

本資料のうち、枠囲みの内容は、営業秘密又は防護上の観点から公開できません。

| | |
|------------------|------------|
| 東海第二発電所 工事計画審査資料 | |
| 資料番号 | 工認-386 改8 |
| 提出年月日 | 平成30年10月2日 |

V-5-5 計算機プログラム（解析コード）の概要・ABAQUS

目次

| | | |
|-----|--|----|
| 1. | はじめに | 1 |
| 1.1 | 使用状況一覧 | 2 |
| 2. | 解析コードの概要 | 3 |
| 2.1 | ABAQUS Ver. 6.14-3 | 3 |
| 2.2 | ABAQUS Ver. 6.12-1 | 4 |
| 2.3 | ABAQUS Ver. 6.11-2 | 5 |
| 2.4 | ABAQUS Ver. 6.11-1, Ver6.4-1 | 6 |
| 2.5 | ABAQUS Ver. 6.5-4 | 7 |
| 2.6 | ABAQUS Ver. 6.4-4 | 9 |
| 3. | ABAQUS Ver. 6.12-1の解析手法について | 10 |
| 3.1 | 一般事項 | 10 |
| 3.2 | 解析コードの特徴 | 10 |
| 3.3 | 解析手法 | 11 |
| 3.4 | 解析フローチャート | 12 |
| 3.5 | 検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation) | 13 |

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）ABAQUSについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

| 使用添付書類 | | バージョン |
|---------------|---------------------------------------|--------------|
| V-2-4-2-3-1-1 | キャスク容器の耐震性についての計算書 | Ver. 6. 14-3 |
| V-2-4-2-3-1-2 | バスケットの耐震性についての計算書 | Ver. 6. 14-3 |
| V-2-4-2-3-2-1 | キャスク容器の耐震性についての計算書 | Ver. 6. 14-3 |
| V-2-6-7-6 | 統合原子力防災ネットワーク設備衛星アンテナの耐震性についての計算書 | Ver. 6. 12-1 |
| V-1-8-1 | 原子炉格納施設の設計条件に関する説明書 | Ver. 6. 11-2 |
| V-1-8-1 | 原子炉格納施設の設計条件に関する説明書 | Ver. 6. 11-1 |
| V-2-3-4-3-3 | 気水分離器及びスタンドパイプの耐震性についての計算書 | Ver. 6. 11-1 |
| V-2-4-2-3-3-1 | キャスク容器の耐震性についての計算書 | Ver. 6. 11-1 |
| V-2-10-1-2-2 | 非常用ディーゼル発電機空気だめの耐震性についての計算書 | Ver. 6. 5-4 |
| V-2-10-1-2-3 | 非常用ディーゼル発電機燃料油デイトンクの耐震性についての計算書 | Ver. 6. 5-4 |
| V-2-10-1-3-2 | 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機空気だめの耐震性についての計算書 | Ver. 6. 5-4 |
| V-2-10-1-3-3 | 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機燃料油デイトンクの耐震性についての計算書 | Ver. 6. 5-4 |
| V-2-11-2-2 | 原子炉建屋クレーンの耐震性についての計算書 | Ver. 6. 5-4 |
| V-2-別添 3-4 | 可搬型重大事故等対処設備のうちボンベ設備の耐震性についての計算書 | Ver. 6. 5-4 |
| V-2-3-4-3-4 | シュラウドヘッドの耐震性についての計算書 | Ver. 6. 4-4 |
| V-2-4-2-3-1-1 | キャスク容器の耐震性についての計算書 | Ver. 6. 4-4 |
| V-2-4-2-3-1-5 | 二次蓋の耐震性についての計算書 | Ver. 6. 4-4 |
| V-2-4-2-3-2-1 | キャスク容器の耐震性についての計算書 | Ver. 6. 4-4 |
| V-2-4-2-3-2-5 | 二次蓋の耐震性についての計算書 | Ver. 6. 4-4 |
| V-3-別添 2-2-1 | 防護対策施設の強度計算書 | Ver. 6. 4-4 |
| V-2-4-2-3-3-1 | キャスク容器の耐震性についての計算書 | Ver. 6. 4-1 |

