

大型水槽を用いた実大戸建住宅の浸水試験システムの提案

PROPOSAL OF A FLOOD TEST SYSTEM FOR FULL-SCALE HOUSES USING A LARGE-SCALE WATER TANK

和木 洋 —— * 1 高橋武宏 —— * 2
及川孝則 —— * 3 品川恭一 —— * 4
平野 茂 —— * 5 福和伸夫 —— * 6

Hiroshi WAKI —— * 1 Takehiro TAKAHASHI — * 2
Takanori OYOKAWA — * 3 Kyoichi SHINAGAWA — * 4
Shigeru HIRANO — * 5 Nobuo FUKUWA — * 6

キーワード：
水害, 耐水害, 浸水試験, 実大住宅, 木造住宅

Keywords:
Flooding, Flood-proofing, Flood test, Full-scale house, Wooden house

In recent years, flood damage has been extensive, and therefore building codes in Japan are being strengthened. In view of this, we propose a novel full-scale flooding test system for the purpose of better understanding flood damage and developing flood-proofing technology for wooden houses. It utilizes a simple large-scale excavation water tank built with sheet piles, with temporary equipment to create rising water and rushing water conditions. A full-scale test system was built and tested for two flood levels. The construction process and measurement and camera recording methods are described. The effectiveness of the test system is demonstrated.

1. はじめに

気候変動が世界中で進行し、日本でも地球温暖化による豪雨発生頻度や降水量の増加^{1,2)}が水害リスクを高めている。熊本県を中心とした九州・中部・東北地方の広域を襲った令和2年7月豪雨、令和元年東日本台風(台風第19号)、九州北部地方を中心とした令和元年8月の前線に伴う大雨など、近年では甚大な災害が続いている。

水害被害は治水対策や水害想定区域外に居住することで防止できるが、様々な事情で区域内に居住せざるを得ない住民も多い。国の債務増大で治水対策にも限界がある。そうした中、国の施策に近年変化が見受けられ、水害に関する法令が整備されてきた。水防法は、リスク分析や浸水被害の危険性周知及び安全確保の根幹的資料として、市町村に洪水ハザードマップ作成を義務付けているが、2015年に洪水及び内水・高潮を最大規模の想定に見直し、浸水想定区域が拡大している³⁾。また、都市再生特別措置法では、2020年に災害ハザードエリアの新規立地抑制と移転促進を提示した。さらに同年には、宅地建物取引業法が重要事項説明にハザードマップ上で取引地を示す義務を課した。2021年には流域治水の考え方が閣議決定され、集水域から氾濫域の流域関係者協働の対策として、建築物の浸水対策も求めている。

住宅の浸水対策として、家屋の浸水対策マニュアル⁴⁾では「浸水を未然に防ぐ方法」と「浸水を許容しつつ被害を減らす方法」を示し、前者の方策として「嵩上げ・高床・囲む・建物防水」を挙げている。これらを参考に木内ら⁵⁾は、耐水化建築物の建築費用対効果を水害リスク及び修復費用を基に試算している。検証試験を伴った既往研究としては、外壁、窓や扉などの開口部、シャッター、止水

板など部材単位の研究がある。明永⁶⁾は、止水板の止水性能を目視確認する1m静水圧試験を、中尾ら⁷⁾は、防水扉の止水性能を定量的に評価する水位2m静水圧試験を実施している。松本ら⁸⁾は、浸水防護設備全般の定量的評価及び等級付けを提案している。桑村ら^{9,10)}は、建築構造学と水理学の観点から、氾濫流とそれに対する構造設計方法、建物外壁の定量的な浸水試験方法を示している。

これらは、水槽壁面の一部に試験体を設置し、水槽内部を建物外周部と見立てて注水する試験である。しかし、実際の住宅は外壁と基礎、玄関扉、窓どうしの接合箇所、止水層とされる外壁面へのビス留め箇所、基礎や外壁面への配管・配線の貫通箇所などの様々な組合せが生じる。また、水流や住宅に生じる浮力の影響も無視できず、住宅全体の試験が不可欠である。既往の研究方法は耐震研究に例えるならば、耐力壁試験や接合部試験といった部材試験に留まり、住宅全体の実大振動台試験に該当する実大検証には至っていない。

こうした背景に鑑み、筆者らは実住宅実装の観点から、

- (1) 実大戸建住宅の浸水被害を再現して、危険性の周知及び対策促進のための啓発教材を作る。
- (2) 実大戸建住宅及び付帯設備機器の浸水被害を防ぐ技術(以下、耐水害住宅)を開発し、実大試験で性能を検証する。

上記2つの目的を実現するため、簡便で汎用性の高い実大戸建住宅の浸水試験システムを構築した。

本報告では浸水試験システムの提案として、試験棟を浸水させる大型水槽の設計、注水方法、水流発生方法、計測及び観察方法とその実施例について報告する。なお前提として、構造的被害を受けるような流速の速い津波や、土砂を伴う土石流は対策の対象外とする。

本稿の内容の一部は、2020年日本建築学会大会学術講演梗概集¹⁸⁾で発表している。

¹⁾ エイチアールディインガボル研究開発部 副長・修士(工学)
(4107 ジェネラルトリアス市カビテエコゾーン II- ブロック 3)

²⁾ (株)一条住宅研究所 課長・博士(工学)

³⁾ (株)一条工務店工事・免震グループ 課長補佐・修士(工学)

⁴⁾ (株)一条住宅研究所 課長補佐・博士(工学)

⁵⁾ (株)一条工務店特建設計部 部長・博士(農学)

⁶⁾ 名古屋大学減災連携研究センター 教授・工博

⁷⁾ Section Head, H.R.D. SINGAPORE PTE LTD. R&D Dept., M.Eng.

