

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-677 R0  |
| 提出年月日            | 平成30年6月28日 |

V-5-45 計算機プログラム（解析コード）の概要・T D A P III

## 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 |
| 3. TDAPⅢの解析手法について                         | 6 |
| 3.1 一般事項                                  | 6 |
| 3.2 解析コードの特徴                              | 6 |
| 3.3 解析手法                                  | 6 |
| 3.4 解析フローチャート                             | 8 |
| 3.5 検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation) | 9 |

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）TDAPⅢ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-2-2-23-4   | 常設代替高圧電源装置用カルバート（立坑部）の耐震性<br>についての計算書 | Ver. 3.08 |
| V-2-2-27     | 常設低圧代替注水系ポンプ室の耐震性についての計算<br>書         | Ver. 3.08 |
| V-2-2-29     | 代替淡水貯槽の耐震性についての計算書                    | Ver. 3.08 |
| V-2-10-2-2-1 | 防潮堤（鋼製防護壁）の耐震性についての計算書                | Ver. 3.08 |

## 2. 解析コードの概要

|   |   |
|---|---|
| 項目 \ コード名                               | TDAPⅢ   |
| 使用目的                                    | 2次元骨組構造解析   |
| 開発機関                                    | 大成建設株式会社<br>株式会社アーク情報システム   |
| 開発時期                                    | 1994年   |
| 使用したバージョン                               | Ver. 3.08   |
| コードの概要                                  | <p>TDAPⅢは、構造解析の汎用コードであり、土木及び建築分野に特化した要素群及び材料非線形モデルを数多くサポートしていることが特徴で、日本国内では、官公庁、大学及び民間問わず、多くの利用実績がある。</p> <p>静的荷重（節点力、静的震度、強制変形）及び動的荷重（節点加振力、強制変位・速度・加速度、地震動入力）を扱うことができる。</p> <p>線形解析及び非線形解析を時間領域における数値積分により行う。</p>   |
| 検証（Verification）及び<br>妥当性確認（Validation） | <p>TDAPⅢ Ver.3.08は、常設代替高圧電源装置用カルバート（立坑部）の水平方向断面検討のための2次元骨組構造解析に使用している。</p> <p><b>【検証(Verification)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・本解析コードの計算機能が適正であることは、後述する妥当性確認の中で確認している。</li> <li>・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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認(Validation)】</b></p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は、以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・橋梁・橋脚、地盤・構造物連成、地中構造物等をはじめとする多数の解析において本解析コードが使用されており、十分な使用実績があるため、信頼性があると判断できる。</li> <li>・本工事計画において使用するバージョンは、他プラントの既工事計画において使用されているものと異なるが、バージョンの変更において、本解析の使用範囲の結果に影響の無いことを確認している。</li> <li>・本工事計画における構造に対して行う2次元骨組構造解析の使用目的に対し、使用用途及び使用方法に関する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。</li> </ul> |

|   |  |
|---|--|
| 項目  | コード名<br>TDAPⅢ  |
| 使用目的  | 静的応力解析   |
| 開発機関  | 大成建設株式会社<br>株式会社アーク情報システム  |
| 開発時期  | 1994年  |
| 使用したバージョン                                       | Ver. 3.08  |
| コードの概要  | <p>TDAPⅢは、構造解析の汎用コードであり、土木及び建築分野に特化した要素群及び材料非線形モデルを数多くサポートしていることが特徴で、日本国内では、官公庁、大学及び民間問わず、多くの利用実績がある。</p> <p>静的荷重（節点力、静的震度、強制変形）及び動的荷重（節点加振力、強制変位・速度・加速度、地震動入力）を扱うことができる。</p> <p>線形解析及び非線形解析を時間領域における数値積分により行う。</p>  |
| 検証（Verification）<br>及び<br>妥当性確認<br>（Validation） | <p>TDAPⅢ Ver. 3.08は、常設代替高圧電源装置用カルバート（立坑部）、常設低圧代替注水系ポンプ室、代替淡水貯槽の静的応力解析に使用している。</p> <p><b>【検証(Verification)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>本解析コードの計算機能が適正であることは、後述する妥当性確認の中で確認している。</li> <li>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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認(Validation)】</b></p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は、以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>橋梁・橋脚、地盤・構造物連成、地中構造物等をはじめとする多数の解析において本解析コードが使用されており、十分な使用実績があるため、信頼性があると判断できる。</li> <li>本工事計画において使用するバージョンは、他プラントの既工事計画において使用されているものと異なるが、バージョンの変更において、本解析の使用範囲の結果に影響の無いことを確認している。</li> <li>本工事計画における構造に対して行う静的応力解析の使用目的に対し、使用用途及び使用方法に関する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。</li> </ul> |

|   |  |
|---|--|
| 項目                                      | コード名<br>TDAPⅢ  |
| 使用目的                                    | 3次元骨組みモデルによる動的解析   |
| 開発機関                                    | 大成建設株式会社<br>株式会社アーク情報システム  |
| 開発時期                                    | 1994年  |
| 使用したバージョン                               | Ver. 3.08  |
| 計算機コードの概要                               | <p>TDAPⅢは、構造解析の汎用コードであり、土木及び建築分野に特化した要素群及び材料非線形モデルを数多くサポートしていることが特徴で、日本国内では、官公庁、大学及び民間問わず、多くの利用実績がある。</p> <p>静的荷重（節点力、静的震度、強制変形）及び動的荷重（節点加振力、強制変位・速度・加速度、地震動入力）を扱うことができる。</p> <p>線形解析及び非線形解析を時間領域における数値積分により行う。</p>  |
| 検証（Verification）及び<br>妥当性確認（Validation） | <p>TDAPⅢ Ver. 3.08は、鋼製防護壁上部工の3次元骨組みモデルによる動的解析に使用している。</p> <p><b>【検証(Verification)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・本解析コードの計算機能が適正であることは、別途、妥当性確認資料の中で確認している。</li> <li>・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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認(Validation)】</b></p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は、以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・橋梁・橋脚、地盤・構造物連成、地中構造物等をはじめとする多数の解析において本解析コードが使用されており、十分な使用実績があるため、信頼性があると判断できる。</li> <li>・本工事計画において使用するバージョンは、他プラントの既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。</li> <li>・本工事計画における構造に対して行う地震応答解析の使用目的に対し、使用用途及び使用方法に関する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。</li> </ul> |