2 解析コードの概要

2.1 ABAQUS Ver. 6.14-3

| | |
|---|---|
| 項目 \ コード名 | ABAQUS |
| 使用目的 | 2次元有限要素法（軸対称モデル）による温度分布計算 |
| 開発機関 | ダッソー・システムズ株式会社 |
| 開発時期 | 1978年 (Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc) 2005年 (ダッソー・システムズ株式会社) |
| 使用したバージョン | Ver. 6.14-3 |
| コードの概要 | <p>ABAQUS（以下「本解析コード」という。）は、米国Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc (HKS社) で開発され、ダッソー・システムズ社に引き継がれた有限要素法に基づく構造解析用の汎用計算機プログラムである。</p> <p>適用モデルは1次元～3次元の任意形状の構造要素、連続体要素について取り扱うことが可能であり、静的応力解析、動的応力解析、熱応力解析、伝熱解析、座屈解析等の機能を有している。特に非線形解析が容易に行えることが特徴であり、境界条件として、熱流速、温度、加速度等を取り扱うことができる。</p> <p>数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木などの様々な分野で利用されている実績を持つ。</p> |
| 検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation) | <p>【検証 (Verification)】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードを用いた解析結果と理論モデルによる理論解の比較を行い、解析解が理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、数多くの研究機関や企業において、様々な分野の構造解析に広く利用されていることを確認している。 ・本解析コードは、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木などの様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 ・使用する解析モデルは、既工事計画及び耐震評価にて実績のある関連規格及び文献を基に作成した評価モデルを採用していることを確認している。 ・今回の工事計画認可申請における構造に対し使用する要素、解析については、既工事計画で使用された実績がある。 |

2.2 ABAQUS Ver. 6.12-1

| | |
|---|---|
| 項目 | コード名 ABAQUS |
| 使用目的 | 3次元有限要素法（はり要素，シェル要素及びソリッド要素）による固有値解析 |
| 開発機関 | ダッソー・システムズ株式会社 |
| 開発時期 | 1978年（Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc） 2005年（ダッソー・システムズ株式会社） |
| 使用したバージョン | Ver. 6.12-1 |
| コードの概要 | <p>ABAQUS（以下「本解析コード」という。）は，米国Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc（HKS社）で開発され，ダッソー・システムズ社に引き継がれた有限要素法に基づく構造解析用の汎用計算機プログラムである。</p> <p>適用モデルは1次元～3次元の任意形状の構造要素，連続体要素について取り扱うことが可能であり，静的応力解析，動的応力解析，熱応力解析，伝熱解析，座屈解析等の機能を有している。特に非線形解析が容易に行えることが特徴であり，境界条件として，熱流速，温度，加速度等を取り扱うことができる。</p> <p>数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木などの様々な分野で利用されている実績を持つ。</p> |
| 検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation) | <p>【検証 (Verification)】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・片持ちはりの自由振動問題を対象に，はり要素モデル及びソリッド要素モデルの解析結果が，理論解と一致することを確認している。 ・球殻の自由振動問題を対象に，シェル要素モデルの解析結果が，理論解と一致することを確認している。 ・ばね－質量系の振動問題を対象に，一質点の集中質量モデルの解析結果が，理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは，数多くの研究機関や企業において，様々な分野の構造解析に広く利用されていることを確認している。 ・本解析コードは，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木などの様々な分野における使用実績を有しており，妥当性は十分に確認されている。 ・今回の工事計画認可申請における構造に対し使用する要素のうち，はり要素及びシェル要素については既工事計画で使用された実績がある。 |