⁸⁾ Section Chief, Ichijo Housing Research Institute Co., Dr.Eng.

⁹⁾ Deputy Section Chief, Construction Dept., Ichijo Co., M.Eng.

¹⁰⁾ Deputy Section Chief, Ichijo Housing Research Institute Co., Dr.Eng.

⁵⁾ Manager, Special Design Dept., Ichijo Co., Dr.Agr.

⁶⁾ Prof., Disaster Mitigation Research Center, Nagoya Univ., Dr.Eng.

2. 近年の水害被害の実態

表1に2000年～2019年の20年間の浸水被害¹¹⁾を示す。20年間の浸水被害家屋棟数は延べ931,966棟、床下浸水が約6割、床上49cm以下が約8割である。被害額は12兆3068億円、浸水面積は延べ5145.7km²で、その浸水面積は東京都の2.35倍に値する。国土地積377,975km²のうち可住地面積は122,635km²であることから¹²⁾、20年間で可住地面積の4.2%が浸水したことになる。都道府県別に見ると、佐賀県や宮城県においては延べ20%以上に及んでいる(表2)。これは、令和元年8月の前線に伴う大雨と令和元年東日本台風が影響している。愛知県は浸水被害家屋棟数が約8.6万棟にも及ぶが、その8割が平成12年9月東海豪雨の被害である。被害を受けた住民の中には長年住み慣れた土地で培った近隣・友人関係を失いたくない想いもあり、被災後も同じ地に住居を復旧した例が多数ある。

大規模水害では、一度に多くの家屋浸水被害が生じるため、その支援にも自ずと限界がある。水害による保険金支払い額¹³⁾も多大であり、平成30年台風21号では1兆円を超えた(表3)。

また、国内には多くの海拔ゼロメートル地帯が存在し、東京・伊勢・大阪の三大湾だけで面積576km²、人口404万人¹⁴⁾が居住する(表4)。海岸や河川の堤防決壊が生じると自然排水だけでなくポンプ排水も必要で、1ヶ月以上の長期湛水による膨大な被災者が想定される。堤防決壊は豪雨のみならず、地震災害で生じる危険性もある。

被災後は多くのボランティアや工事関係者、他自治体職員らが復旧支援に訪れる。近年は、JVOAD¹⁵⁾を通じて多くのボランティア活動が展開され、平成30年7月豪雨災害では26万人¹⁶⁾が対応に当たった(表5)。床上浸水の復旧作業として、泥を被った家財道具の運び出し・洗浄・廃棄・泥水かき出し、床下浸水は床下を這いながらの泥水かき出しがあり、いずれも異臭を放つ中の過酷な作業となる。

また、廃棄物発生量は、2018年だけでも約120万トンにも及び¹⁶⁾、環境にも大きな負荷を与える(表6)。

こうした被害を減らす一つの手段として耐水害住宅が考えられる。

表2 都道府県別-浸水被害及び年間降水量

| 順位 | 可住地面積当りの20年間延べ浸水面積割合 | 20年間延べ浸水被害家屋棟数(棟) | | 年間降水量(mm) |
|----|----------------------|-------------------|--------------|-----------|
| | | 床下 | ～床上49cm | |
| 佐賀 | 22.9% (1位) | 12,146 (26位) | 2078.5 (7位) | |
| 宮城 | 21.3% (2位) | 34,756 (6位) | 1389.5 (34位) | |
| 京都 | 18.0% (3位) | 27,412 (10位) | 1407.5 (31位) | |
| 宮崎 | 12.3% (4位) | 14,612 (23位) | 3045.5 (1位) | |
| 愛知 | 12.1% (5位) | 86,088 (1位) | 1555.5 (23位) | |
| 富山 | 0.6% (43位) | 5,350 (38位) | 2097.5 (6位) | |
| 滋賀 | 0.6% (44位) | 2,997 (42位) | 1398.5 (32位) | |
| 大分 | 0.5% (45位) | 8,817 (32位) | 1753.0 (17位) | |
| 東京 | 0.5% (46位) | 22,004 (15位) | 1874.0 (12位) | |
| 沖縄 | 0.4% (47位) | 2,179 (45位) | 2637.5 (2位) | |
| 全国 | 平均 4.20% | 合計 806,423 | 平均 1624.0 | |

表3 過去の主な風水害等による保険金支払い額の順位

| 順位 | 災害名 (西暦/主な地域) | 支払い保険金(億円) | | | |
|----|--------------------------------|------------|-----|-----|--------|
| | | 火災 | 自動車 | 海上 | 合計 |
| 1 | 平成30年台風21号 (2018年/大阪、京都、兵庫) | 9,363 | 780 | 535 | 10,678 |
| 2 | 令和元年東日本台風 (2019年/東日本中心) | 5,181 | 645 | - | 5,826 |
| 3 | 平成3年台風19号 (1991年/全国) | 5,225 | 269 | 185 | 5,680 |
| 4 | 令和元年房総半島台風 (2019年/関東中心) | 4,398 | 258 | - | 4,656 |

