

氏 名	大 野 卓 志
学位(専攻分野)	博士 (工学)
学 位 記 番 号	博理工甲 第22号
学位授与の日付	2017年 3 月25日
学位授与の要件	学位規則 (昭和28年 4 月 1 日文部省令第 9 号) 第 4 条第 1 項該当
学 位 論 文 題 目	高压ガスを貯蔵する球形タンクの耐震性能に関する研究
論 文 審 査 委 員	主 査 教 授 小 川 武 史 副 査 青山学院大学名誉教授 小 林 信 之 副 査 教 授 渡 邊 昌 宏 副 査 教 授 米 山 聡 副 査 埼玉大学教授 渡 邊 鉄 也

論 文 の 内 容 の 要 旨

大 野 卓 志

2011年 3 月11日, 東日本大震災において高压ガスを貯蔵する球形タンクが倒壊し, 火災爆発事故が発生した. 倒壊した球形タンクは鋼管製のブレースが破断したことにより, 水平剛性を失い, 水平方向の地震慣性力に支柱が耐えられず倒壊に至った. 高压ガスを貯蔵する圧力容器は, 高压の状態で可燃性や毒性のガスを貯蔵しており, 可燃性ガスの漏洩による火災, 爆発の危険性や毒性ガスの漏洩に伴う人的及び環境被害, 圧力開放に伴う爆風圧や金属片の飛散等の危険性が非常に高く, 厳しい安全性が要求される. また, 大規模地震の被災後の LP ガス等のエネルギー供給など重要な役割を担う. そのため, 耐震性能と呼ばれる地震に対する安全性が求められる. 本研究では, 球形タンクの同種事故防止や耐震性能の向上を目的とし, 球形タンクの耐震性能の評価を行い, 球形タンクの耐震性能評価方法や耐震性能向上のための補強方法及び設計手法を提案する.

高压ガス設備には高い安全性が求められ, 地震国である我が国において耐震設計は

非常に重要である。耐震設計は、外力が地震であり、耐圧設計の使用圧力等とは異なり、外力の上限を設計者や使用者が任意に設定できるものではない。そのため、どのような地震を想定し、どのような状態を限界の状態として設計するかということが非常に重要である。そのための設計手法として、想定地震動の推定方法や、限界状態の決定方法、限界状態に達するか否かの判定方法が必要である。本研究ではそれらの方法を示し、合理的な耐震設計手法を提案することにより、球形タンクの耐震性能の向上と地震被害防止を目的とする。

上記の研究成果をまとめた本論文の構成は、以下のとおりである。

第1章では、過去から現在までの耐震設計の歴史と変遷、過去の地震被害と対策および現在必要とされる大規模地震対策について記述し、本研究の位置づけと必要性について論じ、本論文の目的を示した。

第2章では、2011年の東北地方太平洋沖地震で被害を受けた高圧ガスの球形タンクの事故について、事故事例から原因究明を行い、数値シミュレーションを用いて検証を行った。また、事故の原因から、当時の設計基準における問題点を示し、その対応策としてブレース交差部分の評価式を提案し、球形タンクの地震被害の対策と指針を示した。

有限要素法による数値シミュレーション（以下、FEM解析という）の結果から、球形タンクの倒壊原因は、鋼管ブレースの交差部分において過大な応力が発生し、ブレースが破壊したことによるものであることを明らかにした。ブレース交差部分の評価は当時の耐震設計基準に規定されていなかったため、ブレース交差部分の評価方法を提案した。また、球形タンクの地震被害の対策と指針として、既設の球形タンクに対して提案した評価方法によってブレース交差部分の評価を行い、強度が不十分な場合には、ブレース交差部分の適切な補強方法により補強する必要があることを示した。

第3章では、球形タンクの耐震性能の向上のためのブレース交差部分の補強方法の提案と補強方法の有効性の検証をFEM解析により行った。

鋼管ブレース交差部分の補強方法の提案および有効性を検証は、ブレース交差部分を補強した球形タンクの3次元解析モデルを用いた静的な弾性および弾塑性FEM解析によりおこなった。弾性FEM解析において、ブレース交差部分の発生応力の低減

