



有限要素解析による管フランジ締結体の締付けおよび力学的特性の評価に関する研究

高木, 知弘

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2003-03-31

(Date of Publication)

2007-08-09

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙0003

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/DS200003>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



平成14年度学位(博士)授与に係る論文の公表

氏名	高木知弘
学位名称	博士(工学)
推薦教官名	福岡俊道教授
論文題目	有限要素解析による管フランジ締結体の締付けおよび力学的特性の評価に関する研究

論文要旨

管フランジは管、管継手、バルブ等の取り外しを必要とする部分等の相互の結合に用いられるもっとも重要な配管要素の一つである。管フランジはガスケットを間に介して複数本のボルトで締付けられ、このような構造物は管フランジ締結体と呼ばれている。ガスケットは、その厚さ方向の剛性がフランジやボルトに比べて極端に低いため、管フランジ締結体の力学的特性はガスケットに大きく影響される。さらに、そのようなガスケットの応力・ひずみ関係は非常に強い非線形挙動を示し、管フランジ締結体の力学的特性の評価を困難にしている。このため、明確な設計手法は未だ確立されたとはいえない。さらに、今日の環境規制の強化により、個々の管フランジ締結体からの漏洩量を許容値以下に抑える設計手法の確立が望まれている。

仮に上記の点を考慮した管フランジ締結体の設計手法が確立されたとしても、その施工時、つまり管フランジを多数のボルトで締付ける際に、設計条件を満足する均一なボルト軸力状態を達成することは非常に困難である。これは、管フランジ締結体は隣り合う2本のボルト間の距離が小さく、各ボルトの締付けが相互に影響をおよぼし合うためである。この現象を弾性相互作用といい、管フランジ締結体では非常に重要な特性である。

以上のような点を考慮すると、管フランジ締結体の明確な設計手法、さらには施工時に生じるボルト軸力のばらつき等を考慮した設計手法、設計のコンセプトを満足するような施工手順を確立することは工業上極めて重要である。そのためには、まず管フランジ締結体の締付け特性や力学的特性を評価できる解析ツールを作成することが必要である。

本研究では、管フランジ締結体のボルト締付け過程および内圧や曲げモーメントなどの外力が負荷する過程をシミュレーションすることのできる有限要素解析手法を提案し、その手法を用いて管フランジ締結体の締付け特性と力学的特性を体系的に評価することを目的としている。

まず、管フランジ締結体のボルトの締付け方法としてもっとも広く用いられているトルク法の特性評価を行う。特に、締付けトルク開放直後にボルト軸力とねじ部トルクが低下する現象に着目し、ボルト軸力、各トルクおよび各接触面の摩擦係数を連続的に測定することにより、そのメカニズムを明らかにする。また、これらの現象を三次元弾性接触問題として有限要素法により解析する手法を提案している。

トルク法を採用する場合、ボルトは引張り荷重とねじり荷重を同時に受けるが、この時ねじの谷底の応力集中は非常に高くなり、局部的に降伏が生じている。そこで、ボルト締付け過程の力学的特性を、弾塑性接触問題として有限要素法により評価する。締付けにおけるねじ谷底の塑性域の広がり、ねじ山荷重分担率の変化を明らかにし、ボルト軸力と伸びあるいはナット回転角の関係について考察する。さらに、有限要素解析手法の塑性域締付け法への適用性について検討する。

管フランジ締結体の特性評価に関する研究の第1段階として、金属平形ガスケットを用いた場合を対象とし、複雑な形状を有する管フランジ締結体のモデリング方法を工夫した三次元有限要素解析手法を提案する。そしてこの手法を用いることにより、管フランジの形状および寸法が管フランジ締結体の締付けおよび内圧や曲げモーメントの負荷特性におよぼす影響を検討する。

つぎに、複雑な挙動を示すガスケットを用いた管フランジ締結体の特性評価を行う。まず、ガスケットの圧

縮試験を行い、複雑な応力・ひずみ関係の同定方法を提案する。この同定された式を用いて、ガスケットを非線形一次元要素として導入する三次元有限要素解析手法を提案する。ガスケットの材料特性および接触状態の記述により生じる非線形性は、増分法により線形化して取り扱っている。この解析手法を用いることにより、管フランジ締結体のボルト1本ずつの締付け、内圧負荷、曲げモーメント負荷の各過程を連続して評価することができる。ボルト締付けに関しては、体系的なボルト締付けシミュレーションを行い、管フランジ締結体のボルト締付け指針作成のための基礎研究を行っている。また、少ない締付け作業で一様なボルト軸力状態を達成することのできる、効率のよい締付け手順を提案している。さらに、メンテナンスを目的として管フランジ締結体を開放する際の、ボルトの抜き取り過程に本手法を適用する。管フランジ締結体の力学的な特性評価としては、内圧と曲げモーメントが作用する際のガスケット座面圧分布変化、ボルト軸力の変化、そしてボルト軸力にばらつきがある時の評価を行っている。提案した解析手法の妥当性は、ボルトの締付け実験および内圧や曲げモーメントの負荷実験を行い、ひずみゲージを用いてボルト軸力の変化を測定することにより検討を行っている。