3. 耐水害住宅と浸水試験システムの構想

3.1 耐水害住宅

耐水害住宅は、「浸水を未然に防ぐ手法」とすることで、住民の生命・財産の保護や水害被害額の低減、水害廃棄物の低減、災害復旧に要する職員・作業員・ボランティアの軽減に寄与すると共に、浸水想定区域内での居住を可能にすることを目指す。また、2019年末から拡大している新型コロナウイルス感染症の流行による、災害時の避難所収容人数制限や、避難所内の感染リスクといった課題解決にも寄与する。

本報告で想定する耐水害住宅は、「レベル1」と「レベル2」の2段階の対策を想定する。被害全体の約8割を占め、住宅が浮き上がらない程度の浸水深1mまでをレベル1、住宅が浮き上がってしまう浸水深1m超えをレベル2と定め、浸水対策と浮き上がり対策をそれぞれ講じる。

表1 年次別-被害家屋棟数及び被害額、浸水面積

| | 浸水被害家屋 | | | 水害被害額 ^{注2)} (億円) | 浸水面積 (km ²) |
|----------------------|--------------------------|------------|------|------------------------------|----------------------------|
| | 棟数 ^{注1)} (棟) | 被害状況の比率(%) | 床下 | | |
| 2000年 | 92,093 | 64.7 | -注4) | 9,964 | 337.4 |
| 2001年 | 18,313 | 73.9 | -注4) | 2,803 | 126.3 |
| 2002年 | 20,222 | 70.8 | -注4) | 2,995 | 257.3 |
| 2003年 | 19,182 | 67.3 | -注4) | 2,805 | 82.9 |
| 2004年 | 199,371 | 61.6 | -注4) | 20,183 | 697.5 |
| 2005年 | 36,524 | 59.0 | 83.2 | 4,656 | 126.3 |
| 2006年 | 20,910 | 68.8 | 88.5 | 3,446 | 153.9 |
| 2007年 | 15,069 | 75.7 | 96.0 | 2,088 | 239.2 |
| 2008年 | 38,418 | 83.9 | 98.9 | 1,664 | 102.1 |
| 2009年 | 29,379 | 74.9 | 93.3 | 2,861 | 172.7 |
| 2010年 | 16,447 | 70.6 | 94.3 | 2,075 | 104.9 |
| 2011年 ^{注3)} | 66,074 | 61.8 | 90.4 | 7,287 | 511.2 |
| 2012年 | 51,213 | 77.3 | 93.4 | 3,465 | 118.1 |
| 2013年 | 44,202 | 69.7 | 95.3 | 4,062 | 296.8 |
| 2014年 | 29,263 | 69.8 | 96.0 | 2,938 | 127.6 |
| 2015年 | 26,671 | 56.8 | 73.7 | 3,897 | 274.9 |
| 2016年 | 16,677 | 57.6 | 71.9 | 4,668 | 102.9 |
| 2017年 | 29,431 | 62.9 | 90.0 | 5,360 | 219.3 |
| 2018年 | 63,126 | 43.5 | 69.3 | 14,051 | 285.9 |
| 2019年 | 99,381 | 50.7 | 75.9 | 21,800 | 808.5 |
| 20年間合計 | 931,966 | 63.2 | 77.5 | 123,068 | 5145.7 |

表4 三大湾におけるゼロメートル地帯の現状

| 湾名 | 面積(km ²) | 人口(万人) |
|--------------|----------------------|--------|
| 東京湾(横浜市～千葉市) | 116 | 176 |
| 伊勢湾(川越町～東海市) | 336 | 90 |
| 大阪湾(芦屋市～大阪市) | 124 | 138 |
| 合計 | 576 | 404 |

表5 ボランティア活動者数

| 西暦 | 災害名 | ボランティア活動者数(人) |
|-------|------------------|---------------|
| 2018年 | 平成30年7月豪雨(西日本豪雨) | 263,574 |
| 2019年 | 令和元年8月の前線に伴う大雨 | 11,387 |
| 2019年 | 令和元年房総半島台風 | 23,361 |
| 2019年 | 令和元年東日本台風 | 196,740 |
| 2020年 | 令和2年7月豪雨 | 48,525 |

表6 2018年水害廃棄物の発生量の推計

| | 発生原単位 | 被災数 | 廃棄物発生量 |
|------|------------|-----------|--------------|
| 全壊 | 117 ton/棟 | 7,381 棟 | 863,577ton |
| 半壊 | 23 ton/棟 | 10,094 棟 | 232,162ton |
| 床上浸水 | 4.6 ton/世帯 | 22,898 世帯 | 105,331ton |
| 床下浸水 | 0.62ton/世帯 | 28,439 世帯 | 17,632ton |
| 合計 | - | - | 1,218,702ton |

3.2 浸水試験システムの方針

- 下記に示す浸水試験システムで耐水害住宅を含む試験棟の性能及び被害状況を実物検証する。
- ① 「レベル1」「レベル2」の2段階の水害を検証できるシステムとする。
 - ② 試験棟は、建築例の多い、建築面積50m²程度とする。
 - ③ 試験棟を浸水させる水槽（以下、大型水槽）は、対策有無の比較のため、2棟同時に同条件で試験できる規模及び形状とする。
 - ④ 洪水の水位上昇速度が1.0～2.0m/hour以下のケースが68%であったという研究¹⁷⁾を根拠に、最大浸水深3mまで1.5hour（水位上昇速度2.0m/hour）で注水可能な貯水・注水計画とする。
 - ⑤ 木造家屋の倒壊等限界の試算例³⁾を基に、レベル2は最大2m/secの水流を目標とする。
 - ⑥ 止水と試験後の原状復帰が容易な低価格工法を前提とし、鋼矢板を擁壁として地盤を掘削することで大型水槽を築造する^{注6)}。
 - ⑦ 大型水槽を築造でき、試験に使用する大量の水を貯水するスペースを確保できる試験場所を選定する。さらに、大量の水を容易に確保、排水できる場所が望ましい^{注7)}。
 - ⑧ 大型水槽内の水位及び水流の流速を計測し、ビデオカメラを設置して観察・収録する。