が確認できた補強方法を有効な補強方法として選定した。選定した補強方法でブレース交差部分を補強した球形タンクについて弾塑性 FEM 解析を行い、塑性ひずみ分布と限界耐力を評価し、有効性の検証を行った。FEM 解析の結果から、応力とひずみの低減効果と限界耐力が上昇するブレース交差部分の補強方法を有効な補強方法として提案した。

第 4 章では、球形タンクの補強による耐震性能の向上と地震応答特性の変化について模型振動実験により検討を行った。振動実験において、球形タンクの補強の有無に伴う固有周期の変化、塑性変形に伴う応答の変化、応答加速度、限界加速度を評価し、球形タンクの地震応答とブレース補強の効果について実証した。

実証は、小型の球形タンクの模型振動実験を行い、補強の有効性と補強による耐震性能の向上を評価することによりおこなった。実地震波や設計基準で用いる加速度応答スペクトルに適合するように作成した模擬地震波（以降、スペクトル適合波と呼ぶ）による振動実験から、球形タンクの地震応答特性と破壊モードについて、補強の有無の違いについて評価を実施した。提案した補強方法により球形タンクの支持構造を補強した場合、補強による地震応答特性は変わらないものの耐震性能は向上した。振動実験により得られた破壊モードは、補強が無い場合は、倒壊した球形タンクと同様にブレース交差部分で破壊が生じ、補強した場合には、ブレースと支柱の接合部分で破壊が生じる結果となった。

第 5 章では、球形タンク支持構造の破壊モードについて力学的観点より論じた。球形タンクの支持構造模型の静的加力実験および数値解析シミュレーションを実施し、球形タンクの支持構造の詳細な破壊モードと破壊が生じる応力状態を解明した。

球形タンクの支持構造のうち 2 本の支柱と 1 組のブレースからなる構面の模型を用いて静的加力実験を行い、補強が無い場合のブレース交差部分の破壊と補強した場合のブレースと支柱の接合部分での破壊について、発生応力と発生ひずみをもとに詳細に破壊モードの検証を行った。補強が無い場合には、ブレース交差部分の中央に局部的に大きなひずみが発生し、この局部ひずみが地震によって慣性力が繰り返し作用することにより増大していき塑性崩壊して破壊が生じ、補強した場合には、ブレースが間軸方向に作用する圧縮力によって構面の面外方向に座屈し、ブレースの座屈に伴い、ブレースの接合端部である支柱との接合部分で破壊したと推定した。

第6章では、将来発生が危惧されている大規模地震に対して、地震動推定と耐震性能評価により球形タンクの被害想定を行い、現在の耐震設計基準における課題を示し、望ましい耐震設計手法を提案し、耐震設計のあり方を示した。

球形タンクが今後想定されている大規模地震に対して適切な耐震性能を有しているかについて検討するため、想定地震動を推定し、動的解析を用いた裕度評価を行った。その結果に基づき、球形タンクのあるべき耐震設計基準について論じた。また、合理的な設計手法の一つとして、動的設計手法を提案した。想定地震動の最大値表面加速度の推定結果は設計加速度を上回った。地震の影響は最大加速度だけでは議論できないものの設計を上回る想定となる可能性があることを示した。3次元静的FEM解析で得られた荷重変位関係から1質点系動的解析モデルを構築し、想定地震動を用いた非線形時刻歴解析を実施し裕度評価を行った結果、設置地点によっては損傷の可能性のあることを示した。そこで、想定地震動への対応策として、現行耐震設計基準の課題を示し、望ましい耐震設計手法として、設備の設置地点のサイト特性を考慮した地震動に対し、構造物の破壊モードを考慮した限界状態を定め、動的手法を用いた地震応答解析により限界状態に達するか否かを確認する方法を提案した。