### 3. TDAPⅢの解析手法について

#### 3.1 一般事項

TDAPⅢは、2次元及び3次元の有限要素解析を行う汎用プログラムである。土木・建築分野に特化した多種多様な構造要素や地盤要素、非線形構成則の機能を有している。主として地盤・構造物練成系の地震応答解析を行うものであり、鋼製防護壁の3次元骨組みモデルによる動的解析に使用している。

#### 3.2 解析コードの特徴

TDAPⅢは、土木・建築分野に特化した多種多様な構造要素や地盤要素、非線形構成則の機能を有する特徴を持つが、今回の使用目的に対しては以下の①～④の特徴を挙げることができる。

- ①2次元動的FEM解析を時間領域における数値積分により行う。
- ②線材要素を用いる。

#### 3.3 解析手法

##### a. 運動方程式

一般的に、多自由度系に対する離散化された運動方程式は以下のように表すことができる。

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{F\} \quad (3.3.1)$$

ここで、

- $[M]$  : 質量行列
- $[C]$  : 減衰行列
- $[K]$  : 剛性行列
- $\{U\}$  : 絶対変位ベクトル
- $\{\dot{U}\}$  : 絶対速度ベクトル
- $\{\ddot{U}\}$  : 絶対加速度ベクトル
- $\{F\}$  : 荷重ベクトル

出所：TDAPⅢ理論説明書

##### b. 運動方程式の直接積分による解法

運動方程式(3.3.1)は、以下のようにニューマークベータ法により解く。

$$[M]\{\ddot{U}_{t+\Delta t}\} + [C]\{\dot{U}_{t+\Delta t}\} + [K]\{U_{t+\Delta t}\} = \{F_{t+\Delta t}\} \quad (3.3.2)$$

を、

$$\{\dot{U}_{t+\Delta t}\} = \{\dot{U}_t\} + [(1-\delta)\{\ddot{U}_t\} + \delta\{\ddot{U}_{t+\Delta t}\}]\Delta t \quad (3.3.3)$$

$$\{U_{t+\Delta t}\} = \{U_t\} + \{\dot{U}_t\}\Delta t + \left[ \left( \frac{1}{2} - \beta \right) \{\ddot{U}_t\} + \beta \{\ddot{U}_{t+\Delta t}\} \right] \Delta t^2 \quad (3.3.4)$$

の仮定のもとに解く。ここで  $\delta \geq 0.5, \beta \geq 0.25(0.5 + \delta)^2$



(3.3.4)式を  $\{\ddot{U}_{t+\Delta t}\}$  について解き、これを(3.3.3)式に代入すると、

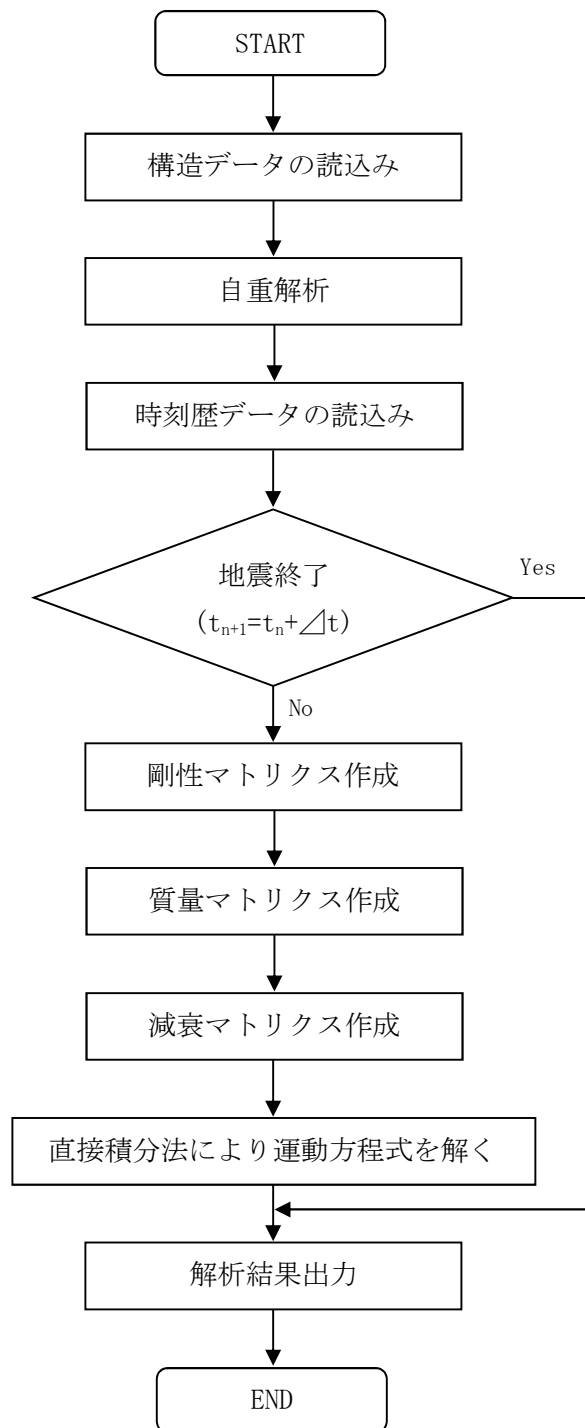
$$\begin{aligned}\{\dot{U}_{t+\Delta t}\} &= \left(1 - \frac{\delta}{2\beta}\right)\{\ddot{U}\}\Delta t + \left(1 - \frac{\delta}{\beta}\right)\{\dot{U}_t\} + \frac{\delta}{\beta\Delta t}(\{U_{t+\Delta t}\} - \{U_t\}) \\ \{\ddot{U}_{t+\Delta t}\} &= \frac{1}{\beta\Delta t^2} \left[ \{U_{t+\Delta t}\} - \{U_t\} - \{\dot{U}_t\}\Delta t - \frac{\Delta t^2}{2}\{\ddot{U}_t\} \right] + \{\ddot{U}_t\}\end{aligned}$$