4. 浸水試験システムの実施計画

4.1 縮小模型による試験検証

均一な水流を実現できる水槽形状を検討するため、1/25縮小模型を試作した（写真1、2）。2棟同条件の水流を実現し得る周回形状及び水中ポンプによる水流発生を基本とし、その形状とポンプ配置を検討した。

平面・断面形状としては、①長方形の平面形状、②隅切りをした八角形の平面形状、③使用水量を低減させる目的で一部底面を高くした断面形状、④底面高さが一定の断面形状の組合せを検討し、ポンプ配置は小型水中ポンプやホース放水を用い、形状ごとに最適な配置を目視で比較検討した。その結果、②・④を組み合わせた底面一定の八角形が良好な形状だと判断した。

4.2 地盤調査

本試験場所は茨城県南部地域に広く分布する筑波台地に位置し、樹枝状に延びた常緑層の堆積する洪積地盤である。安全な大型水槽の設計・施工のために、敷地の中央付近でボーリング調査を実施し、N値及び土質を確認した。さらに、水槽築造エリア全体の地盤強度を平面的に補間するため、スクリューウエイト貫入試験（SWS）を9ヶ所で実施した。

ボーリング調査結果から、地下水位は約 GL-4.5m、表層 GL-5m までは N 値 10 程度の凝灰質粘土、深さ GL-6m～7m 付近に N 値 40 程度



写真1 形状②③の模型検証



写真2 形状②④の模型検証

の中砂層があることを確認し（図1）、SWS からも同深度に支持層があることを確認した（図2）。以上より、水槽擁壁は鋼矢板3型（長さ9m）を使用することにした。

4.3 鋼矢板を用いた大型水槽の設計

大型水槽は幅30m×奥行40m×深さ3.5m、水路幅11m、水槽内面積920m²、外周長123m、内周長57mで、A・B棟の2棟を配置する計画とする。図3に断面図、図4にレベル2の配置図を示す。鋼矢板は、地上面から-8.5m（水槽床面から-5m）を下端、地上面から+0.5mを上端とし、外周部308枚、内周部144枚、計452枚使用する。鋼矢板の凹凸面には合板を張り、水流の妨げにならない計画とする。

試験棟基礎は原地盤上に直接施工し、その周囲を含む水槽底面全体を住宅外構に則して厚120mmコンクリート及びΦ6@150mmのメッシュ筋を用い、排水釜場に勾配を付けて床付けする。水槽中央にできる中島は地上面からアクセスできる橋を設置し、計測室を配置する。

この規模の大型水槽を鉄筋コンクリート造で地上に築造する場合、その費用は概算で2億円と想定されるが、本大型水槽はその1/6程度で実現できる。

4.4 試験棟の計画

試験棟は、間口7.28×奥行7.28mの2階建て、耐震等級3とし、A棟は一般的な仕様の在来軸組構法、B棟は浸水対策及び排水管逆流・設備機器水没防止対策を施した枠組壁工法とする¹⁸⁾。両試験棟内に家具・家電・日用品を配置し、さらに、照明やエアコン、床暖房、24時間換気システム、太陽光発電システム、蓄電池などの設備機器も設置・稼働させた状態で試験し、試験後に動作確認を行う。

また、木造住宅は浸水深3mを超えると天井裏の空気溜まり等によって浮力が急増し、流失する可能性がある³⁾¹⁹⁾。しかし、試験浸水深が3mであること、2011年東日本大震災における津波被害の独自調査や報告²⁰⁾において、浸水深3m以下で流失した住宅はないことからA棟は流失しないと判断し、対策は講じない。B棟は屋内浸水しないため浮力で流失する可能性があり、浮力及び流失対策を講じる。

4.5 注水・排水・水流ポンプ（ポンプシステム）の計画

浸水深3.0mの試験に要する水量は、水槽内面積920m²×水位3.0mから、2760m³である。本研究を実施した大型降雨施設は、2500m³の地下水貯水槽を有し、ポンプ設置方法の都合で使用可能水量は1500m³であった。不足分は、貯水能力500m³/基の簡便に設置可能な仮設プール（W25m×D20m×H1.5m）を地上に3基設置し、合計3000m³を供給できる計画とした。

貯水槽及び仮設プールから大型水槽までは配管を設置し、水中ポンプで注水する。水中ポンプは配管径や長さ、配管曲がり度合いで

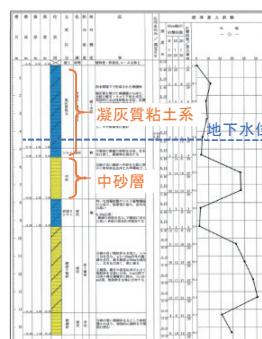


図1 ボーリングデータ

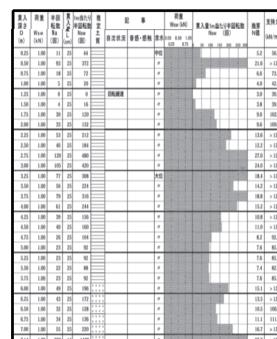


図2 SWSデータ

生じる配管損失と、揚程、供給電力などを考慮して選定した。1.5hourで注水するには、貯水槽用は $16.7\text{m}^3/\text{min}$ ($1500\text{m}^3/90\text{min}$)、各仮設プール用は $5.6\text{m}^3/\text{min}$ ($500\text{m}^3/90\text{min}$) 以上の能力が必要である。実際には、貯水槽用に公称 $6\text{m}^3/\text{min} \times 3$ 台 (公称計 $18\text{m}^3/\text{min}$)、各仮設プールに公称 $26\text{m}^3/\text{min}$ を使用した。

