

# 博士学位論文

(内容の要旨及び論文審査の結果の要旨)

AOKI Daisuke  
氏名 青木 大祐  
学位の種類 博士 (工学)  
学位記番号 博 乙 第 31 号  
学位授与 令和 2 年 9 月 17 日  
学位授与条件 学位規程第 3 条第 4 項該当  
論文題目 地震時におけるステンレス鋼板製矩形水槽の振動挙動に関する研究  
論文審査委員 (主査) 教授 鈴木 森晶<sup>1</sup>  
(審査委員) 教授 山田 和夫<sup>2</sup> 教授 北川 一敬<sup>3</sup> 教授 手嶋 紀雄<sup>4</sup>

## 論文内容の要旨

### 地震時におけるステンレス鋼板製矩形水槽の振動挙動に関する研究

本論文では、地震時におけるステンレス鋼板製矩形水槽の振動挙動を明らかにするとともに、地震時における水槽の振動対策を提案した。特に、耐震性の不足した既設水槽に容易に設置できる 3 種の装置を考案し、振動実験により各装置の特性を検討した。

第 1 章では、水槽に地震力が作用する場合の現象について説明した。地震波のスロッシング振動あるいはバルジング振動が発生水槽の固有振動数が地震の卓越振動数と同調するとき、スロッシングやバルジングと呼ばれる特徴的な振動が発生する。やや長周期の地震動では、水槽内の水が共振してその水面が激しく上下動するスロッシング振動が起こる。スロッシング振動では、波高が増大して水面と屋根板間の余裕高を超え、屋根板や側壁上方に衝撃圧を与えてこれらを破損する場合がある。一方、短周期の地震動では、水と側壁が共振するバルジング振動が起こる。バルジング振動では、水槽の壁面が弾性体として変形しながら連成振動を繰り返して槽下方の動水圧を増大させるので、壁面中央部から下部での損傷が起こりやすい。

第 2 章では、矩形水槽の地震による被害事例とメカニズムを分析し、水槽設計基準の変遷と現状の問題点や課題について整理した。

第 3 章では、矩形水槽のスロッシング波高抑制に有効な空隙率の高いプラスチックフィルターの既設槽への設置を検討した。矩形モデル水槽および中型・大型の立方体実

水槽においてフィルター設置の形態（鉛直あるいは水平）および位置を変えて振動実験を行い、最大波高を測定した。その結果、モデル水槽で得られたスロッシング波高を低減するフィルター設置は、実水槽においても有効であることが確認された。また、実水槽での結果に基づいて、設置位置やフィルター枚数に応じた最適な設置位置を明らかにした。

第 4 章では、矩形水槽のスロッシング波高の抑制法として多孔板の設置を提案した。開孔率および孔径を組み合わせた多孔板を矩形モデル水槽の中間位置に設置し、振動数のある間隔で変えて水槽内の波高を測定した。開孔率の高い多孔板では、水槽幅に基づくスロッシング固有振動数付近で波高が卓越し、開孔率が低いほど波高抑制効果は大きくなった。一方、開孔率の低い多孔板では、スロッシング固有振動数が水槽幅から水槽の半分幅に基づく値へと遷移し、開孔率が低いほど波高抑制効果は小さくなった。本測定範囲では、開孔率 15% の多孔板で高い波高抑制効果が得られ、この開孔率においては孔径が小さいほど波高抑制効果は若干高くなった。モデル水槽でスロッシング波高抑制の認められた多孔板を大型立方体実水槽に設置して、その抑制効果を検証した。実水槽の中間部に多孔板を設置することにより、スロッシング波高は大きく抑制された。また、多孔板の深さを変えた実験結果から、多孔板を水槽底面まで設置する必要のないことが認められた。

第 5 章では、短周期振動時に矩形水槽壁面で問題となるバルジング振動による水圧増大の抑制法として、薄い高減衰ゴムから成る制震装置を考案した。小型および大型の立方体実水槽の底背面に寸法等を種々に組み合わせた制震

1 愛知工業大学 工学部 土木工学科 (豊田市)

2 愛知工業大学 工学部 建築学科 (豊田市)

3 愛知工業大学 工学部 機械学科 (豊田市)

4 愛知工業大学 工学部 応用化学科 (豊田市)

装置を設置してスイープおよび地震波の加振実験を行い、水圧減少挙動について検討した。この結果、本制震装置を設置することにより、バルジング固有振動数における応答水圧は非制震時の半分以下に減少することが認められた。小型および大型の実水槽の寸法や構造形式が大きく異なるものの、水圧減少に及ぼす本装置の特性の効果はほぼ同様であった。本制震装置の水圧減少率は、面圧比（ゴム板の許容面圧に対する面圧の比）が高いほど大きくなり、面圧比の関数として精度よく再現された。

第6章では、長周期および短周期地震下における大型立方体実水槽の深さ方向の水圧分布を測定した。スロッシング振動時に発生する水圧は、振動方向に直角な面の側壁上方で最も高く、下部に行くほど水圧も低くなった。一方、バルジング振動時に発生する水圧は、振動方向に直角な側壁の中央部付近で最大となり、槽高さの中央部から下部の圧が最も高くなった。いずれの振動時において、側壁から離れるにつれて水圧は低くなった。これらの挙動から、両振動時における水槽の破損箇所を推測できた。

第7章では、各章で得られた研究成果についてまとめた。なお、本論文では立方体の実水槽を用いており、1辺が、1,000, 2,000 および 3,000 mm の水槽を、それぞれ小型、中型および大型と称した。