と書ける。これを(3.3.2)式に代入して  $\{U_{t+\Delta t}\}$  に関する方程式としてまとめると、

$$\begin{aligned}& \left[ [K_t] + \frac{1}{\beta\Delta t^2} [M] + \frac{\delta}{\beta\Delta t} [C_t] \right] \{U_{t+\Delta t}\} \\ &= \{F_{t+\Delta t}\} + [M] \left[ \frac{1}{\beta\Delta t^2} \{U_t\} + \frac{1}{\beta\Delta t} \{\dot{U}_t\} + \left(\frac{1}{2\beta} - 1\right) \{\ddot{U}_t\} \right] + \\ & \quad [C] \left[ \frac{\delta}{\beta\Delta t} \{U_t\} + \left(\frac{\delta}{\beta} - 1\right) \{\dot{U}_t\} + \left(\frac{\delta}{2\beta} - 1\right) \Delta t \{\ddot{U}_t\} \right] \quad (3.3.5)\end{aligned}$$

出所：TDAPⅢ理論説明書

### 3.4 解析フローチャート



### 3.5 検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)

#### a. 基礎位置の入力値と応答値の比較による検証

鋼製防護壁をモデル化した3次元骨組みモデルにおいて、基礎位置の水平変位・鉛直変位・回転角の入力値に対して、解析結果の応答値の比較を実施する。

検証モデルを図3-1に示す。加振方向は壁軸方向加震と壁直方向加震の2通り行い、表3-1、表3-2に示すとおり、いずれのケースも入力値と応答値が完全に一致していることを確認した。

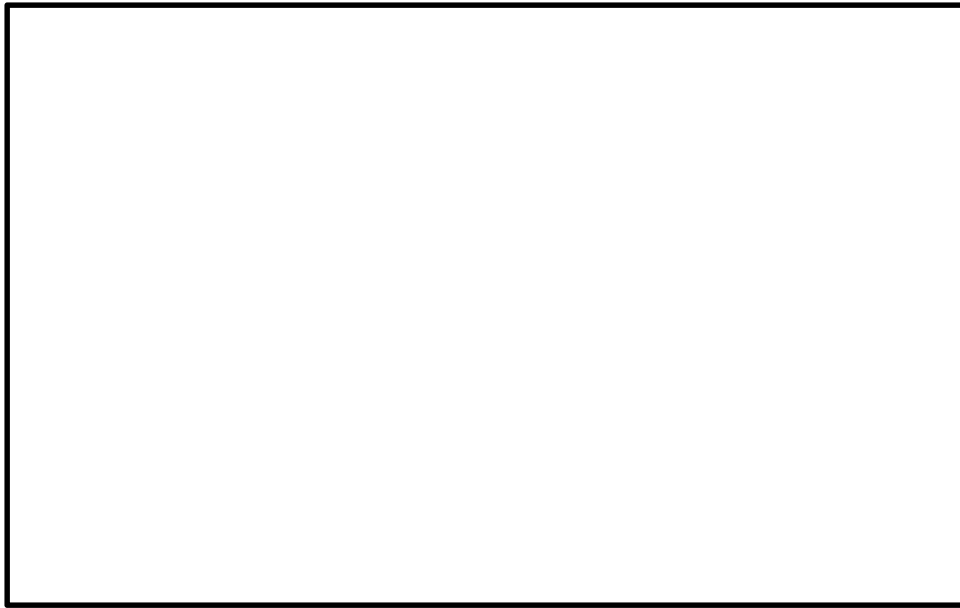


表3-1 壁軸方向加震 入力値と応答値の比較

|                 |    | 南基礎         |             |              | 北基礎         |             |              |
|-----------------|----|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|
|                 |    | 水平変位<br>(m) | 鉛直変位<br>(m) | 回転角<br>(rad) | 水平変位<br>(m) | 鉛直変位<br>(m) | 回転角<br>(rad) |
| 入力値             | 最大 | 0.218       | 0.010       | 0.00320      | 0.220       | 0.018       | 0.00267      |
|                 | 最小 | -0.336      | -0.056      | -0.00405     | -0.340      | -0.044      | -0.00362     |
| 応答値             | 最大 | 0.218       | 0.010       | 0.00320      | 0.220       | 0.018       | 0.00267      |
|                 | 最小 | -0.336      | -0.056      | -0.00405     | -0.340      | -0.044      | -0.00362     |
| 比率<br>(応答値/入力値) | 最大 | 100%        | 100%        | 100%         | 100%        | 100%        | 100%         |
|                 | 最小 | 100%        | 100%        | 100%         | 100%        | 100%        | 100%         |

表3-2 壁直方向加震 入力値と応答値の比較

|                 |    | 南基礎         |             |              | 北基礎         |             |              |
|-----------------|----|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|
|                 |    | 水平変位<br>(m) | 鉛直変位<br>(m) | 回転角<br>(rad) | 水平変位<br>(m) | 鉛直変位<br>(m) | 回転角<br>(rad) |
| 入力値             | 最大 | 0.174       | 0.018       | 0.00515      | 0.358       | 0.020       | 0.01118      |
|                 | 最小 | -0.341      | -0.047      | -0.00217     | -0.731      | -0.050      | -0.00420     |
| 応答値             | 最大 | 0.174       | 0.018       | 0.00515      | 0.358       | 0.020       | 0.01118      |
|                 | 最小 | -0.341      | -0.047      | -0.00217     | -0.731      | -0.050      | -0.00420     |
| 比率<br>(応答値/入力値) | 最大 | 100%        | 100%        | 100%         | 100%        | 100%        | 100%         |
|                 | 最小 | 100%        | 100%        | 100%         | 100%        | 100%        | 100%         |

b. 変形性状の固有値解析モード図と応答値の比較による検証

鋼製防護壁をモデル化した3次元骨組みモデルにおいて、固有値解析の支配的なモード図の形状と解析結果の変形性状の比較を実施する。

検証モデルを図3-2に示す。加振方向は壁軸方向加震と壁直方向加震の2通り行う。動的解析は、基礎位置に強制変位を入力する手法のため基礎部の変形は大きいですが、鋼製防護壁の変形性状は固有値解析のモード図と解析結果で同様であることを確認した。図3-3に壁軸方向加時震時の比較結果を、図3-4に壁直方向加震時の比較結果を示す。