排水は、大型水槽内に設けた釜場に公称31m³/minの水中ポンプ1基を設置し、仮設プールに排水できる計画とした。

注水・排水に用いる配管は、タイガースポリマー社製のクリスタルホースF-3型（内径203mm、総使用量約800m）と、350A鋼管の併用とし、ポンプ付近に発電機を設置して電力供給する。

水流発生用の水中ポンプ（以下、水流ポンプ）は、ポンプ下部に吸水口を有する $46\text{ m}^3/\text{min} \times 4$ 台と $18\text{ m}^3/\text{min} \times 2$ 台を各試験棟の前面に設置し、上部吐出口高さを1.5mまたは3.0mとする。電力は発電機で供給する。発電機や配管を含む注水・排水・水流のポンプシステムは、ポンプの2700万円を含み、4500万円の費用で実現できた^{注8)}。

本システムは、試験状態に合わせて容易に注水・停止・注水再開・排水が可能であり、稼働ポンプ数を変更することで注水速度の調整も可能である。また、仮設プールと配管、ポンプを利用するため、貯水場所や設置高さも限定されない。高い位置に貯水した場合、ポンプを使用せずに注水することも可能で、配管の代わりに水路を用いてもよい。さらに、水を再利用して試験を繰り返すことが可能で、資源を有効活用し、費用も低減できる。

4.6 計測及び撮影計画

図4に水位計・流速計の設置位置、図5に計測システム図を示す。水位は、B棟後面の中島側に設置した東京測器社製の水位計（型名：KW-10C）で計測する。水面の流速は、B棟前面及び側面を横河電機社製のドップラー式非接触流速計（型名：WJ7661）で、水中の流速は、B棟前面の中央及び北側の高さ1m・2mをケネック社製プロペラ式流速計（本体型名：V04100、検出部型名：VOT2-100-10）でそれぞれ計測する。その他、試験棟壁面に生じる水圧を圧力計、外壁や窓面の面外変形・層間変形・試験棟浮き上り量を変位計、試験棟の傾きを傾斜計及び加速度計、浸水の有無を漏水センサー、風速を風速計で計測し、3次元画像計測器も設置する。収録は東京測器社製のデータロガー（型名：TDS-530/30ch）、スイッチボックス（型名：IHW-50G-05/50ch、ASW-50C-05/50ch）を水没しない試験棟2階に設置し、計測室にてサンプリング周期2secで計測する。

撮影用カメラは、水没する箇所にはVPLUS社製の水中カメラ（型名：VB-SJC20B78AW、防塵防水保護等級IP68、フルHD解像度1920×1080）を使用し、その他はアツミ電気社製の防水カメラ（2.0M-EX-SDI高感度カメラ、防塵防水保護等級IP66、解像度1920×1080）を使用する。撮影収録機器及び観察用モニタは計測室に設置する。

なお、浸水による停電の恐れに配慮し、計測及び撮影機器は試験棟と別系統の電力供給とする。

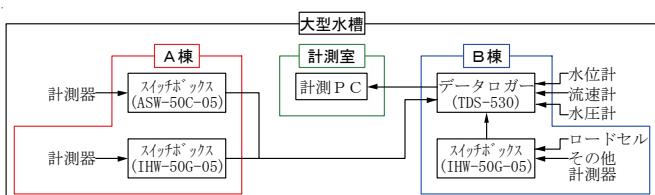


図5 計測システム図

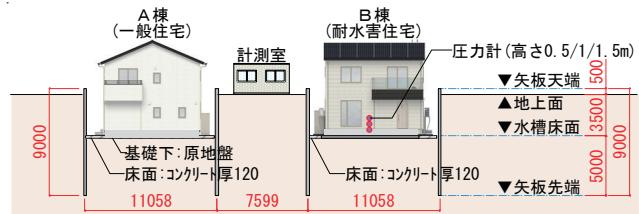


図3 浸水試験システム断面図 (A-A')