2.3 ABAQUS Ver. 6.11-2

| | |
|---|---|
| 項目 | コード名 ABAQUS |
| 使用目的 | 2次元有限要素法（軸対称モデル）による温度分布計算 3次元有限要素法（ソリッド要素）による弾塑性解析 |
| 開発機関 | ダッソー・システムズ株式会社 |
| 開発時期 | 1978年（Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc） 2005年（ダッソー・システムズ株式会社） |
| 使用したバージョン | Ver. 6.11-2 |
| コードの概要 | <p>ABAQUS（以下「本解析コード」という。）は、米国Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc（HKS社）で開発され、ダッソー・システムズ社に引き継がれた有限要素法に基づく構造解析用の汎用計算機プログラムである。</p> <p>適用モデルは1次元～3次元の任意形状の構造要素、連続体要素について取り扱うことが可能であり、静的応力解析、動的応力解析、熱応力解析、伝熱解析、座屈解析等の機能を有している。特に非線形解析が容易に行えることが特徴であり、境界条件として、熱流速、温度、加速度等を取り扱うことができる。</p> <p>数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木などの様々な分野で利用されている実績を持つ。</p> |
| 検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation) | <p>【検証 (Verification)】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・今回使用する適用モデル（ソリッドモデル及び軸対称モデル）について、解析結果が理論モデルによる理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木などの様々な分野における使用実績を持ち、妥当性は十分に確認されている。 ・今回の工事計画認可申請における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。 ・開発機関が提示するマニュアルにより、今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法（ソリッドモデル）による応力解析及び2次元有限要素法（軸対称モデル）による温度分布解析に、本解析コードが適用できることを確認している。 |

2.4 ABAQUS Ver. 6.11-1, Ver. 6.4-1

| | | |
|---|-------------|--|
| 項目 | | コード名 ABAQUS |
| 使用目的 | Ver. 6.11-1 | 2次元有限要素法（軸対称モデル）による温度分布計算 3次元有限要素法（ソリッド要素）による弾塑性解析 3次元有限要素法（ソリッド, シェル及びはりモデル）による応力解析 |
| | Ver. 6.4-1 | 2次元有限要素法（軸対称モデル）による温度分布計算 |
| 開発機関 | | ダッソー・システムズ株式会社 (Ver. 6.11-1) Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc (Ver. 6.4-1) |
| 開発時期 | | 1978年 (Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc) 2005年 (ダッソー・システムズ株式会社) |
| 使用したバージョン | | Ver. 6.11-1, Ver. 6.4-1 |
| コードの概要 | | <p>ABAQUS（以下「本解析コード」という。）は、米国Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc (HKS社) で開発され、ダッソー・システムズ社に引き継がれた有限要素法に基づく構造解析用の汎用計算機プログラムである。</p> <p>適用モデルは1次元～3次元の任意形状の構造要素、連続体要素について取り扱うことが可能であり、静的応力解析、動的応力解析、熱応力解析、伝熱解析、座屈解析等の機能を有している。特に非線形解析が容易に行えることが特徴であり、境界条件として、熱流速、温度、加速度等を取り扱うことができる。</p> <p>数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木などの様々な分野で利用されている実績を持つ。</p> |
| 検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation) | | <p>【検証 (Verification)】</p> <ul style="list-style-type: none"> 本解析コードを用いた解析結果と理論モデルによる理論解の比較を行い、解析解が理論解と一致することを確認している。 本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <ul style="list-style-type: none"> 本解析コードは数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木などの様々な分野における使用実績を持ち、妥当性は十分に確認されている。 今回の工事計画認可申請における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。 開発機関が提示するマニュアルにより、今回の工事計画認可申請で使用される3次元有限要素法（ソリッド要素）による弾塑性解析、3次元有限要素法（ソリッド, シェル及びはりモデル）による応力解析及び2次元有限要素法（軸対称モデル）による温度分布解析に、本解析コードが適用できることを確認している。 |