図3-2 検証モデル

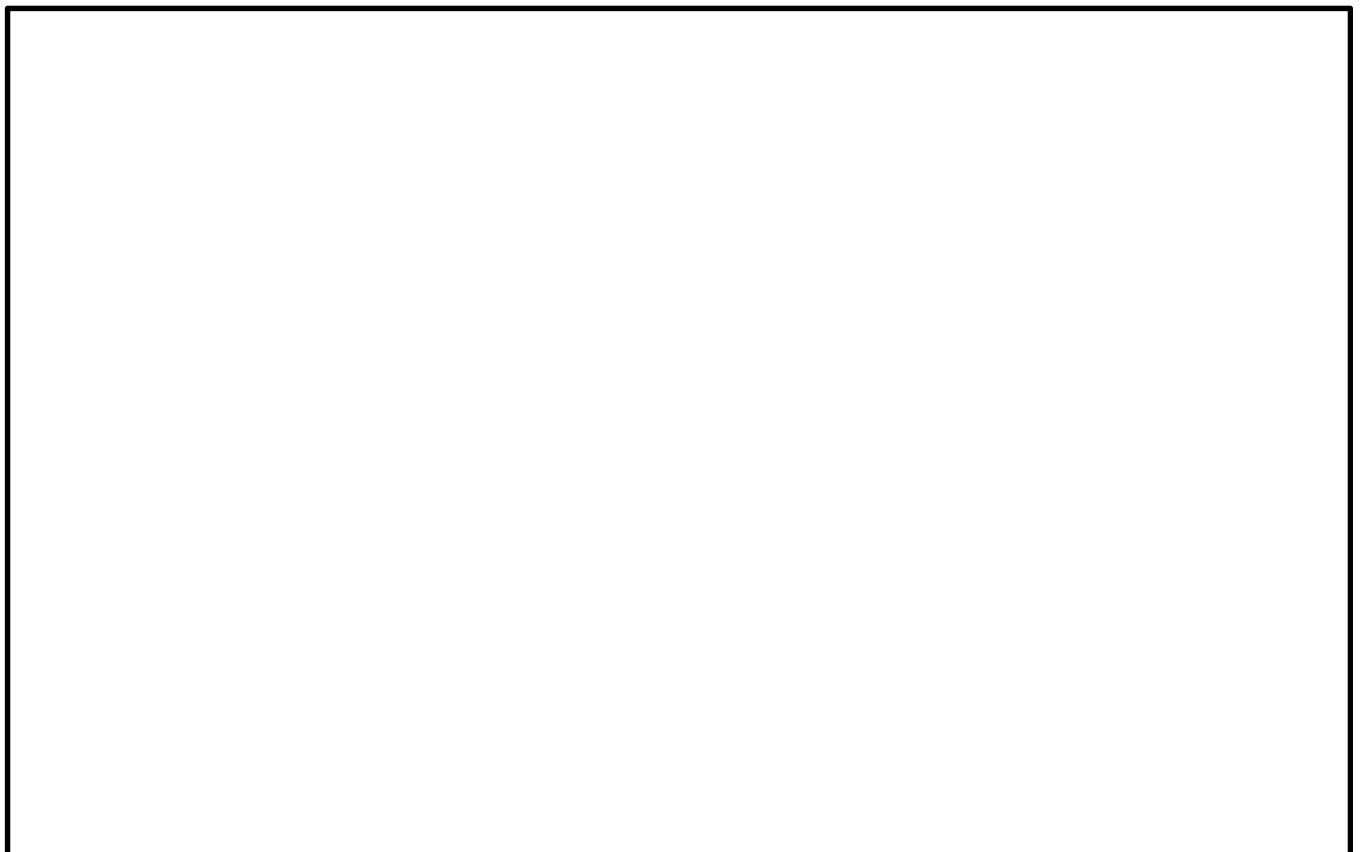


図3-3 壁軸方向加時震時の比較結果

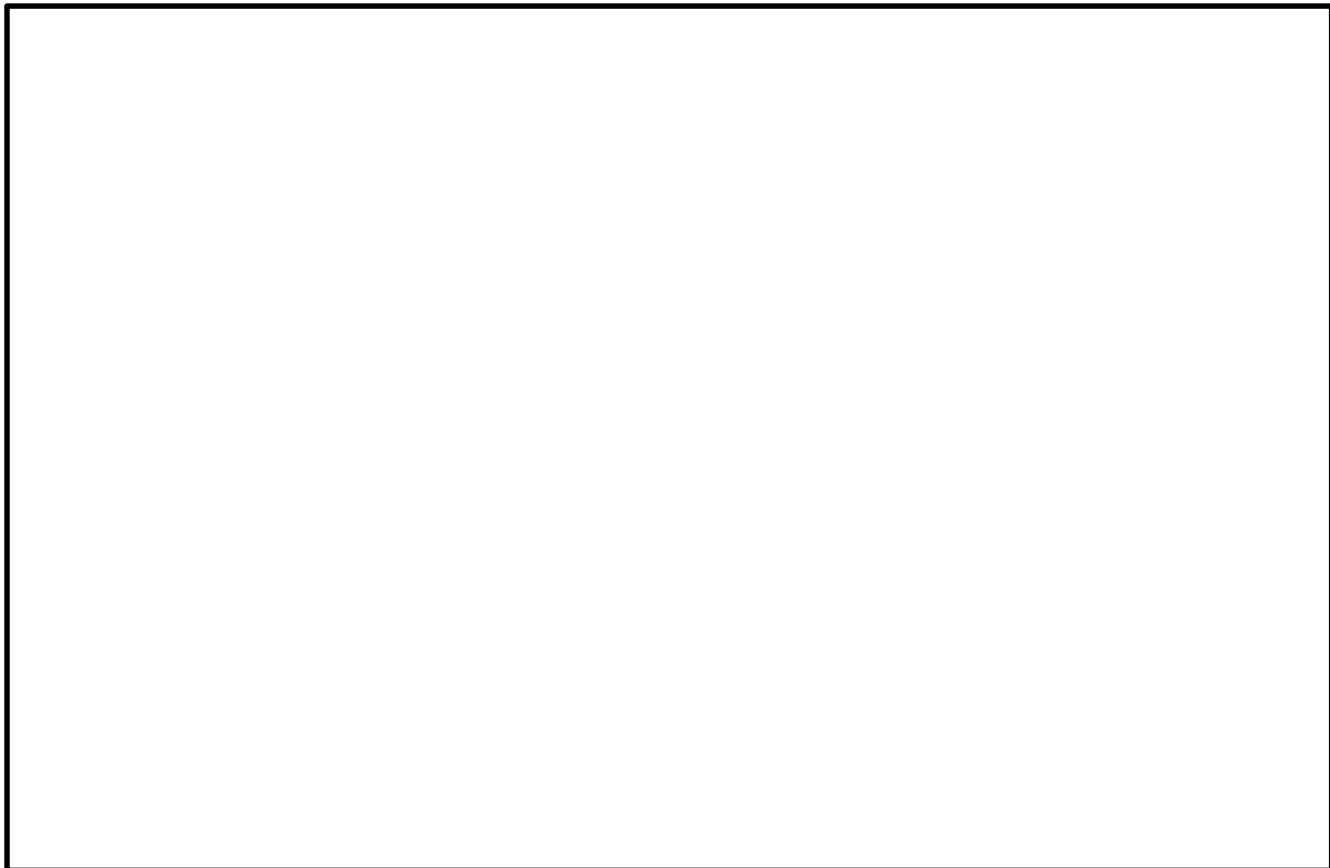


図3-4 壁直方向加時震時の比較結果

## c. 他構造解析用汎用コード[Femap with NX NASTRAN]の応答値の比較による検証

NX NASTRANは、アメリカ航空宇宙局（NASA）の構造解析プログラムとして開発されたNASTRANが、1971年にThe MacNeal-Schwendler Co.（MSC社の前身）から商用版としてリリースされ、このコードをベースにUGS社（Siemens Product Lifecycle Management Software Inc.の前身）がNX NASTRANとして継承、開発を続けている有限要素法による構造解析汎用コードである。

鋼製防護壁をモデル化した3次元骨組みモデルにおいて、TDAPⅢとFemap with NX NASTRANの二つの解析コードにおける時刻歴応答値の比較を実施する。使用した、Femap with NX NASTRANのバージョンは、「ver10.3.1B日本語版（64bit）」である。

図3-5に検証モデルと比較を実施した応答値出力位置を示す。応答値の比較は、支間中央部下端と両基礎拡幅付け根下端で実施した。

表3-3 応答値出力位置

|           | 支間中央部下端 | 南基礎<br>拡幅付け根下端 | 北基礎<br>拡幅付け根下端 |
|-----------|---------|----------------|----------------|
| 変位出力 節点番号 | 180     | 10071          | 10286          |