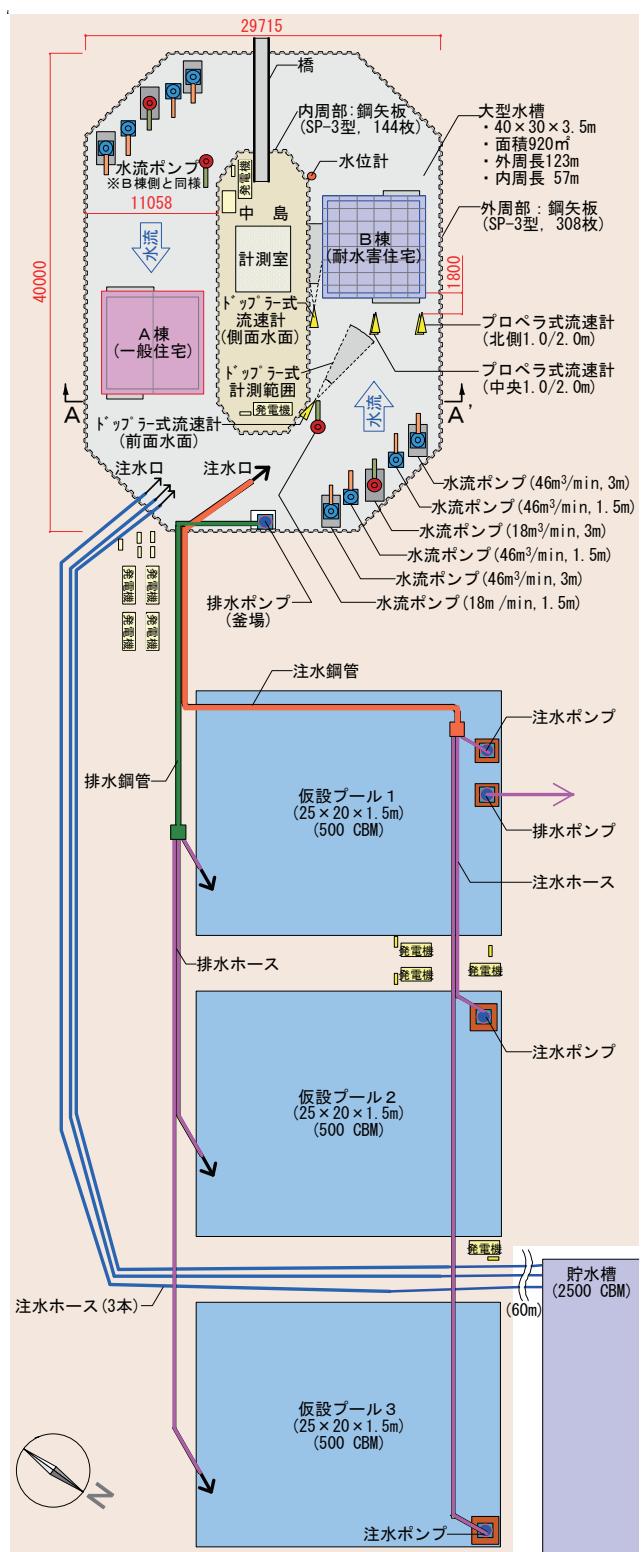


図4 浸水試験システム全体配置図（レベル2）

5. 浸水試験システムの築造過程

浸水試験システムの築造過程を写真3、築造日数を表7に示す。大型水槽の築造エリア全体を整地した後、14日間で鋼矢板を圧入、20日間で掘削し、水槽底面の原地盤上に試験棟基礎を施工した後に、6日間で水槽底面を床付けし、計40日間で大型水槽が完成した。

大型水槽完成後に試験棟上屋を建築し、その後13日間で仮設プールや注水・排水・水流ポンプなどのポンプシステムが完成した。

試験システム全体は実働53日間、延べ424人工で築造し、合計費用7500万円で実現した。費用の内訳は、大型水槽に全体の40%、ポンプシステムに60%を要し、ポンプシステムのうちポンプ費用が浸水試験システム全体の1/3程度を占める結果となった(図6)。計測及び撮影に要した費用はここに含まない。

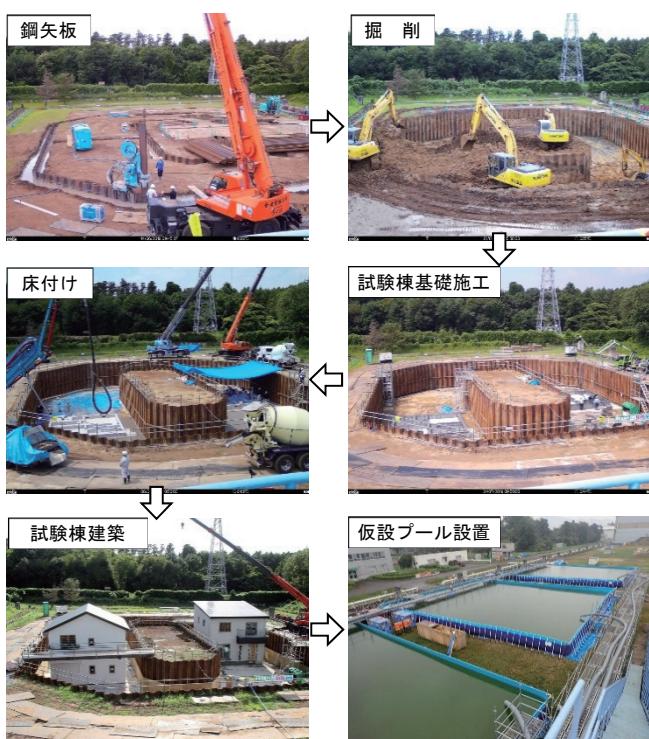


写真3 浸水試験システムの築造過程



写真4 配管設置状況



写真5 水流ポンプ設置状況



写真6 レベル2試験写真

表7 浸水試験システム築造日数

| 工程 | 所要日数 | 延べ人工 |
|---------|------|-------|
| 大型水槽 | 14日 | 108人工 |
| 掘削 | 20日 | 122人工 |
| 床付け | 6日 | 56人工 |
| ポンプシステム | 13日 | 138人工 |

6. 実測に基づく試験システムの能力検証

6.1 試験方法

試験開始から水位3mまで、貯水槽のポンプ3台から常に注水する。途中、水位0.25mで仮設プール1から注水し、仮設プール1の貯水量がゼロになる水位1.25mから仮設プール2による注水、同様に水位2.05mから仮設プール3と、順次1基から注水する。

