

貯水槽における異なる振動現象の把握とその耐震設計に関する研究
A STUDY ON UNDERSTANDING DIFFERENT VIBRATION PHENOMENA
IN WATER TANKS AND THEIR SEISMIC DESIGN

都市人間環境学専攻 小野 泰介

Civil, Human and Environmental Science and Engineering, Taisuke Ono

研究背景と目的

我国では様々な地震被害が懸念されている。その一例として、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(M9.0) (以下、東日本大震災)において、生活に直結した地震被害として生活用水の不足が挙げられる。生活用水の供給を担っている貯水タンクは、地震により破損したことにより貴重な水が失われるに至っている。ステンレス製やFRP製の矩形貯水槽の破損被害が多数見つかった。被害地域内の上水道配水施設などでの大型矩形タンクの破損や、震源から遠く離れた地域においても大型矩形タンクが変形する被害などが多数報告されている。東日本大震災ではこのようなタンクの被害により病院、学校の避難所でライフラインである水が十分に配給されず甚大な被害をもたらした。貯水タンクの破損により緊急外来の受け入れを制限する事態に陥った。これらの貯水タンクの被害は東日本大震災に始まった被害ではなく、兵庫県南部地震、能登半島地震、中越地震、中越沖地震等でも被害が生じている。さらに同様の被害は、2016年4月14日及び16日に熊本県を中心として熊本地震の前震(M6.5)、本震(M7.3)の地震においても多数生じており、熊本県内においては市民生活に直結する学校、病院、集合住宅等の給水タンク及び水道局施設の配水タンクにも多くの被害が発生していることが報告されている。

このような種の貯水槽被害の一つとして、数秒から数十秒のやや長周期地震動によるスロッシング現象（液面揺動の励起）の発生が原因であると推定されている。近い将来必ず発生する南海トラフでの巨大地震や首都圏直下地震等で生じる「やや長周期地震動」による地震災害に対応することが重要である。この原因として、やや長周期地震動によりスロッシング現象（液面揺動の励起）が発生したからであると推定されている。また、近年では新たにバルジングによる被害が着目されつつある。バルジングとは短周期地震動により、タンク構造体の振動が主体となる流体と構造の連成振動現象と考えられている。これらはタンク天井のスロッシングではない、タンク中央部から下部付近での側板が裂ける被害が東日本大震災や熊本地震で多く報告されたことから近年話題となっている。バルジングについての設計基準は未だになく、矩形タンクにおけるバルジング現象を研究した事例も少ない。

本研究では、貯水槽における異なる振動現象の把握とその耐震設計に関する研究と題して、実機貯水槽における地震時に発生が予想されるスロッシング・バルジング挙動とこの挙動を抑制する制振装置の開発を各種実機貯水槽の加振実験または解析により検討を行う。スロッシングだけでなくバルジングについても追及し、今後のバルジング対策や設計時の指針となることを目指す。今後タンクを初めとする給水タンクの耐震安全性を向上させるためには、スロッシングのみならずバルジング問題の解明が重要であり、かつバルジング対策をどのようにタンクの耐震設計に取り入れていくかが、一つのポイントになるものと思われる。近い将来発生が予想される東海・南海・東南海トラフでの巨大地震や首都圏直下型地震等で生じる地震動によりタンクの中で発生するスロッシング・バルジング挙動、さらにはタンク自体の破壊を防ぐべきである。これにより、災害時に最も重要なライフラインの水を守ることができる。