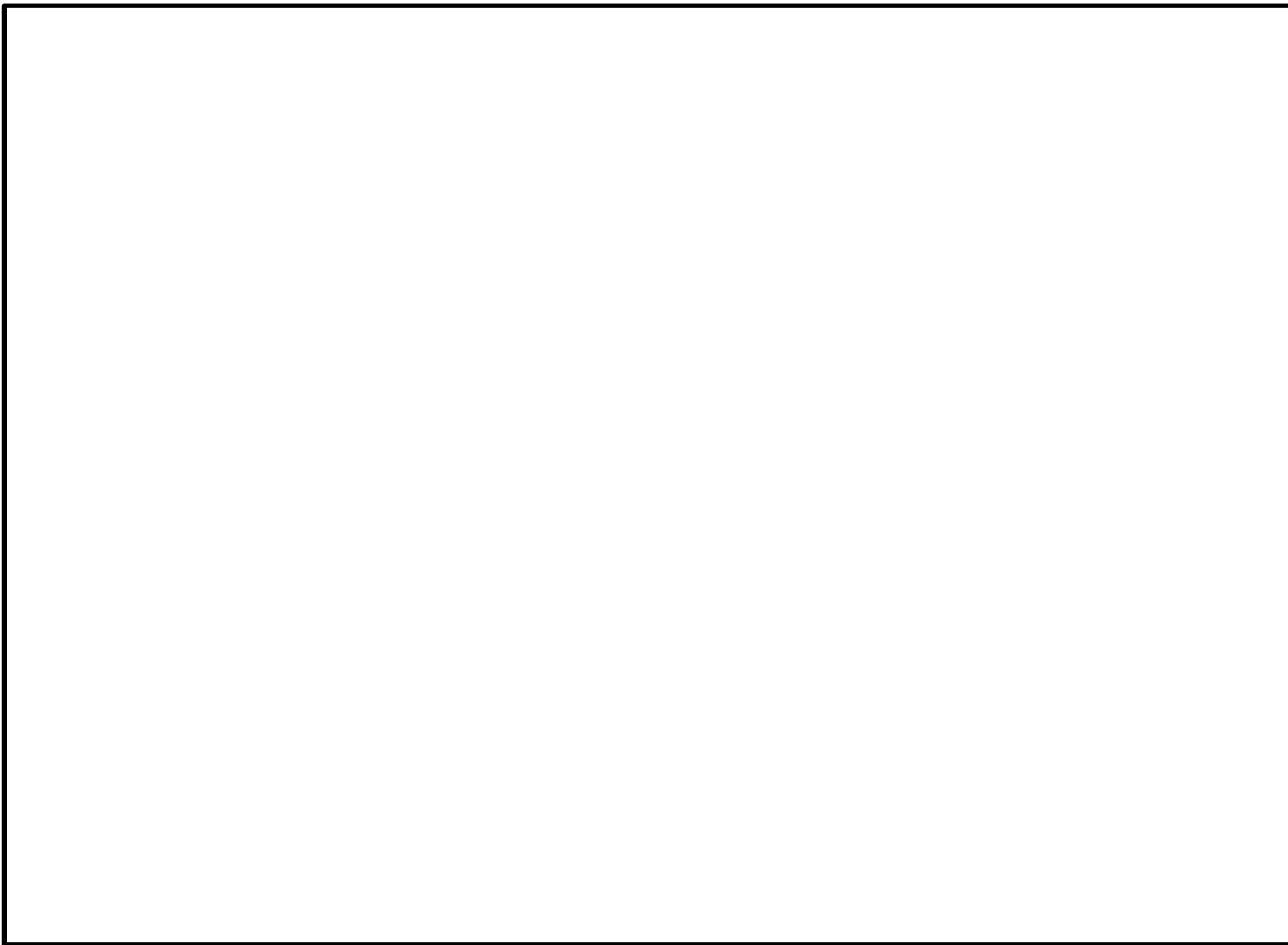


図3-5 検証モデル及び応答値出力位置

以下に、変形比較結果を示す。時刻歴変位の発生傾向がFemap with NX NASTRANとTDAPⅢで一致している。また、最大値および最小値の比率も誤差がないことを確認した。

図3-6 節点180(支間中央)におけるX, Y, Z方向の時刻歴応答変位比較結果

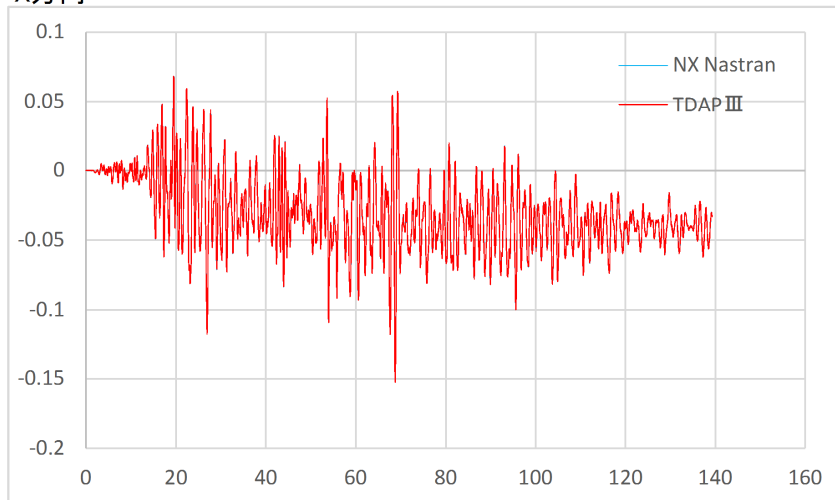
図3-7 節点10071(南基礎側付け根)におけるX, Y, Z方向の時刻歴応答変位比較結果