水流ポンプは注水している状態で稼働させる。吐出口1.5m(下段)の水流ポンプは水位1.7mから、吐出口3.0m(上段)は水位2.2mから稼働開始し、試験が終了するまで稼働させる。

6.2 注水能力及び水位維持性能

図7に水位及び水位上昇速度の推移を示す。注水ポンプの能力は、貯水槽用では公称6m³/minに対して実際は5.1m³/min、仮設プール用は公称26m³/minに対して実際は16m³/minであった。試験開始後、7minで水位0m(試験棟G L)に到達^{注9}し、94minで水位3mに到達した。水位0~3mの注水時間は87minであり、平均水位上昇速度にすると2.1m/hourであった。70min付近で一時的に水位上昇速度が増加し、最大値3.5m/hourを計測した。これは上段水流ポンプの稼働によって波が発生し、水面が上昇したことが要因である。

また、水位3.033mで注水停止した後に浸水状態を19時間継続した結果、水位の低下量はわずか10mm程度であった。

6.3 水流能力

図8に水位3m到達後1.5min間の水面流速を示す。試験棟前の前面水面は最大で1.5m/s程度であり、側面水面については流速がさらに低い結果であった。目標の2.0m/sには到達しておらず、ポンプの容量や配置、水路幅の工夫が必要であることが分かった。

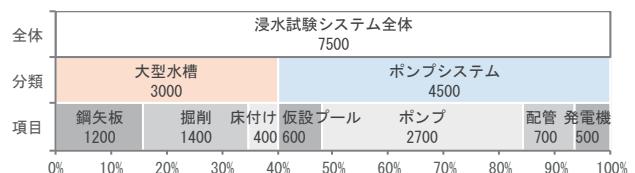


図6 浸水試験システム概算費用(単位:万円)

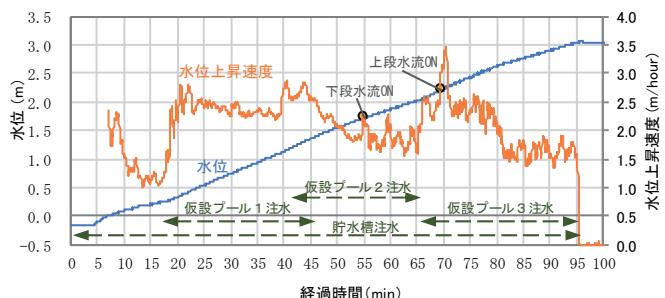


図7 大型水槽内の水位及び水位上昇速度

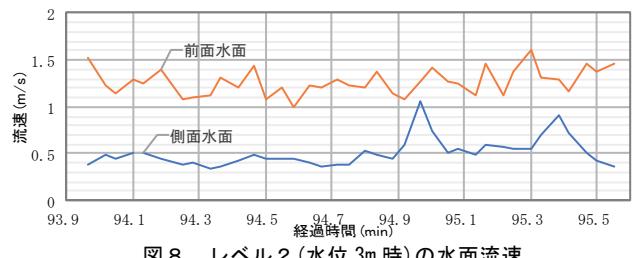


図8 レベル2(水位3m時)の水面流速

7.まとめ

本研究は、木造住宅における浸水被害の検証及び対策技術の開発を実現するため、実大戸建住宅の浸水試験システムを構築し、その能力を検証した。下記に、その計画及び実施例に基づく結果を示す。

- 1) レベル1（浸水深1m以下）とレベル2（浸水深1m超え）の2段階の水害を想定し、浸水深3mまで試験可能なシステムができた。
- 2) 同時に2棟の試験棟同じ条件で試験可能な水槽形状を模型試験で検討し、幅30m×奥行40m×深さ3.5mの八角形・周回形状の大型水槽を低価格で実現できた。
- 3) 大型水槽及び注水・排水・水流装置は、汎用性の高い一般的な鋼矢板・仮設プール・水中ポンプを利用し、地上に築造する1/6程度の費用で実現し、解体時の産廃も大幅削減できた。また、浸水試験システム築造の工期は53日、延べ424人工、7500万円で築造し、その実施過程を示した。
- 4) 試験状態に応じて注水・停止・排水ができる柔軟性と、水を再利用して繰り返し試験できる合理性のあるシステムを実現した。
- 5) 計測・撮影方法を具体的に示し、実測に基づき、水位上昇速度は目標2.0m/hourに対し2.1m/hour、流速は目標2.0m/sに対し1.5m/s程度であることを確認した。流速はある程度発生させることができたが、目標到達にはポンプ容量や数量、配置、または水路幅の工夫が必要である。
- 6) 浸水深3mを19時間継続した結果、水位低下量は10mm程度と高い水位維持性能を確認し、長時間の浸水試験に対応できることを示した。

今後は本システムを用いた、住宅浸水被害の検証と、耐水害住宅の技術開発を行い、その成果を報告していく。今回はレンタル品では国内最大級の水中ポンプ^{注10)}を使用したため、全体費用の1/3を占める結果となった。台数は増加するが、一般に流通している容量のポンプを組み合わせることで安価に実現できる可能性がある。また、本研究は浸水深3mで実施したが、ハザードマップや実際の水害では浸水深10m超えも存在する。そのため、更なる対策と検証が必要であり、本研究の今後の課題としたい。

本システムは試験体に応じて水槽サイズ・形状・ポンプ容量や配置を変更して計画可能であり、本結果はその設計に資する画期的な知見である。今後、実大浸水試験を伴った様々な水害対策技術が研究されることを期待する。

