

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 改1
提出年月日	平成30年8月23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
2.1	TDAPⅢ Ver. 3.07	6
2.2	TDAPⅢ Ver. 3.08	5
3.	TDAPⅢの解析手法について	9
3.1	一般事項	9
3.2	解析コードの特徴	9
3.3	解析手法	9
3.4	解析フローチャート	11
3.5	検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)	12

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-2-2-5	使用済燃料乾式貯蔵建屋の耐震性についての計算書	Ver. 3.07
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

2.1 TDAPⅢ Ver. 3.07

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 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. 3.07
コードの概要	<p>TDAPⅢは、2次元、3次元及び軸対称問題に対応可能で、静荷重、動荷重の取り扱いができる構造解析の汎用コードである。動的解析においては、線形弾性解析及び材料非線形解析等を時間領域における数値積分により行う。</p> <p>土木・建築分野の特化した要素群，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，建設部門を中心として，官公庁，大学，民間問わず，多くの利用実績がある。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>TDAPⅢは，使用済燃料乾式貯蔵建屋の杭の応力解析に使用している。</p> <p>【検証の内容】 本解析コードの検証の内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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。 ・構造力学分野における一般的知見により解を求めることができる体系について，2次元骨組構造解析の検証として，はり要素を用いた構造解析を行い，解析解が文献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】 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。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・工事計画認可申請書の添付資料3（耐震性に関する説明書）において，固有値解析及び弾塑性解析に使用された実績がある。 ・検証の体系と本工事計画で使用する体系が同等であることから，解析解と理論解の一致をもって解析機能の妥当性も確認している。 ・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

	<p>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。</p> <ul style="list-style-type: none">・本工事計画における構造に対し使用する要素，2次元有限要素法による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。
--	--

2.2 TDAPⅢ Ver. 3.08

項目	コード名 TDAPⅢ
使用目的	静的応力解析
開発機関	大成建設株式会社 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>構造解析の汎用コードである。土木・建築分野に特化した要素群，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，民間問わず，多くの利用実績がある。</p> <p>静荷重（節点力，静的震度，強制変形）及び動荷重（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 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），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>【検証(Verification)】</p> <ul style="list-style-type: none"> 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。 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> <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"> 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。 四国電力株式会社の「伊方原子力発電所第3号機」において，中央制御室遮へいの静的応力解析に本コード（Ver. 3.05）が使用された実績がある。 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。 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。

項目	コード名 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 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 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>【検証(Verification)】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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。 ・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> <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"> ・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。 ・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。 ・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。

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 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>構造解析の汎用コードである。土木・建築分野に特化した要素群，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，民間問わず，多くの利用実績がある。</p> <p>静荷重（節点力，静的震度，強制変形）及び動荷重（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 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>【検証(Verification)】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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。 ・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> <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"> ・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。 ・九州電力株式会社の「川内原子力発電所第1号機」において，取水ピット，取水路，取水口，貯留堰，海水管ダクト縦坑部，海水管ダクト，海水ポンプエリア防護壁，防護堤の2次元骨組構造解析に本コード（Ver. 3.01）が使用された実績がある。 ・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。 ・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。

項目	コード名 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 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>構造解析の汎用コードである。土木・建築分野に特化した要素群，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，民間問わず，多くの利用実績がある。</p> <p>静荷重（節点力，静的震度，強制変形）及び動荷重（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 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>【検証(Verification)】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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。 ・基礎位置に強制変位を与える動的解析手法における基礎位置での強制変位の入力値と応答値および固有値解析における支配的なモード図の形状と応答値が一致していることを確認している。 ・別の解析コード（Femap with NX NASTRAN (Ver10.3.1B)）による応答値との比較を実施し，応答値の発生傾向が一致し，有意な差がない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> <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"> ・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。 ・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。