図3-8 節点10286(北基礎側付け根)におけるX, Y, Z方向の時刻歴応答変位比較結果

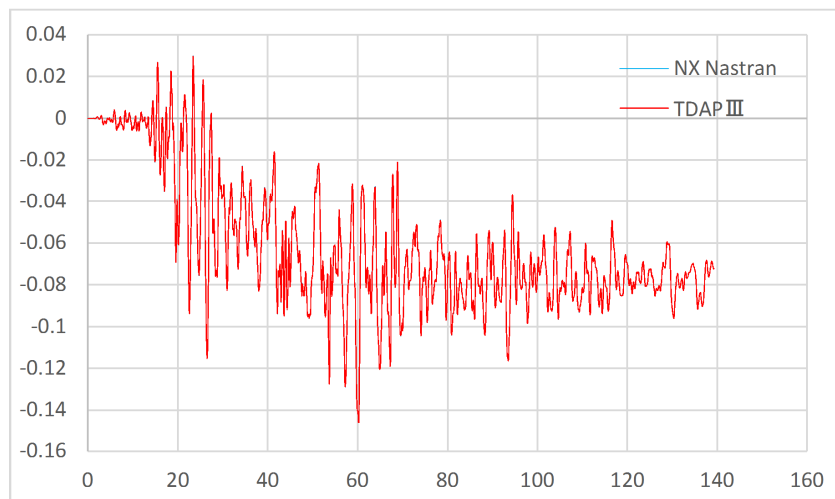
表3-4 X, Y, Z方向の最大最小変位比較結果

変位比較

ID 180 支間中央  
X方向



ID 180 支間中央  
Y方向



ID 180 支間中央  
Z方向

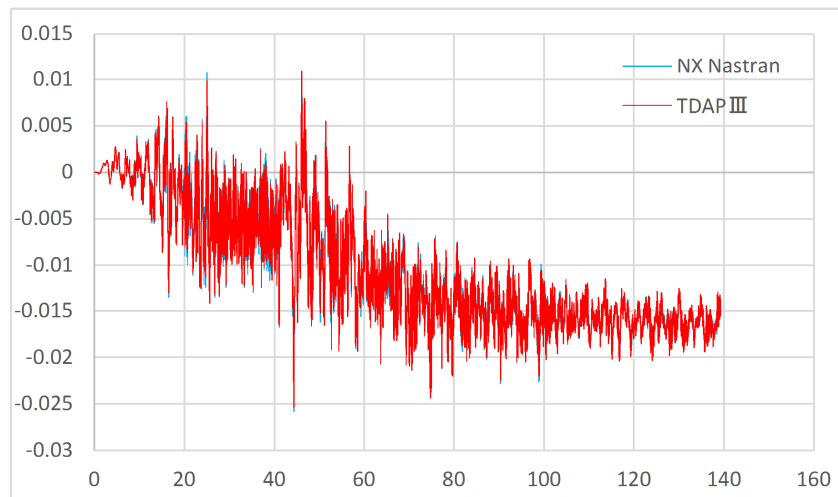
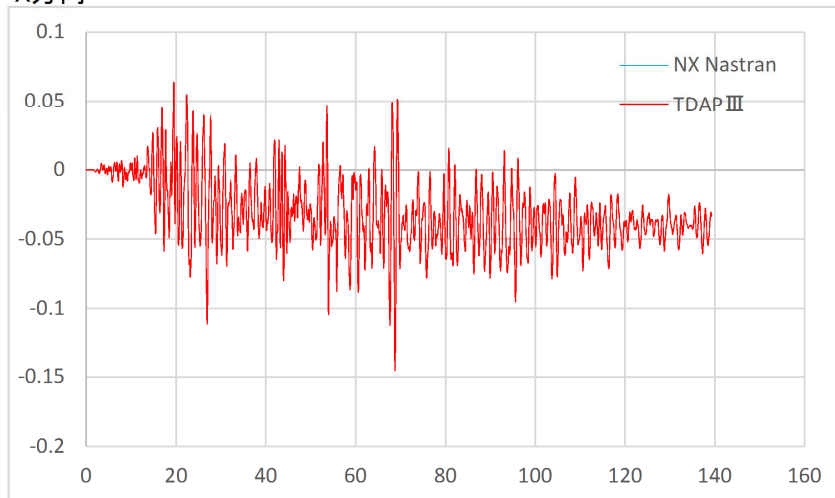


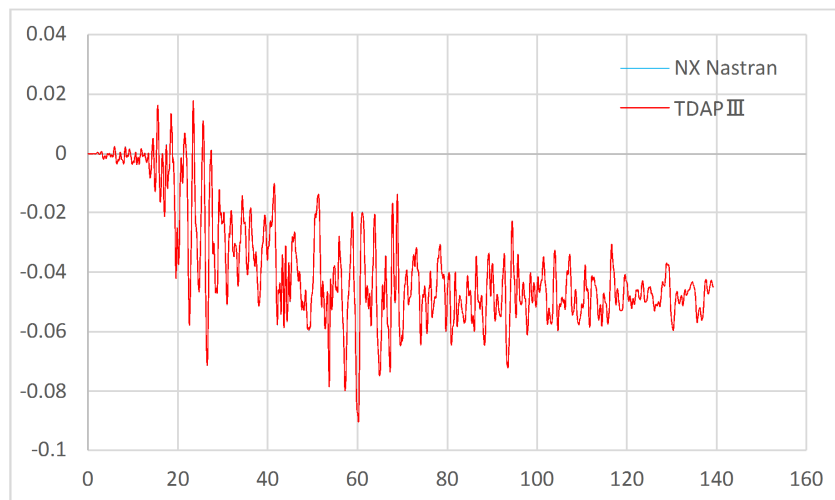
図3-6 節点180(支間中央)におけるX, Y, Z方向の時刻歴応答変位比較結果

変位比較

ID 10071 南基礎側 付け根  
X方向



ID 10071 南基礎側 付け根  
Y方向



ID 10071 南基礎側 付け根  
Z方向

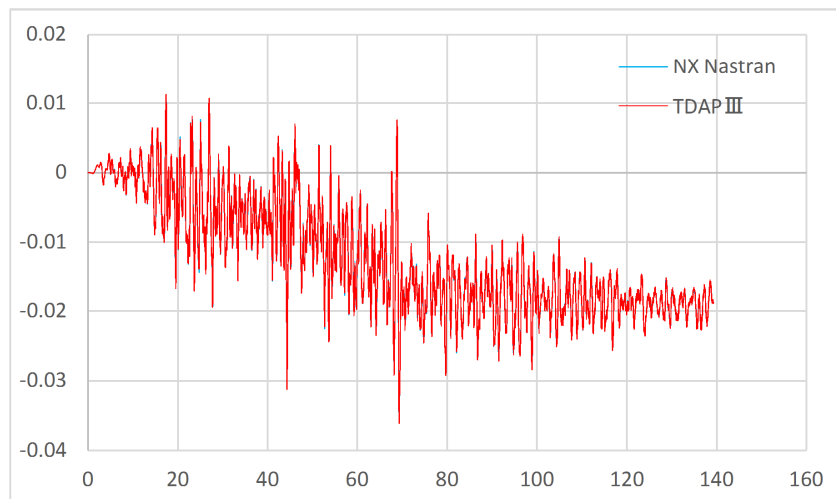
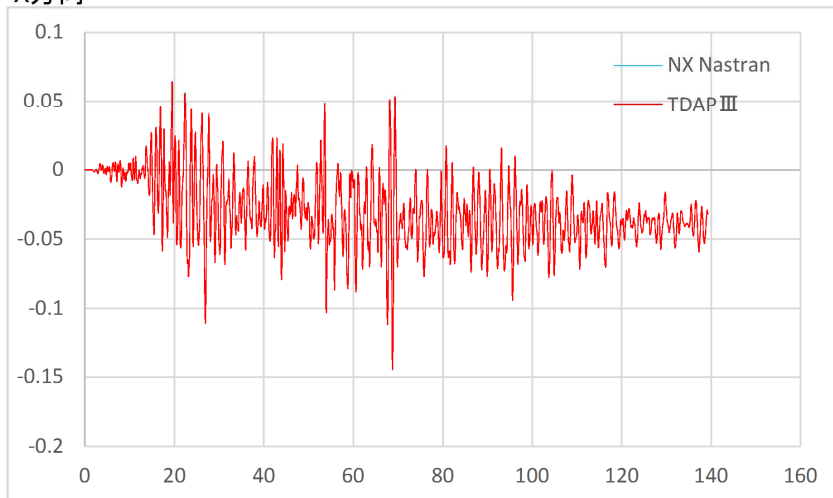


