

地震動で被災したステンレス鋼製矩形水槽の損傷原因の検証

森松工業株式会社 正会員 ○青木 大祐, 行田 聡
愛知工業大学 正会員 鈴木 森晶, 嶋口 儀之

1. はじめに

2016年に発生した熊本地震によって震源地付近に建設されたステンレス鋼製矩形水槽の被害が発生している。図-1に、熊本地震と設計（方法4：兵庫県南部地震を想定）に用いる加速度応答スペクトルの比較を示す。固有値解析で求めた水槽の固有周期は0.25 sであり、短周期型の前震では設計応答加速度の実に2.7倍もの想定を上回る地震力が作用したことになる。

図-2に、被災したステンレス鋼製矩形水槽を示す。水槽寸法は、16×12.5×4.5 m (860 m³) であり、16 m 方向の中間位置に、仕切板が設けられており比較的大型の水槽である（写真 a）。この水槽において、写真 b)~d)のような損傷が発生した。土木学会地震工学委員会の報告書¹⁾によると、いずれも水槽上部の損傷であったためスロッシング被害によるものとされている。b)においては、スロッシングによる損傷と思われるが、c)や d) のような損傷は過去に例がなく、スロッシングによる圧力がパネル板の面外方向に作用しても球殻部が内側に凹むことや、球殻外周部に座屈が生じることは考えにくい。また、本水槽の特徴として、側壁のパネル継ぎ目（1 m ピッチ）の高さ方向にトラス材が設置されており、側壁に生じる動水圧がトラス材を介して、底板と屋根板に荷重を伝達する構造となっている。地震動の卓越周期と水槽の固有周期が合致したことで、設計を大きく上回る慣性力が生じ、屋根板に大きなせん断力が働いたことで損傷に至った可能性が考えられる。

本研究では、パネル板のせん断特性の把握と共に水槽の損傷原因を実験と解析により検証した。

2. 実験条件

図-3に実験装置を示す。試験体は、1×1 m（板厚 1.5 mm、材質：SUS329J4L）のパネル板2枚を凸部が外側になるように貼り合わせ、試験体の左右に固定用のH鋼を溶接固定した。このH鋼を実験装置にボルト固定してパネル板にせん断力がかかる構造とした。試験体の手前側にビデオカメラを設置して

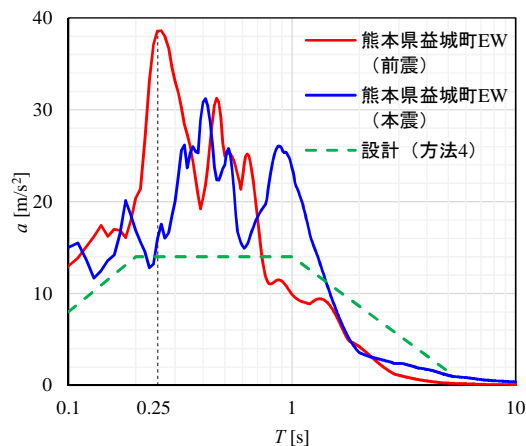


図-1 加速度応答スペクトルの比較

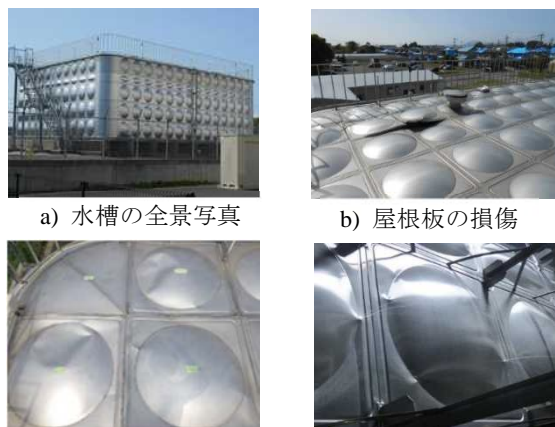


図-2 被災したステンレス鋼製矩形水槽

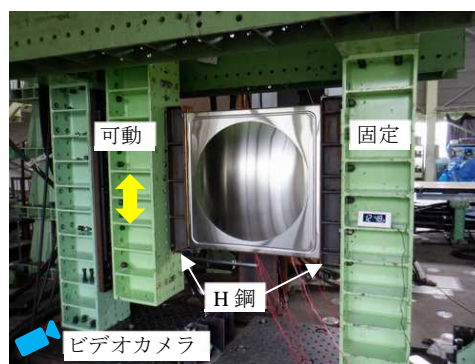


図-3 実験装置

パネル板の変形を撮影すると共に、裏側には事前解析の結果から1軸のひずみゲージを14ヶ所に貼り付けた。载荷条件は、静的せん断試験では0.01 mm/sで45 mmの変形まで、動的せん断試験（Sin波）では、アクチュエータの能力を考慮して振動数を1 Hz、振幅を±20 および±30 mmの2種類とした。

3. 結果および考察

図-4 に、静的せん断試験の試験体の変形状態（左上-右下方向へ引張時）と主ひずみの分布を示す。せん断変形が 20 mm を超えると a) の黄色○印の位置でパネル板が膨らみ、球殻部の右上や左下付近に凹みが見られる。この膨らみや凹みが見られる位置は、被災水槽の損傷位置と一致する。また、FEM 解析の結果より、球殻部の黄色○印位置に引張ひずみ、凹み位置に圧縮ひずみが生じていることが確認できる。