本論文の内容と成果

本論文は9章で構成され、各章の内容と成果の概要は以下の通りである。

第1章の「序論」では、研究の背景と目的、本論文の構成を示している。

第2章では、まず熊本地震におけるパネルタンクの公表されている被害調査事例などと独自の被害調査を併せて示しながら、パネルタンクの耐震性能向上が早急に必要であることを述べる。また、東日本大震災においても、スロッシングのみならずバルジングの被害が多発していることを示す。設計で考慮されているはずのスロッシングでも被害があり、未考慮のバルジングにおいても被害がある。これらのことから、タンクの耐震設計において、未だに足りていない部分が多くあると思われる。このように地震被害が発生する度に、スロッシングの被害のみならずバルジングの被害が発生していることに鑑み、今後貯水槽を初めとする給水タンクの耐震性と安全性を向上させるためには、現行設計基準で規定されているスロッシングのみならず、設計基準に規定が示されていないバルジング問題の解明が急務である。そのため、バルジング対策をどのように貯水槽の耐震設計に取り入れていくかが、今後耐震性と安全性向上のためには必要であり、バルジングに関する設計基準の策定が一つの重要な課題になると思われる。特に重要施設や避難所となる学校や病院においては、性能設計ランクを上げる必要がある。

第3章では、熊本地震による SUS タンクの被害を受けて、2012年に実機 SUS タンクを用いたスロッシング現象を対象として実施した加振実験データを見直し、タンク内部の補強材付近に主として着目する。その結果と熊本地震での SUS タンクの損傷被害報告から確認した SUS タンクの損傷被害事例等に関しての比較から、以下のことが推測される。①スロッシング現象による液面揺動が SUS タンクの補強部材に影響を与えるので、動的な繰り返し荷重による照査が必要である。②溶接部等の部材間の剛性が異なる箇所がクラック発生等の弱点になっている。③SUS タンクの補強材で強度を著しく上げることが、補強にならない可能性が大きいと考えられる。ここでの事例を受け、大型配水池も含めて SUS タンクの耐震設計基準が妥当であったか否かを再検討することが必要であると考えられる。なお、配水池は山の上などに設置されることが多いことから、地震による損傷被害が発生した場合には、山津波など思わぬ二次的な被害を生じることも否定できない。

第4章では、一般に広く使われている構造形式が異なる同一寸法のタンクを使い、振動台を用いての振動実験を行い、バルジング振動応答特性の違いを明らかにする。入力波形は、地震波として兵庫県南部地震神戸海洋気象台で観測された加速度成分の内、NS 波成分を用いることとする。この結果、側板のパネル形式の違いで地震時の振動応答特性が異なることがわかったので、ここで論ずるものである。タンクの構造別に比較すると、側板のパネルの剛性が大きくバルジングの発生に関与していることがわかる。具体的には、タンクの側板での応答加速度のスペクトルピークは、FRP タンク 2.1Hz、SUS タンク 3.6Hz、鋼板タンク 9.7Hz の順で低周波側に存在している。さらに、FRP タンクと SUS タンクの応答加速度をスペクトル解析した結果は、箕輪の提案しているバルジング発生域（2.5～6.7Hz 程度）にほぼ入っていることである。まず鋼板タンクは、側板の剛性が他の二つのタンクより高いので、応答加速度の値が小さく、側板の応答加速度のスペクトルのピークが高周波側にあることから、バルジング発生域に入っていないことがわかる。このことから、鋼板タンクのバルジングに関してはここで取り上げたサイズでは安全であると考えられる。一方、SUS タンクと FRP タンクは、鋼板と比較して側板の剛性が低いことから、応答加速度のスペクトルピークが低周波側に存在し、かつバルジング発生域に存在している。これより側板の剛性の低い SUS タンクと FRP タンクでは、バルジングの発生が考えられるので、耐震設計上、バルジングに関する検討を要すると考えられる。

第5章では、土木学会地震工学委員会水循環 NW 災害軽減対策研究小委員会 TF の活動の一環として検討された 3×3×3m の SUS タンクを対象に解析を実施する。ここで解析は、汎用有限要素解析ソフトウェアである ADINA を用いる。このソフトの特徴は、流体問題と構造問題を一つのマトリックスで解く流体-構造連成解析が可能なことである。これにより地震動で SUS タンクが局所的にどのような力を受ける可能性があるのかを確認し、今後の耐震設計条件の設定で必要となる事項を検討する。固有振動数解析により算出された、本研究対象の SUS タンクのスロッシング 1 次の固有振動数は 0.49Hz、スロッシング 2 次モードの固有振動数は 0.88Hz であった。これらは、Housner の理論式より求めた、理論値に完全に一致しており、解析の信頼度が高いことを示す。

