用研究センター：「平成15年度 地下を利用した浮体式免震システムに関する研究」報告書、pp.49-73, 2004