2.5 ABAQUS Ver. 6.5-4

| | |
|---|---|
| 項目 | コード名 ABAQUS |
| 使用目的 | 3次元有限要素法（シェル要素）による応力解析 はりモデルによる固有値解析及び地震応答解析 3次元有限要素法（シェル要素，はり要素）による固有値解析 |
| 開発機関 | Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc |
| 開発時期 | 1978年 |
| 使用したバージョン | Ver. 6.5-4 |
| コードの概要 | <p>ABAQUS（以下「本解析コード」という。）は，米国Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc（HKS社）で開発された有限要素法に基づく構造解析用の汎用計算機プログラムである。</p> <p>適用モデルは1次元～3次元の任意形状の構造要素，連続体要素について取り扱うことが可能であり，静的応力解析，動的応力解析，熱応力解析，伝熱解析，座屈解析等の機能を有している。特に非線形解析が容易に行えることが特徴であり，境界条件として，熱流速，温度，加速度等を取り扱うことができる。</p> <p>数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木などの様々な分野で利用されている実績を持つ。</p> |
| 検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation) | <p>【検証 (Verification)】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードによる地震応答計算結果と振動試験結果を比較して，検証*が実施され，本解析コードが検証されたものであることを確認した。 <p>注記*：独立行政法人 原子力安全基盤機構「平成19年度 原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査」 動的上下動耐震試験（クレーン類）に係る報告書</p> <ul style="list-style-type: none"> ・今回使用する適用要素（シェル要素及びはり要素）について，解析結果が理論モデルによる理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 |

| | |
|--|---|
| <p>検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p> | <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、数多くの研究機関や企業において、様々な分野の構造解析に広く利用されていることを確認している。 ・本解析コードは、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木などの様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 ・使用する解析モデルは、既工事計画及び耐震評価にて実績のある関連規格及び文献を基に作成した評価モデルを採用していることを確認している。 ・開発機関が提示するマニュアルにより、今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法（シェル要素）による応力解析、はりモデルによる固有値解析及び地震応答解析及び3次元有限要素法（シェル要素、はり要素）による固有値解析に、本解析コードが適用できることを確認している。 |
|--|---|

2.6 ABAQUS Ver. 6.4-4

| | |
|---|--|
| 項目 | コード名 ABAQUS |
| 使用目的 | 3次元有限要素法（ソリッドモデル及びシェルモデル）による応力解析 3次元有限要素法（はり要素）による応力解析 2次元有限要素法（軸対称モデル）による応力解析，温度分布解析 |
| 開発機関 | Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc |
| 開発時期 | 1978年 |
| 使用したバージョン | Ver. 6.4-4 |
| コードの概要 | <p>ABAQUS（以下「本解析コード」という。）は，米国Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc（HKS社）で開発された有限要素法に基づく構造解析用の汎用計算機プログラムである。</p> <p>適用モデルは1次元～3次元の任意形状の構造要素，連続体要素について取り扱うことが可能であり，静的応力解析，動的応力解析，熱応力解析，伝熱解析，座屈解析等の機能を有している。特に非線形解析が容易に行えることが特徴であり，境界条件として，熱流速，温度，加速度等を取り扱うことができる。</p> <p>数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木などの様々な分野で利用されている実績を持つ。</p> |
| 検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation) | <p>【検証 (Verification)】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・今回使用する適用モデル（ソリッドモデル，シェルモデル，はり要素及び軸対称モデル）について，解析結果が理論モデルによる理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木などの様々な分野における使用実績を持ち，妥当性は十分に確認されている。 ・開発機関が提示するマニュアルにより，今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法（ソリッドモデル，シェルモデル及びはり要素）による応力解析及び2次元有限要素法（軸対称モデル）による応力解析，温度分布解析に，本解析コードが適用できることを確認している。 ・使用する解析モデルは，既工事計画及び耐震評価にて実績のある関連規格及び文献を基に作成した評価モデルを採用していることを確認している。 |