以上のように、本論文では、地震時におけるステンレス鋼板製矩形水槽内の波高および水圧の挙動に着目して振動実験を行い、水槽の振動特性を明らかにした。また、水槽の固有振動数で生ずる振動対策を目的として、耐震性が不足した既設水槽に容易に設置できる波高抑制装置および制震装置を考案し、各装置の効果を検証した。

これらの装置を実水槽に設置することにより、想定外の巨大地震から大切な水を守ることができるものと確信する。

## 論文審査の結果の要旨

本論文では、地震時におけるステンレス鋼板製矩形水槽の振動挙動を明らかにするとともに、地震時における水槽の振動対策を提案した。特に、耐震性の不足した既設水槽に容易に設置できる3種の装置を考案し、振動実験により各装置の特性を検討した。なお、本論文では立方体の実水槽を用いており、1辺が、1,000, 2,000 および 3,000 mm の水槽を、それぞれ小型、中型および大型と称している。

第1章では、水槽に地震力が作用する場合の現象について説明した。地震波のスロッシング振動あるいはバルジング振動が発生水槽の固有振動数が地震の卓越振動数と同調するとき、スロッシングやバルジングと呼ばれる特徴的な振動が発生する。やや長周期の地震動では、水槽内の水が共振してその水面が激しく上下動するスロッシング振動が起こる。スロッシング振動では、波高が増大して水面

と屋根板間の余裕高を超え、屋根板や側壁上方に動水圧を与えてこれらを破損する場合がある。一方、短周期の地震動では、水と側壁が共振するバルジング振動が起こる。バルジング振動では、水槽の壁面が弾性体として変形しながら連成振動を繰り返して槽下方の動水圧を増大させるので、壁面中央部から下部での損傷が起こりやすいことを説明した。

第2章では、矩形水槽の地震による被害事例とメカニズムを分析し、水槽設計基準の変遷と現状の問題点や課題について整理した。

第3章では、矩形水槽のスロッシング波高抑制に有効な空隙率の高いプラスチックフィルターの既設槽への設置を検討した。矩形モデル水槽および中型・大型の立方体実水槽においてフィルター設置の形態（鉛直あるいは水平）および位置を変えて振動実験を行い、最大波高を測定した。その結果、モデル水槽で得られたスロッシング波高を低減するフィルター設置は、実水槽においても有効であることが確認された。また、実水槽での結果に基づいて、設置位置やフィルター枚数に応じた最適な設置位置を明らかにした。

第4章では、矩形水槽のスロッシング波高の抑制法として多孔板の設置を提案した。開孔率および孔径を組み合わせさせた多孔板を矩形モデル水槽の中間位置に設置し、振動数のある間隔で変えて水槽内の波高を測定した。開孔率の高い多孔板では、水槽幅に基づくスロッシング固有振動数付近で波高が卓越し、開孔率が低いほど波高抑制効果は大きくなった。一方、開孔率の低い多孔板では、スロッシング固有振動数が水槽幅から水槽の半分幅に基づく値へと遷移し、開孔率が低いほど波高抑制効果は小さくなった。本測定範囲では、開孔率15%の多孔板で高い波高抑制効果が得られ、この開孔率においては孔径が小さいほど波高抑制効果は若干高くなった。モデル水槽でスロッシング波高抑制の認められた多孔板を大型立方体実水槽に設置して、その抑制効果を検証した。実水槽の中間部に多孔板を設置することにより、スロッシング波高は大きく抑制された。また、多孔板の深さを変えた実験結果から、多孔板を水槽底面まで設置する必要のないことが認められた。

第5章では、短周期振動時に矩形水槽壁面で問題となるバルジング振動による水圧増大の抑制法として、薄い高減衰ゴムから成る制震装置を考案した。小型および大型の立方体実水槽の底背面に寸法等を種々に組み合わせさせた制震装置を設置してスイープおよび地震波の加振実験を行い、水圧減少挙動について検討した。この結果、本制震装置を設置することにより、バルジング固有振動数における応答水圧は非制震時の半分以下に減少することが認められた。小型および大型の実水槽の寸法や構造形式が大きく異なるものの、水圧減少に及ぼす本装置の特性の効果はほぼ同様であった。本制震装置の水圧減少率は、面圧比（ゴム板

の許容面圧に対する面圧の比)が高いほど大きくなり、面圧比の関数として精度よく再現されたことを確認した。

第6章では、長周期および短周期地震下における大型立方体実水槽の深さ方向の水圧分布を測定した。スロッシング振動時に発生する水圧は、振動方向に直角な面の側壁上方で最も高く、下部に行くほど水圧も低くなった。一方、バルジング振動時に発生する水圧は、振動方向に直角な側壁の中央部付近で最大となり、槽高さの中央部から下部の圧が最も高くなった。いずれの振動時において、側壁から離れるにつれて水圧は低くなった。これらの挙動から、両振動時における水槽の破損箇所を推測できた。

第7章では、各章で得られた研究成果についてまとめるとともに、全体の総括を行っている。また、本研究では、地震時におけるステンレス鋼板製矩形水槽内の波高および水圧の挙動に着目して振動実験を行い、水槽の振動特性を明らかにした。また、水槽の固有振動数で生ずる振動対策を目的として、耐震性が不足した既設水槽に容易に設置できる波高抑制装置および制震装置を考案し、各装置の効果を検証した。これらの装置を実水槽に設置することにより、想定外の巨大地震から大切な水を守ることができるものと確信できる。

以上より、当該論文は本専攻における博士(工学)の学位水準を十分に満たしているものと判定する。