固有振動数解析により算出された、バルジングの固有振動数は、4.77Hz であり、これらは愛知工業大学の佐久間らの実験値に近い値となっており、解析の精度が高いことを示すことができた。またバルジングにおけるモードは、下部のパネル部分や隅角部の補強材溶接部分に表れることを示す。内部にジャングルジムのような補強材が溶接されている特徴的な構造により、バルジングの固有振動数のみならず、補強材の固有振動数も算出されることを示す。そのため、固有値解析を実施する上で、刺激係数を一度に算出するのではなく、1Hz 毎に解析を実施することで、刺激係数の算出不足を防げることを示す。

また、時刻歴応答解析も実施し、溶接部等の部材間の剛性が異なる箇所で応力集中が発生、溶接部分にクラック発生等の弱点となることを明らかにする。設計上は引張りしか考慮されていない隅角部の平板補強材において、SUS タンクの加振時の特徴の一つである加振方向とその直角方向の位相差を生じる変形モードにより、圧縮力が生じ、これが座屈の発生に繋がっていることを明らかにする。さらに型鋼等による内部補強材により、SUS タンクの強度を著しく上げることで、結果的にパネル部と補強材部の接合部分で大きな剛性差を生じることになるので、これが耐震補強とならない可能性があることを示す。この結果より、パネル内側面のみ溶接されている隅角部に繰り返し引張と圧縮が作用することで、タンク隅角部の溶接部分が裂けることになった可能性が高いと考えられる。ここでの事例は、東日本大震災や熊本地震において被災した SUS タンクの被害状況と一致している。

第6章では、貯水槽である鋼板タンクに着目し、有限要素解析を行い、固有振動数解析の結果を示すとともに、時刻歴応答解析と加振実験の動液圧変化の比較を行う。固有振動数は鋼板タンクの実機加振実験の結果と概ね一致し、板厚を薄くすると固有振動数は低下する。このため、バルジングを考慮し安全性を担保するためには、ある程度の板厚を保つことが必要になると言える。また、動液圧変化の時刻歴波形を見ると解析と実験は同様の挙動を示していると見受けられ、本解析は有用であると推察する。さらに、貯水槽である鋼板タンクに着目し、容量別の有限要素解析により、固有振動数解析を行う。固有振動数はタンクの高さと水位や溝ピッチと関係しており、側板の剛性が深く関係していると考えられる。よって、側板の剛性を増加させることで懸念される地震動の共振によるバルジングを防ぐことができると考える。

第7章は、地震時にタンク内溶液のスロッシング現象などによって貯水槽に破損が発生していることに鑑み、貯水槽内部に制振装置を設置したその被害を低減させることを試みる。ここでは、2×2×2m の FRP タンクと 3×3×3m の鋼板タンクである実機貯水槽を使用した振動実験を行い、本論で提案する 8 の字型浮体式制振装置の効果を検証する。この制振装置のメカニズムは、液体が制振装置のスリットを通過するときに抵抗力が生じ、水の粘性が見掛け上大きくなることを利用して流速を抑えることである。また、タンク中心でクロスすることで加振方向に対応し、内容液の速度エネルギーが最大となる中央に抵抗を設けている。そして、形状を 8 の字形にすることで、制振装置への応力分散や、複数組み合わせることで任意の形状のタンクにも対応することができる。この材料の比重は 0.9 であるので、水面付近に浮遊する。スロッシング現象は水面付近の流体運動が支配的とな

るので、効果的に抑制し、かつ内溶液の水深変化にも対応可能となる。なお、ここでの制振装置は、施工性や法的に義務付けられている衛生面の確保のための内部の定期清掃の方法などを考慮して、スリット形状としている。