3. ABAQUS Ver. 6.12-1の解析手法について

3.1 一般事項

ABAQUSは有限要素法による汎用非線形構造計算機プログラムである。材料非線形性、接触問題を含む幾何学的非線形性を考慮した構造物の静的応力変形解析や動的解析、熱伝導解析、音響解析機能等が提供されている。また、各分野特有の連成問題（熱応力、構造一流体連成等）も解析可能である。今回は統合原子力防災ネットワーク設備衛星アンテナに対する固有値の算出に用いている。

3.2 解析コードの特徴

ABAQUSの主な特徴を以下に示す。

- ・非線形構造問題（材料，幾何非線形）に必要な機能が充実している。
- ・数多くの要素，材料構成則が提供されており，多様な構造物のモデル化が可能である。
- ・連成問題が解析可能である。

3.3 解析手法

統合原子力防災ネットワーク設備衛星アンテナに対する固有値解析手法を3.3.1に示す。

3.3.1 動的解析

(1) 固有値解析

次の固有値方程式を解いて，固有振動数と振動モードを求める。

$$K \phi = \omega^2 M \phi$$

ここで，

K：剛性マトリックス

ϕ ：固有ベクトル

ω ：固有振動数

M：質量マトリックス

上記方程式の解法として，ABAQUS Ver. 6.12-1においては，Lanczos法，自動マルチレベル部分構造（AMS）法及びサブスペースイテレーション法が用意されている。

3.4 解析フローチャート

本解析コードを用いた解析フローチャートを図 3-1 に示す。

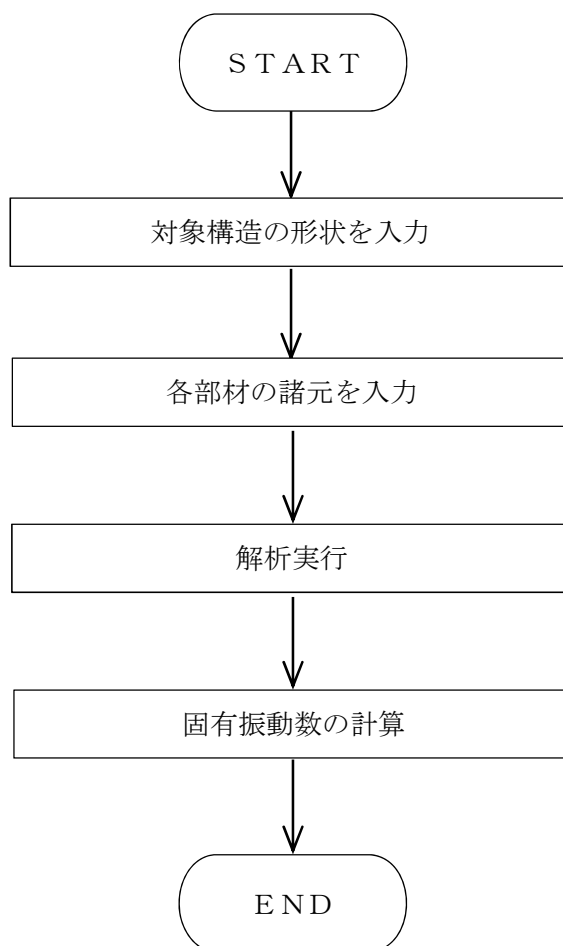


図3-1 解析フローチャート

3.5 検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation)

3.5.1 検証 (Verification)

今回の解析に用いた解析コードABAQUS Ver. 6.12-1の検証として、ABAQUS Ver. 6.12-1による解析結果と理論式による理論解との比較検証を行う。

(1) 解析ケース

表3-1に示す1ケースについて解析を行い、理論解と比較する。

表3-1 検証ケース

| 解析種別 | 内容 | 要素 | 条件 |
|-------|-------------|-----------|------|
| 固有値解析 | 片持ちはりの固有振動数 | 6面体ソリッド要素 | 一様密度 |