第7章では、本研究で得られた結果を総括し、今後の研究課題を明らかにした。

発表論文

本研究に関する論文

学会講演論文等

1. 大野卓志，古屋治，小林信之，小山田賢治，鋼管ブレース式球形貯槽設備の耐震性能に関する研究，Dynamics and Design Conference 2015

【学術雑誌】

(査読のあるもの)

1. 小林英男，大野卓志，佐野尊，小山田賢治，球形貯槽支柱の鋼管ブレース構造の耐震性能に関する研究，日本機械学会論文集（A編）Vol.79，No.804，pp.1329-1339，2013.
2. 大野卓志，小山田賢治，既存設備の耐震補強方法とその課題，高圧ガス，Vol.52，No.7，pp.14-20，2015.

3. 大野卓志, 小林信之, 小山田賢治, 鋼管ブレース式球形貯槽設備の耐震性能, 日本機械学会論文集 Vol. 82, No. 833, DOI : 10.1299/transjsme.15-00313, 2016.
4. 大野卓志, 小林信之, 古屋治, 小山田賢治, 球形貯槽設備の模型振動実験による耐震性能評価, 日本機械学会論文集, Vol.82, No.833, DOI : 10.1299/transjsme.15-00486, 2016.
5. 大野卓志, 小林信之, 古屋治, 小山田賢治, 静的加力実験による球形タンク支持構造の耐震性能評価, 圧力技術 Vol.54, No.6, pp.266-276, 2016.

【国際会議議事録】

(査読のあるもの)

1. Takashi OHNO, Nobuyuki KOBAYASHI, Kenji OYMADA, Seismic Resistance Capacity On Pipe Braced Supporting Frame Of Spherical Tank, 2015 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, Proceeding number: PVP 2015-45207, 2015.

(査読の無いもの)

1. Takashi OHNO, Nobuyuki KOBAYASHI, Kenji OYAMADA, Seismic Resistance Capacity on Pipe Braced Supporting Frame of Spherical Tank, Natural and Technological Risk Reduction at Large Industrial Parks (NATECH2016), 2016.

【総説, 解説, 著書】

1. 大野卓志, 小山田賢治, 高圧ガス設備の耐震評価・既存設備の耐震補強方法, 配管技術, Vol.58, No.4, pp.13-18, 2016.

その他の公表論文

【学術雑誌】

(査読のあるもの)

1. Kenji OYAMADA, Shinji KONOSU, Hikaru MIYATA, Takashi OHNO, Proposal of acceptance criterion for plastic collapse assessment rule on local metal loss, Strength, Fracture and Complexity, Vol.6, IOS Press, pp.115-127, 2010.

2. Kenji OYAMADA, Shinji KONOSU, Takashi OHNO, Proposal of reference stress for a surface flaw on a cylindrical component from a review-with-comparison of the local metal loss assessment rule between API 579-1 and the p-M diagram method, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol.88, pp.507-517, 2011.
3. Kenji OYAMADA, Shinji KONOSU, Takashi OHNO, Development of A Plastic Collapse Assessment Procedure in the p-M Diagram Method for Pipe Bends with a Local Thin Area under Combined Internal Pressure and External In-plane Bending Moment, Nuclear Engineering and Design, Vol.247, pp.42-57, 2012.

【国際会議議事録】

(査読のあるもの)

1. Kenji OYAMADA, Shinji KONOSU, Takashi OHNO, Discussion on a comparative study among FFS rules, 2009 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, Proceeding number: PVP 2009-77606, 2009.
2. Kenji OYAMADA, Shinji KONOSU, Hikaru MIYATA, Takashi OHNO, Discussion on plastic collapse criterion at high temperatures in FFS assessment rules, 2010 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, Proceeding number: PVP 2010-25500, 2010.
3. Kenji OYAMADA, Shinji KONOSU, Takashi OHNO, Plastic collapse assessment procedure in P-M diagram method for pipe bends with a local thin area under combined pressure and out-of-plane bending moment, ASME 2012 Pressure Vessels & Piping Division Conference, Proceeding number: PVP 2012-78207, 2012.
4. Kenji OYAMADA, Shinji KONOSU, Tetsuji MIYASHITA, Takashi OHNO, Hideyuki SUZUKI, Validity Of Procedure For Plastic Collapse Assessment Of A Local Thin Area Near Vessel And Nozzle Intersections Subjected To Internal Pressure And External Loadings, 2015 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, Proceeding number: PVP 2015-45512, 2015.