図-5 に、静的せん断試験の球殻部の外周近傍（球殻部と平板部の境界）のせん断変形に対するひずみの変化を示す。H7 と H10 は、せん断変形と共に大きな引張ひずみが発生する。一方、H3 と H6 は、せん断変形が 20 mm までは圧縮ひずみとなるが 20 mm を超えると引張ひずみに転じる。これは、球殻部に凹みが見られるタイミングと一致する。実験値と解析値のひずみを比べると一部データに差が見られるものの、せん断変形が 20 mm まではひずみの値は概ね一致する。球殻部の外周近傍で大きなひずみが発生している点として、平板部とプレス加工部の境界における形状変化の大きい点が挙げられる。なお、球殻部内のひずみは比較的小さい値であった。

図-6 に、動的せん断試験（Sin 波）の変形の比較を示す。a) $f=1\text{ Hz}$, $d=20\text{ mm}$ では、静的せん断試験と同様の変形が見られ、加振終了時に損傷もなく元の状態に戻った。一方、b) $f=1\text{ Hz}$, $d=30\text{ mm}$ の実験では、飛び移り座屈（せん断変形が 30 mm 付近で球殻部が圧縮を受ける位置に突然大きな音とともに凹みが発生する。その後、逆方向のせん断変形で凹みが元に戻るのを繰り返す。）が発生した。加振終了時には、試験体に変形（凹み）が残った。

4. おわりに

本研究では、パネル板のせん断特性の把握と共に水槽の損傷原因を実験と解析により比較検討し、以下の結論を得た。

- 1) 静的せん断試験では、パネル板のせん断変形が 20 mm を超えると球殻部の外周の 45°付近に板に膨らみが発生し、引張ひずみが最大となる。
- 2) 動的せん断試験の結果より、せん断変形が 20～30 mm の間にパネル板の限界状態が存在する。被災水槽の損傷 図-1c)と d)は、パネル板のせん

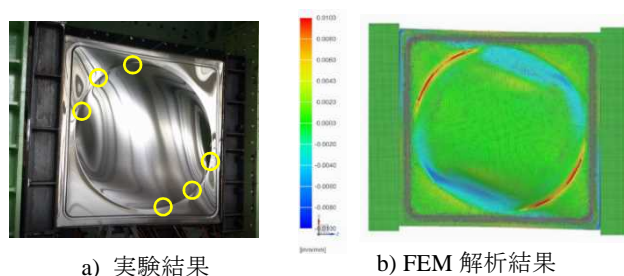


図-4 静的せん断試験と主ひずみの分布 ($d=20\text{ mm}$)

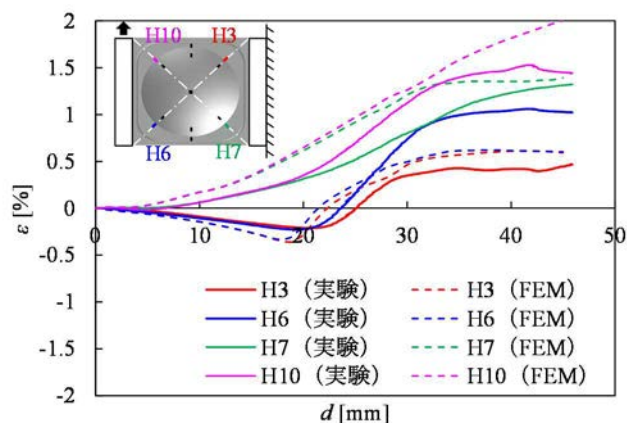


図-5 せん断変形に対するひずみの変化

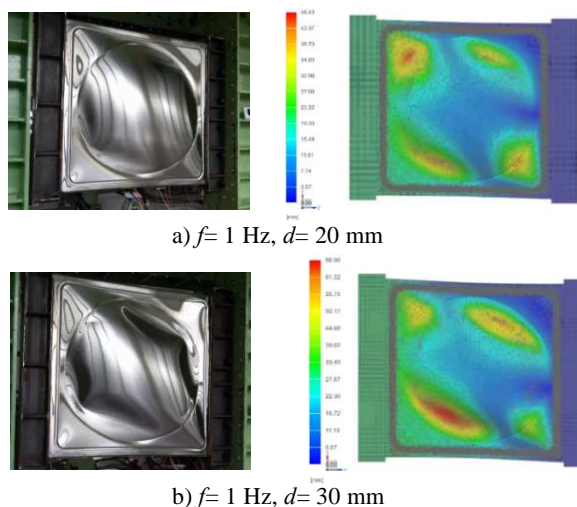


図-6 動的せん断試験（Sin 波）の変形の比較

断変形により凹みや座屈が生じた可能性が高いと言える。なお、パネル板にせん断力に加えてスロッシングの負圧荷重を同時に作用させた場合には、さらに小さいせん断変形でも飛び移り座屈が起きることを FEM 解析で確認している。本結果については、発表時に報告する。

謝辞

本実験では、愛知工業大学学生の横山侑祐氏の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 給水タンク・配水タンクの地震被害対策研究, 土木学会地震工学委員会, 「水循環施設の合理的な災害軽減対策研究小委員会活動報告」, 2018.