8の字型浮体式制振装置を設置した場合、 $2\times 2\times 2\text{m}$ のFRPタンクでは、最大波高は正弦波1次モード加振において35～50%程度低減する。減衰定数については約8～10倍となることを確認した。また、神戸NSの地震波を入力した場合においても同様な制振効果を確認することができた。さらに正弦波加振時と地震波加振時のスロッシングによる水面付近の動液圧変化を低減することを確認した。これにより、提案する8の字型浮体式制振装置が、スロッシング現象に対して抑制効果が十分にあると判断する。

第8章ではスロッシング制振装置を設置することで得られる効果として、実験による検証と実験結果から導かれる計算式を導出し、耐震効果の例を示す。スロッシング制振装置を設置することで $3\text{m}\times 3\text{m}\times 3\text{m}$ 角タンクの場合、設計水平震度 $K_h=0.6$ で設計されたタンクは、 $K_h=1.0$ 相当以上に耐震性能が向上。設計水平震度 $K_h=1.0$ で設計されたタンクは、 $K_h=1.5$ 相当以上に耐震性能が向上。設計水平震度 $K_h=1.5$ で設計されたタンクは、 $K_h=2.0$ 相当以上に耐震性能が向上することとなる。

第9章「結論」では、本論文で得られた成果を総括し、今後の課題を示している。

我々の研究グループでは本研究で開発した8の字形浮体式制振装置を実用化し、災害時の貯水槽の破壊を防ぎ、生活用水を配給することができると考えられる。この開発した制振装置の効果によって、大震災による被害が減災でき、いざという時に社会貢献ができればと願う。地震大国である我が国では、「備えあれば憂いなし」である。

課題として、貯水槽および制振装置の応力・ひずみ、動液圧などの更なる吟味が必要である。また、本研究で行えた加振力に限界があり、また複数種類の地震波を入力しての実機実験が行えなかった。より大きな加速度の実験を行い、スロッシング挙動による動的な作用からタンクの性能限界を把握すること。また、現在の実験は加振方向が水平方向で一軸である。3次元的な振動についても検討が必要であるだろう。過去に被害のあった地震動の不規則的な加振を行うことで新たな発見があるはずである。

更には、地盤の応答についても議論していき、地盤による地震応答の増幅や地盤の固有振動数の分野の研究について、まだまだ追究していかなければならないと考える。地震動の周期特性が表層地盤の増幅特性の影響を大きく受けるということに注目し、熊本地震を対象に、実際の貯水槽被害地点の地盤特性を分析し、貯水槽被害と地盤特性の関連などが考えられる。そして今後、発生が想定されている地震に対して、地点別の地盤特性を考慮した貯水槽設計により危険性を軽減すると考える。

まだ予定ではあるが、2022年頃水道施設耐震工法指針が改訂されるであろうという情報を掴んでいる。より地震に強い水道システムの構築に資することを目的に、以下を基本に改訂するとされている。そこで、改訂の趣旨を踏まえ、改訂の基本方針を以下のとおりとするとある。①性能規定型設計化を徹底する。②設計事例集を充実させる。③危機耐性について記述する。要求性能の定義として、耐震設計において、水道施設は、その用途・機能を果たすために要求される性能を満足する必要がある。水道施設の要求性能は、(1)使用性、(2)復旧性、(3)安全性、(4)危機耐性の4つの性能である。これらの要求性能を踏まえ、国や地方自治体の行政から設計者、メーカー、施工者と協力して行くことが必要である。

以上のように、水道施設耐震工法指針が改訂されるにあたり、本論文はこの指針改定の参考資料としても位置付けられる。また、貯水槽は矩形断面容器のみならず、石油タンク等にも使われている円筒型のタンクについても検討を行い、制振装置の開発・実用化により減災対策の一つとして提案できればと考えている。さらに産学共同の研究開発により日本に限らず、環太平洋造山帯など地震の発生頻度が高い地域への普及を目指している。