図3-7 節点10071(南基礎側付け根)におけるX, Y, Z方向の時刻歴応答変位比較結果

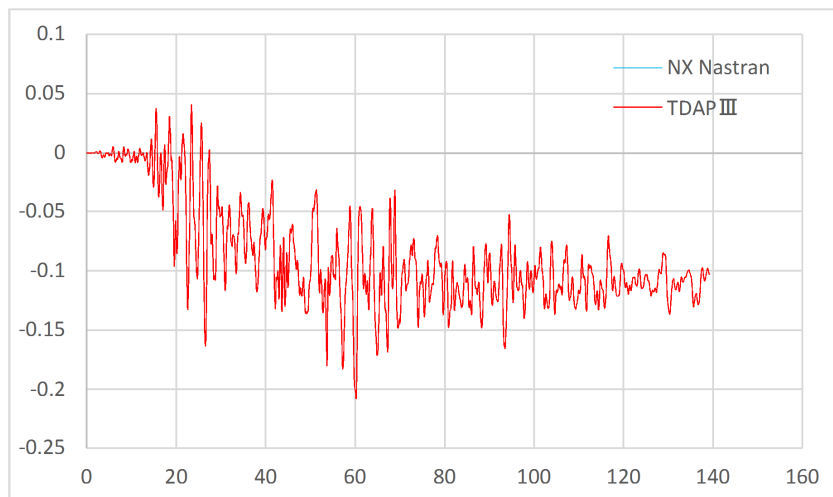


変位比較

ID 10286 北基礎側 付け根  
X方向



ID 10286 北基礎側 付け根  
Y方向



ID 10286 北基礎側 付け根  
Z方向

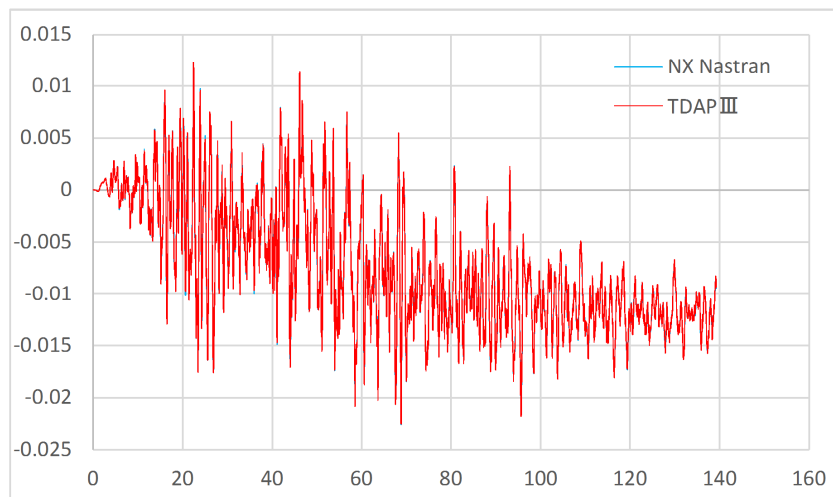


図3-8 節点10286(北基礎側付け根)におけるX, Y, Z方向の時刻歴応答変位比較結果

表3-4 X, Y, Z方向の最大最小変位比較結果

|     |                      | 節点: 180<br>場所: 支間中央部     |         |        |
|-----|----------------------|--------------------------|---------|--------|
|     |                      | DX                       | DY      | DZ     |
| 最大値 | TDAPⅢ                | 68 mm                    | 30 mm   | 11 mm  |
|     | NX Nastran           | 68 mm                    | 30 mm   | 11 mm  |
|     | 比率(TDAPⅢ/NX Nastran) | 100%                     | 100%    | 100%   |
| 最小値 | TDAPⅢ                | -153 mm                  | -146 mm | -25 mm |
|     | NX Nastran           | -153 mm                  | -146 mm | -26 mm |
|     | 比率(TDAPⅢ/NX Nastran) | 100%                     | 100%    | 96%    |
|     |                      | 節点: 10071<br>場所: 南基礎側付け根 |         |        |
|     |                      | DX                       | DY      | DZ     |
| 最大値 | TDAPⅢ                | 64 mm                    | 18 mm   | 11 mm  |
|     | NX Nastran           | 64 mm                    | 18 mm   | 11 mm  |
|     | 比率(TDAPⅢ/NX Nastran) | 100%                     | 100%    | 100%   |
| 最小値 | TDAPⅢ                | -146 mm                  | -91 mm  | -36 mm |
|     | NX Nastran           | -146 mm                  | -91 mm  | -36 mm |
|     | 比率(TDAPⅢ/NX Nastran) | 100%                     | 100%    | 100%   |
|     |                      | 節点: 10286<br>場所: 北基礎側付け根 |         |        |
|     |                      | DX                       | DY      | DZ     |
| 最大値 | TDAPⅢ                | 64 mm                    | 41 mm   | 12 mm  |
|     | NX Nastran           | 64 mm                    | 41 mm   | 12 mm  |
|     | 比率(TDAPⅢ/NX Nastran) | 100%                     | 100%    | 100%   |
| 最小値 | TDAPⅢ                | -145 mm                  | -208 mm | -23 mm |
|     | NX Nastran           | -145 mm                  | -208 mm | -23 mm |
|     | 比率(TDAPⅢ/NX Nastran) | 100%                     | 100%    | 100%   |

b. 使用内容に対する妥当性

鋼製防護壁の3次元骨組みモデルによる動的解析にTDAPⅢを使用することは、次のとおり、本解析の適用範囲に対して検証されており、妥当である。

- ・検証の内容のとおり、基礎位置の入力値と応答値の検証、固有値解析と動的解析の変形性状の比較による検証、他構造解析汎用コードとの応答値の比較による検証を行っていることから、解析の目的に照らして今回の解析に使用することは妥当である。