

論文の内容の要旨

1. 博士学位請求論文

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

2. 要旨

2011年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) では, 津波による甚大な被害の一方で, 地震の揺れそのものによる構造物被害は, 地震の規模を考えれば過大とまではいえるものではなかった. しかしその中で, 建物に付随するに貯水槽の被害が生活用水の不足をもたらし, 大きな影響を与えたことは注目すべき事実といえる. 同様の被害は, 2016年に発生した熊本地震の前震(M6.5), 本震(M7.3)においても多数生じている.

このような貯水槽被害の原因の一つとして, 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)の発生が原因で挙げられる. スロッシング現象によって生じる被害は, 貯水槽に限らず石油タンクの火災など, 過去の地震においても重篤な事例の報告が数多く得られている. 一方, 近年の貯水槽被害では, 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であるバルジング現象とみられる事例も数多く見出されている. バルジングは, 現象の存在自体は古くから指摘されていたものの, 社会的に大きな影響をもたらすものとして, 十分な認識をもたれてきたとは言い難い. 設計基準整備も進んでいない.

本論文では, 貯水槽におけるこれらの異なる振動現象の把握と, その耐震設計に関する研究に取り組んでいる. 第1章で, 本研究の背景と目的について述べ, 既往研究の総括を行った後, 第2章では熊本地震を中心にして過去の貯水槽の地震被害の実例を調査, とりまとめている. この内容を以下の章と対比させつつ, 研究の実用性を確認している. 第3章ならびに第4章では, 実機実験を行った結果を示している. 第3章では熊本地震で被害が顕著に表れたによる SUS (ステンレス製) タンクに着目し, 小野氏が地震以前に実施していた加振実験と, 被害の様相を対比した. 実験でみられたタンク被害メカニズム(パネル隅角部に入れた補強材の座屈破壊)が実現現象でもみられ, そこに現行の設計基準の盲点ともいえる弱点を抽出することに成功している. 第4章では同一寸法の, 異なる種類のタンクにたいする加振実験から, 特に, バルジングの発生に寄与する側板のパネルの剛性影響を分析した. 第5章ならびに第6章では, それぞれ第3章, 第4章に対応した流体-構造連成解析を実施し, 動的現象に伴う応答の, パネル隅角部での局所的な位相差が構造物被害の原因になりうることを, この点が静的解析にもとづく耐震設計上の盲点になり得ることを, バルジングの固有振動数へのパネル剛性が顕著であって, この点を考慮することで共振の回避が可能なことなどを示している. 第7章ならびに第8章では, タンクの制振装置や補強招致の開発とその効果の検証を行っている. とりわけスロッシング現象については, 地震入力に対して流体の共振を回避せしめることが困難であり, 現象発生後に振動エネルギーを吸収, 逸散させ, 外からの入力終了後早期に減衰させるメカニズムの導入が有効な対策となる. 第3章, 第5章で提示した構造上の弱点に対する, 効果的な補強を実現する装置も提案している. 最後の第9章では, 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.

本論文は, 実地震被害でみられた, 様々な貯水槽内の水の振動現象と, それをもたらす構造物への影響を, 実験と解析を通じて解明した点が中心的な内容であるが, ここで得られた知見は, 従来の貯水槽の耐震設計において, 複雑な振動現象を単純化した静的作用に置きかえて強度を確保する手法が軸であったことに対し, 動的な現象を的確にとらえて, 弱点を抽出し, 可能な限りで共振を回避もしくはその影響を縮減する方策の提言を志向したものであるといえる.

論文審査の結果の要旨

1. 博士学位請求論文

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

2. 論文審査結果の要旨

本論文は、東北地方太平洋沖地震や熊本地震の際に数多くの被害を与えた、貯水槽におけるスロッシング現象やバルジング現象について、現象の把握と、その耐震設計に関する研究に取り組んだものである。

第1章で、本研究の背景と目的について述べ、既往研究の総括を行った後、第2章では熊本地震を中心にしつつ過去の貯水槽の地震被害の実例を調査、とりまとめている。第3章ならびに第4章では、実機実験を行った結果を示し、実被害との対比を行っている。第5章ならびに第6章では、それぞれ第3章、第4章に対応した流体-構造連成解析を実施し、動的現象に伴う応答の、パネル隅角部での局所的な位相差が構造物被害の原因になりうることを、この点が静的解析にもとづく耐震設計上の盲点になり得ることを、バルジングの固有振動数へのパネル剛性が顕著であって、この点を考慮することで共振の回避が可能なことなどを示している。第7章ならびに第8章では、タンクの制振装置や補強招致の開発とその効果の検証を行っている。最後の第9章では、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。

本論文で得られた成果は、地震発生時にみられた実際の被害という、貴重な研究素材を活用し、実験による再現と、共振現象につながる設計要素の抽出を行い、これを解析によって裏付けたものである。この中で、従来の耐震設計法で用いられてきた、静的設計作用による応力照査の考え方では検出困難な、パネル隅角部の動液圧の位相差による応力の発生と部材要素の破壊の対応付けを行うなど、現象の解明に大きな貢献を行っている。また流体-構造連成振動であるバルジング現象の固有振動数の割出しと、そこに見られるパネル剛性の影響解析に成果をあげており、構造物の局所的な強度の確保ではなく、全体系としての剛性確保による振動モードのコントロールという、動的解析的知見に基づく、新たな耐震設計の方向性を示唆している。さらに本論文で紹介されている、制振装置や補強装置は、その効果が確認されており、実際に現場での利用も開始されているものもある。これらの観点から見て、本論文の成果は十分に実用性、ならびに学術上の有用性を有するものと判断される。

本論文の研究対象のひとつである、バルジング現象は、学外副査をお願いしている坂井藤一博士が、円筒形タンクにおける発生の可能性を1975年に問題提起し、その後耐震設計への反映もなされてきた経緯がある。適用範囲としては燃料系のタンクが中心であり、所管する技術分野も貯水槽とは異なるものであった。矩形のタンクにおけるバルジングは、耐震設計の盲点となってきたが、東北地方太平洋沖地震以降に、被害原因の重要な要素として急速に注目を集めているものである。論文中でも2022年に予定されている水道施設の耐震工法指針改訂に言及しているが、まだまだ関連研究の蓄積はわずかであり、本論文は新規性という意味でも、十分な評価を受けるに値すると判断される。

性能設計の導入という観点から見ても、スロッシングやバルジングの発生がもたらす被害が、修復限界（ある程度被害の発生を許容する）であるのか終局限界あるいは危機耐性（人命や財産の保全に重要な意味を持つとして発生可能性の低減に努める）であるかの議論は緒についたところといえる。この認識によって、パネルの板厚の選択オプションが分かれてくるなど、構造物費用にも直接かかわる問題であり、本論文の提起している問題は将来の発展性に富むものであるといえる。

以上、本論文は、独自性が高いうえ、貯水槽の耐震設計に係る分野において有用な成果を得ている。また、同分野におけるさらなる課題の解決に貢献する展開も期待できる。

よって、本論文は、博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと認める。

（中央大学論文審査報告書）