審査の結果の要旨

本論文では、高圧ガスを貯蔵する球形タンクの大規模地震への対策のために行った、球形タンクの耐震性能に関する研究成果を述べている。東日本大震災において高圧ガスを貯蔵する球形タンクが倒壊し、火災爆発事故が発生した。倒壊した球形タンクは、その支持構造を構成する鋼管製のブレース（以下、ブレースと呼ぶ）が破断したことにより、水平剛性を失い、水平方向の地震慣性力に支柱が耐えられず倒壊に至った。高圧ガスを貯蔵する圧力容器は、高圧の状態で可燃性や毒性のガスを貯蔵しており、可燃性ガスの漏洩による火災、爆発の危険性や毒性ガスの漏洩に伴う人的及び環境被害、圧力開放に伴う爆風圧や金属片の飛散等の危険性が非常に高く、厳しい安全性が要求される。そのひとつとして、地震に対する安全性である耐震性能が求められており、地震国である我が国において耐震設計は非常に重要である。耐震設計は、外力が自然現象である地震であることから、耐圧設計の使用圧力等とは異なり、外力の上限を設計者や使用者が任意に設定できるものではない。そのため、どのような地震を想定し、どのような状態を限界の状態として設計するかということが非常に重要である。そのための設計手法として、想定地震動の推定方法や、限界状態の決定方法、限界状態に達するか否かの判定方法が必要である。本論文では、球形タンクの地震被害防止と耐震性能の向上を目的とし、球形タンクの耐震性能の評価を行い、球形タンクの耐震性能評価方法や耐震性能向上のための補強方法及び設計手法を提案している。

上記の研究成果をまとめた本論文の構成は、以下のとおりとなっている。

第1章では、過去から現在までの耐震設計の歴史と変遷、過去の地震被害と対策および現在必要とされる大規模地震対策について記述し、本研究の位置づけと必要性を述べ、本論文の目的を示している。

第2章では、2011年の東北地方太平洋沖地震で被害を受けた高圧ガスの球形タンクの事故について、事故事例から原因究明を行い、有限要素法による数値シミュレーション（以下、FEM解析という）を用いて事故原因の検証を行っている。

FEM解析の結果から、球形タンクの倒壊原因は、鋼管ブレースの交差部分において過大な応力が発生し、ブレースが破壊したことによるものであることを明らかにし、ブレース交差部分の評価方法として強度評価式を提案している。なお、ブレース交差

部分の評価は当該球形タンク建設時の耐震設計基準に規定されていなかった。また、球形タンクの地震被害の対策と指針として、既設の球形タンクに対して提案した評価方法によってブレース交差部分の評価を行い、強度が不十分な場合には、ブレース交差部分の適切な補強方法により補強する必要があることを示している。

第3章では、球形タンクの耐震性能の向上のためのブレース交差部分の補強方法の提案と補強方法の有効性の検証をFEM解析により行っている。

FEM解析は、ブレース交差部分を補強した球形タンクの3次元解析モデルを用いて静的な弾性および弾塑性解析を行っている。弾性FEM解析において、ブレース交差部分の発生応力の低減が確認できた補強方法を有効な補強方法として選定している。選定した補強方法でブレース交差部分を補強した球形タンクについて弾塑性FEM解析を行い、塑性ひずみ分布と限界耐力を評価し、補強の有効性の検証を行っている。FEM解析の結果から、応力とひずみの低減効果と支持構造の限界耐力が上昇するブレース交差部分の補強方法を有効な補強方法として提案している。