審査概要

管フランジ締結体は、我々の生活基盤を支える様々なパイプラインを構成する重要な構造物である。管フランジに課せられた使命は、内部流体を漏洩させないという一点につきるが、不適切な設計や組み立て施工、あるいは阪神淡路大震災の際のガス漏れ事故に見られたように、予期できないような大きな外力が作用することによってシール性能が低下し、大惨事に至ることがある。このような漏れ事故を防ぐためには、管フランジ部分が適切なボルト軸力により締結されることが肝要である。しかしながら、管フランジを締結するボルトの締め付け力については明確な指針が確立されていない。さらに、管フランジは多数のボルトで締め付けられており、通常の組み立て作業では各ボルトを逐次締め付けるために、組み立て完了時において各ボルトの軸力が大きくばらつくことが知られている。このように、管フランジ締結体の性能を左右する締め付けボルトの軸力のばらつきおよび締結体としての強度を体系的に評価し、シール性能の向上につながる締め付け指針を確立することは急務である。

本研究では、まず第一部において単一ボルトで締め付けられた締結体の強度を明らかにしている。最初に、ボルト締め付けに広く使用されるトルク法について、従来明らかにされていなかった締め付け過程の力学的特性を解明している。とくにトルク、軸力および摩擦係数が時間とともにどのように変化するか明らかにした点は特筆に値する。一方、ボルトの締め付け力は締結部の小型軽量化を目的として増加傾向にある。その際問題となるボルトの弾塑性挙動について、本来三次元問題として解析すべき現象を、有限要素法の定式化を工夫することによって、二次元問題に準じて解析できる手法を提案している。その手法を用いて、トルク法で締め付けた場合の塑性域の進展等、ボルト締結体の弾塑性挙動を体系的に明らかにしている。

第二部では、内部流体の圧力が比較的高い場合に使用される金属ガスケットを用いた管フランジ締結体の力学的特性を解析している。そこでは、任意の順序でボルトを締め付けた場合に発生する軸力のばらつき、および最終的なボルト軸力を一様にするのできる締め付け手順を、三次元有限要素法を用いて求める手法を提案している。さらに、内圧あるいは曲げモーメントなどの外力を受けた場合の管フランジ締結体の力学的特性を体系的に明らかにしている。

第三部では、金属ガスケットに比べて使用頻度の高いうず巻き形ガスケット、ジョイントシートガスケットを用いた管フランジ締結体の締め付け特性と外力を受けた場合の挙動を明らかにしている。これらのガスケットは非常に強い非線形挙動を示すが、ここではガスケットを一次元非線形ばねを用いてモデル化することによって、高い精度の解析を実現している。さらに、あらゆるサイズの管フランジの締め付け過程を高い精度でシミュレーションできる“弾性相互作用係数法”を提案している。また管フランジの開放作業に着目して、その過程で発生する残留ボルトの過大な軸力を推定する手法を提案し、その結果を用いて管フランジ有効な開放手順を示している。

以上のように、本研究は管フランジの締め付け過程の評価と最適な締め付け手順の提案、および力学的特性評価に関して大きな進歩をもたらしたものと考えられる。これらの研究成果は、以下に示す専門学術雑誌に11編の有審査論文（うち5編は第1著者）として発表されている。また、本論文に関連した国際会議における発表は8回である。

最終試験は2月12日に実施され、本研究を実施する上で必要な材料力学における接触問題の解析方法、非線形構成式の扱い方、三次元有限要素法に関する数値解析技法等に関して質疑応答があり、十分な学力を有すると判断された。

以上により、本論文は博士論文として十分価値があるものと判断された。

- 1) Fukuoka, T. and Takaki, T.: Mechanical Behaviors of Bolted Joint during Tightening Using Torque Control, JSME International Journal Series A, Vol.41 (1998-4), No.2, pp.185-191
- 2) 福岡俊道、高木知弘：管フランジの三次元有限要素解析（座面形状の影響について）、日本機械学会論文集A編、第64巻、第625号（1998-9）、pp.2402-2407
- 3) 福岡俊道、高木知弘：三次元有限要素解析による管フランジのボルト締付け順序の評価、日本機械学会論文集A編、第64巻、第627号（1998-11）、pp.2734-2740
- 4) 福岡俊道、高木知弘：管フランジ締結体の三次元有限要素解析（金属平形ガスケットの影響）、日本機械学会論文集A編、第66巻、第644号（2000-4）、pp.651-657
- 5) 福岡俊道、高木知弘：有限要素解析による管フランジ締結体のボルト締付け過程の評価（うず巻形ガスケットを用いた場合）、日本機械学会論文集A編、第66巻、第650号（2000-10）、pp.1834-1840
- 6) Fukuoka, T. and Takaki, T.: Finite Element Simulation of Bolt-Up Process of Pipe Flange Connections, ASME Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.123 (2001-8)、pp.282-287
- 7) 高木知弘、福岡俊道：ボルト締付け過程の弾塑性有限要素解析、日本機械学会論文集A編、第67巻、第660号（2001-8）、pp.1269-1275
- 8) 高木知弘、福岡俊道：管フランジ締結体の三次元有限要素解析（石綿ジョイントシートガスケットを用いた場合）、日本機械学会論文集A編、第68巻、第665号（2002-1）、pp.8-14
- 9) 高木知弘、福岡俊道：管フランジ締結体の効率的なボルト締付け手順（有限要素解析と弾性相互作用係数法による検討）、日本機械学会論文集A編、第68巻、第668号（2002-4）、pp.550-557
- 10) 高木知弘、福岡俊道：管フランジ締結体のボルト抜き取り過程の有限要素解析、日本機械学会論文集A編、第68巻、第675号（2002-11）、pp.1622-1627
- 11) Takaki, T. and Fukuoka, T.: Systematical FE Analysis of Bolt Assembly Process of Pipe Flange Connections, ASME Pressure Vessels and Piping Conference, ASME PVP-Vol. 433 (2002-8)、pp.147-152