8. 謝辞

本研究は「耐水害住宅の開発及び性能評価に関する研究」として、国立研究開発法人防災科学技術研究所との共同水害被害軽減プロジェクトとして実施した。また、試験に際し多大な御協力を頂いた一社工務店社員並びに関係各位に心から謝意を表す。

参考文献

- 1)環境省：環境省における気候変動対策の取組、参考資料1、pp.4-6、2020.9.1
- 2)気象庁：気象業務はいま2020、pp.8、2020.6
- 3)国土交通省水管理・国土保全局河川環境課水防企画室：洪水浸水想定区域図作成マニュアル（第4版）、2015.7
- 4)財団法人日本建築防災協会：家屋の浸水対策マニュアル 我が家の大雨対策－安心な暮らしのために－、2001.7
- 5)Kiuchi, N., et al.: STUDY ON THE FLOODPROOFING PLANS OF

WOODEN DETACHED HOUSINGS AND THEIR COST-EFFECTIVENESS EVALUATION, AIJ Journal of Technology and Design, Vol. 27, No. 65, pp.499-504, 2021.2

木内望ほか 7名：木造戸建て住宅の耐水化建築計画案の検討及びその費用対効果からみた評価、日本建築学会技術報告集、第27巻、第65号、pp.499-504、2021.2

6)明永卓也：モバイルレバー（ハイブリッドパネル堤）の止水性に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集A1, pp.959-960, 2013.8

7)中尾浩行ほか 3名：水害対策に備える簡易防水扉の開発、日本建築学会大会学術講演梗概集A1, pp.693-696, 2016.8

8)松本知大、和田暢治：浸水防止性能を有する設備の試験方法について、日本建築学会大会学術講演梗概集A1, pp.697-700, 2016.8

9)Kuwamura, H., et al.: INUNDATION TEST METHOD FOR FLOODED HOUSES WITH APPLICATION, AIJ Journal of Structural and Construction Engineering, Vol. 80 No. 717, pp.1763-1771, 2015.11

桑村仁ほか 3名：家屋の浸水試験方法とその実施例、日本建築学会構造系論文集、第80巻、第717号、pp.1763-1771、2015.11

10)桑村仁：建築水理学、技報堂出版株式会社、2017年

11)国土交通省水管理・国土保全局：水害統計、2000-2019

12)総務省統計局：社会生活統計指標 2021, II 基礎データ、pp.232~234, 2021.2

13)一般社団法人日本損害保険協会：風水害等による保険金の支払い、2020.3、https://www.sonpo.or.jp/report/statistics/disaster/ctuevu000000530r-att/c_fusuirai.pdf、（参照2021-05-08）

14)国土交通省水管理・国土保全局：わが国におけるゼロメートル地帯の高潮対策の現状、ゼロメートル地帯の高潮対策検討会、第1回検討会、資料4、2005.10.13

15)社会福祉法人全国社会福祉協議会 全国ボランティア・市民活動振興センター：“ボランティア活動者数”全社協被災地支援・災害ボランティア情報、<https://www.saigaivc.com/data-katsudou/>、（参照2021-05-10）

16)環境省環境再生・資源循環局災害廃棄物対策室：災害廃棄物対策指針（改定版）、技14-2 災害廃棄物の発生量の推計方法、pp.8-9、2018.3

17)飯野光則：死者及び家屋倒壊・流失と氾濫水理現象の関連性分析、土木技術資料、51-10, pp.14-17, 2009.10

18)網倉護ほか 7名：豪雨災害に備えた実大木造住宅の耐水害性能に関する実験的研究；（その2）実験梗概要及び耐水害性能の説明、日本建築学会大会学術講演梗概集C1, pp.393-394, 2020.9

19)滋賀県：耐水化建築ガイドライン、pp.8-14、2015.4

20)一般財団法人建築性能基準推進協会・東京大学生産技術研究所・鹿島建設株式会社：「S3. 津波避難ビル等の構造基準の合理化に資する検討」報告書、平成25年度建築基準整備促進事業、PP.5-1, 2013.3

注

^{注1)} 床下浸水、床上浸水、半壊及び全壊の合計値を示す。

^{注2)} 家屋被害に限らず、一般資産等被害・公共土木施設被害・公共事業等被害の合計被害額を示す。

^{注3)} 2011年東日本大震災による浸水被害は含まない。

^{注4)} 2004年以前は床上浸水被害の統計内で区分（～49cm, 50～99cm, 100cm以上）されていない。

^{注5)} 全国災害ボランティア支援団体ネットワークの略称で、被災者支援活動における連携の促進・支援環境の整備を図ることを目的に設立された。

^{注6)} 解体時に土埋め戻し及び鋼矢板引き抜きで済み、産廃発生を抑制できる。また、試験時に地上から安全に観察することができる。

^{注7)} 本研究は、広大な実験区画を有し、地下水を汲み上げて2500m³まで貯水できる大型降雨実験施設（防災科学技術研究所）で実施した。そのため、水及び貯水に要する費用を削減するとともに、浸水試験と同時に豪雨再現も行った。

^{注8)} 水中ポンプ及び発電機はレンタル費用、配管は購入費用、仮設プールは2基がレンタル、1基が購入費用である。

^{注9)} 大型水槽底面は排水勾配があるため、試験棟G Lよりも低い。水位は試験棟G Lを基準に計測したため、マイナス水位から試験開始であった。

^{注10)} 北海道から茨城県へ取り寄せたため、輸送コストも高額である。

[2021年6月2日原稿受理 2021年8月10日採用決定]