第4章では、球形タンクの補強による耐震性能の向上と地震応答特性の変化について模型振動実験により検討を行っている。

振動実験において、球形タンクの補強の有無に伴う固有周期の変化、塑性変形に伴う応答の変化、限界加速度を評価し、球形タンクの地震応答解析モデルとブレース補強の効果について実証している。小型の球形タンク模型の補強がないものとあるものに対して、実地震波や設計基準で用いる加速度応答スペクトルに適合するように作成した模擬地震波を用いて振動台上で加振し、球形タンクの地震応答特性と破壊モードについて、補強の有無の違いについて評価を実施している。提案した補強方法により球形タンクの支持構造を補強した場合、補強による巨視的な地震応答特性は補強しない場合とそれほど変わらないものの耐震性能は向上するという結果を得ている。破壊モードは、補強が無い場合は、倒壊した球形タンクと同様にブレース交差部分の破壊であり、補強した場合には、ブレースと支柱の接合部分で破壊であることを示している。

第5章では、球形タンク支持構造の破壊モードについて、力学的観点より論じるために、球形タンクの支持構造模型の静的加力実験およびFEM解析を実施し、球形タ

ンクの支持構造の詳細な破壊モードと破壊が生じる応力状態を解明している。

球形タンクの支持構造のうち2本の支柱と1組のブレースからなる構面の模型を用いて静的加力実験を行い、補強が無い場合のブレース交差部分の破壊と補強した場合のブレースと支柱の接合部分での破壊について、発生応力と発生ひずみをもとに詳細に破壊モードの検証を行っている。補強が無い場合には、ブレース交差部分の中央に局所的に大きなひずみが発生し、地震により生じる慣性力の繰返しに伴い、この局部ひずみは増大して塑性崩壊し、ブレース交差部分で破壊が生じることを明らかにしている。補強した場合には、ブレースが鋼管軸方向に作用する圧縮力によって構面の面外方向に座屈し、ブレースの座屈に伴い、ブレースの接合端部である支柱との接合部分で破壊が生じることを明らかにしている。

第6章では、将来発生が危惧されている大規模地震に対して、地震動推定と耐震性能評価により球形タンクの被害想定を行い、現在の耐震設計基準における課題を示し、望ましい耐震設計手法を提案し、耐震設計のあり方を示している。

球形タンクが今後想定されている大規模地震に対して適切な耐震性能を有しているかについて検討するため、想定地震動を推定し、動的解析を用いた裕度評価を行っている。想定地震動の最大値表面加速度の推定結果は設計加速度を上回るという結果が示されている。3次元静的FEM解析で得られた荷重変位関係から1質点系動的解析モデルを構築し、想定地震動を用いた非線形時刻歴解析により裕度評価を行った結果、設置地点によっては損傷の可能性があるという結果が示されている。これらの結果に基づき、想定地震動への対応策として、現行耐震設計基準の課題を示し、球形タンクのあるべき耐震設計基準について論じている。また、耐震裕度評価に用いた動的評価法を設計に用いることで、大規模地震に対して合理的に設計が可能であることを述べ、設備の設置地点のサイト特性を考慮した地震動に対し、球形タンクの破壊モードを考慮した限界状態を定め、動的手法を用いた地震応答解析により限界状態に達するか否かを確認する方法を望ましい耐震設計手法として提案している。

第7章では、本研究で得られた結果を総括し、今後の研究課題を明らかにしている。

これらの研究成果は、日本機械学会、日本高圧力技術協会などの論文として掲載され、高い評価を受けている。また、本研究で提案したブレース交差部分の強度評価式

や補強方法は、球形タンクの耐震設計基準である高圧ガス設備等耐震設計基準に採用され、基準改正がなされている。

以上のように、本研究は球形タンクの耐震性能の評価を行ったものであり、地震国であるわが国の工学、特に耐震設計技術と将来発生が危惧される大規模地震の対策に大きく寄与している。従って博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。