(2) 解析条件

ABAQUS Benchmark Manualに記載の片持ちはりの例題を使用する。

図3-2に概念図及び解析条件を、図3-3に解析モデルを示す。


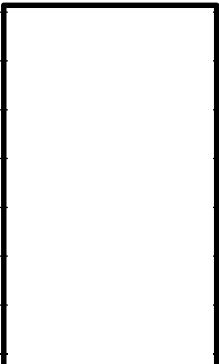
| | | | | |
|--|-----------|--------|---|------------------------------------|
|  <p>概念図</p> | 半径 | r |  | in |
| | 直径 | d | | in |
| | 長さ | L | | in |
| | 縦弾性係数 | E | | lb/in ² |
| | 質量密度 | ρ | | lb-s ² /in ⁴ |
| | 断面積 | A | | in ² |
| | 断面二次モーメント | I | | in ⁴ |

図3-2 概念図及び解析条件

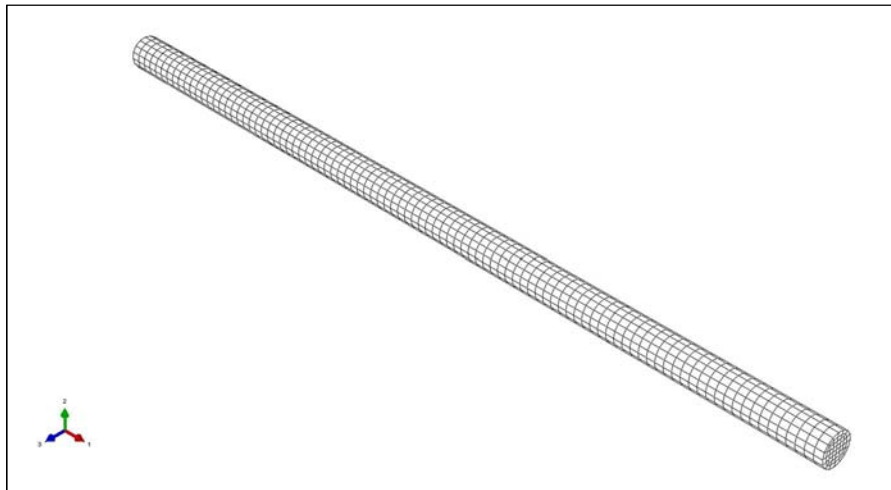


図3-3 解析モデル (使用要素: 6面体ソリッド要素)

(3) 解析結果

a. 解析結果と理論解との比較

表3-2に解析結果と理論解との比較結果を示す。表3-2に示すとおり、解析結果と理論解は一致しており、解析コードABAQUS Ver. 6.12-1が検証されていることを確認した。

表3-2 解析結果と理論解の比較

(単位：Hz)

| 次数 | 理論解* | 解析結果 | 誤差 |
|----|------|------|----|
| 1次 | | | |
| 2次 | | | |
| 3次 | | | |

注記*：理論解は下記の式で計算する。(出典：機械工学便覧)

$$f = \frac{\lambda^2}{2 \cdot \pi \cdot L^2} \sqrt{\frac{E \cdot I}{A \cdot \rho}}$$

| |
|--|
| |
|--|

3.5.2 妥当性確認 (Validation)

本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。

- ・本解析コードは、数多くの研究機関や企業において、様々な分野の構造解析に広く利用されていることを確認している。
- ・本解析コードは、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木などの様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。
- ・今回の工事計画認可申請における構造に対し使用する要素のうち、はり要素及びシェル要素については既工事計画で使用された実績がある。

3.5.3 評価結果

3.5.1 及び 3.5.2 より、本解析コードを使用状況一覧に示す解析に用いることは妥当である。