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、

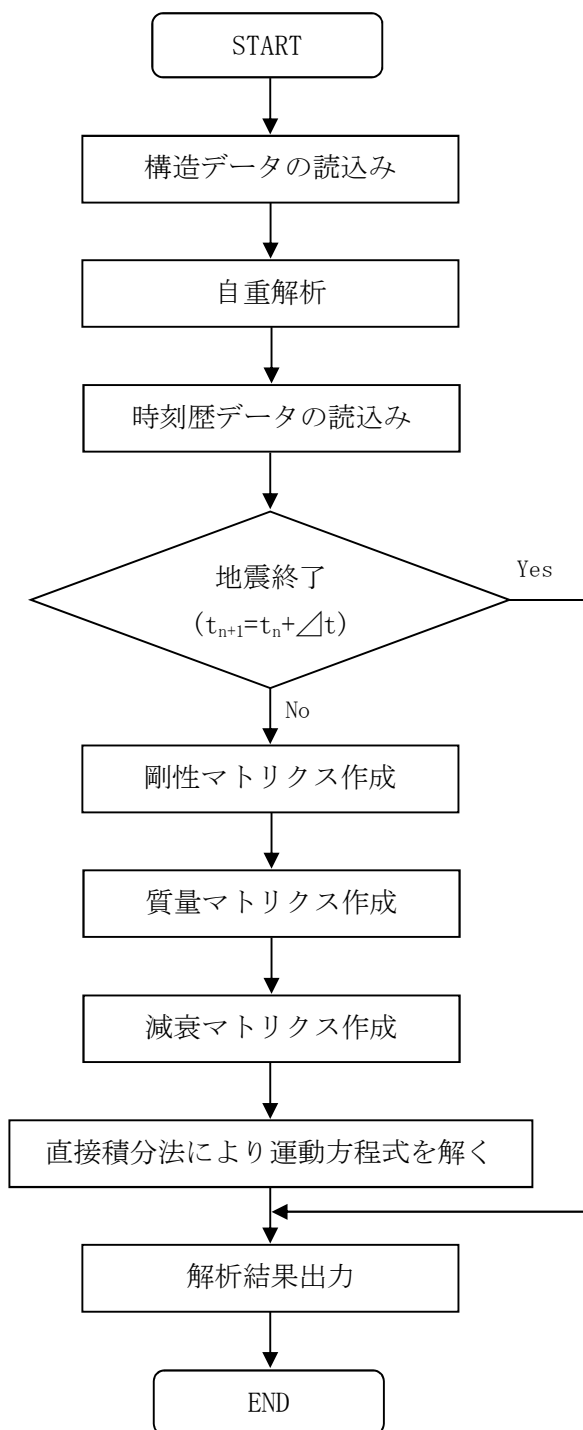
$$\begin{aligned}\{\dot{U}_{t+\Delta t}\} &= \left(1 - \frac{\delta}{2\beta}\right)\{\ddot{U}\}\Delta t + \left(1 - \frac{\delta}{\beta}\right)\{\dot{U}_t\} + \frac{\delta}{\beta\Delta t}(\{U_{t+\Delta t}\} - \{U_t\}) \\ \{\ddot{U}_{t+\Delta t}\} &= \frac{1}{\beta\Delta t^2} \left[\{U_{t+\Delta t}\}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

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、

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

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。

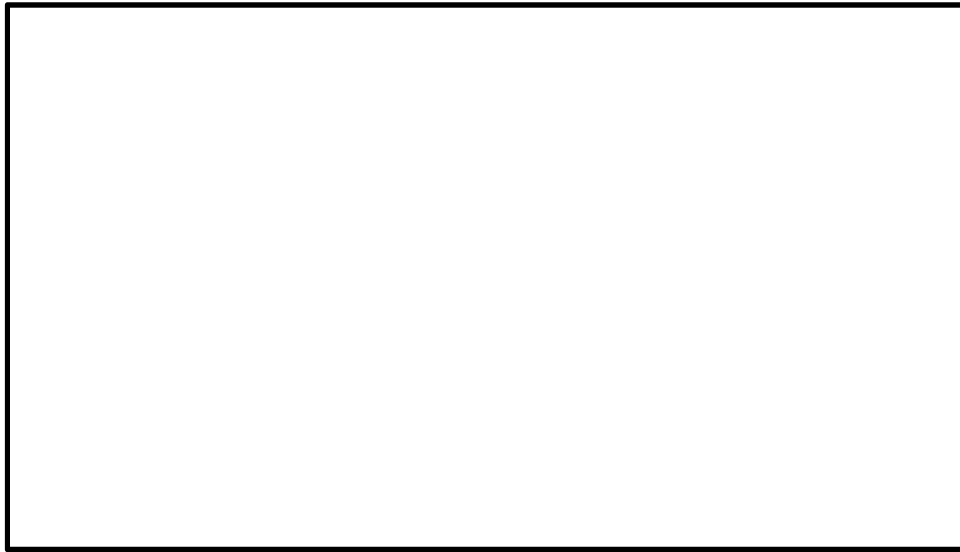


図3-1 検証モデル

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 (m)	鉛直変位 (m)	回転角 (rad)	水平変位 (m)	鉛直変位 (m)	回転角 (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 (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 (m)	鉛直変位 (m)	回転角 (rad)	水平変位 (m)	鉛直変位 (m)	回転角 (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 (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

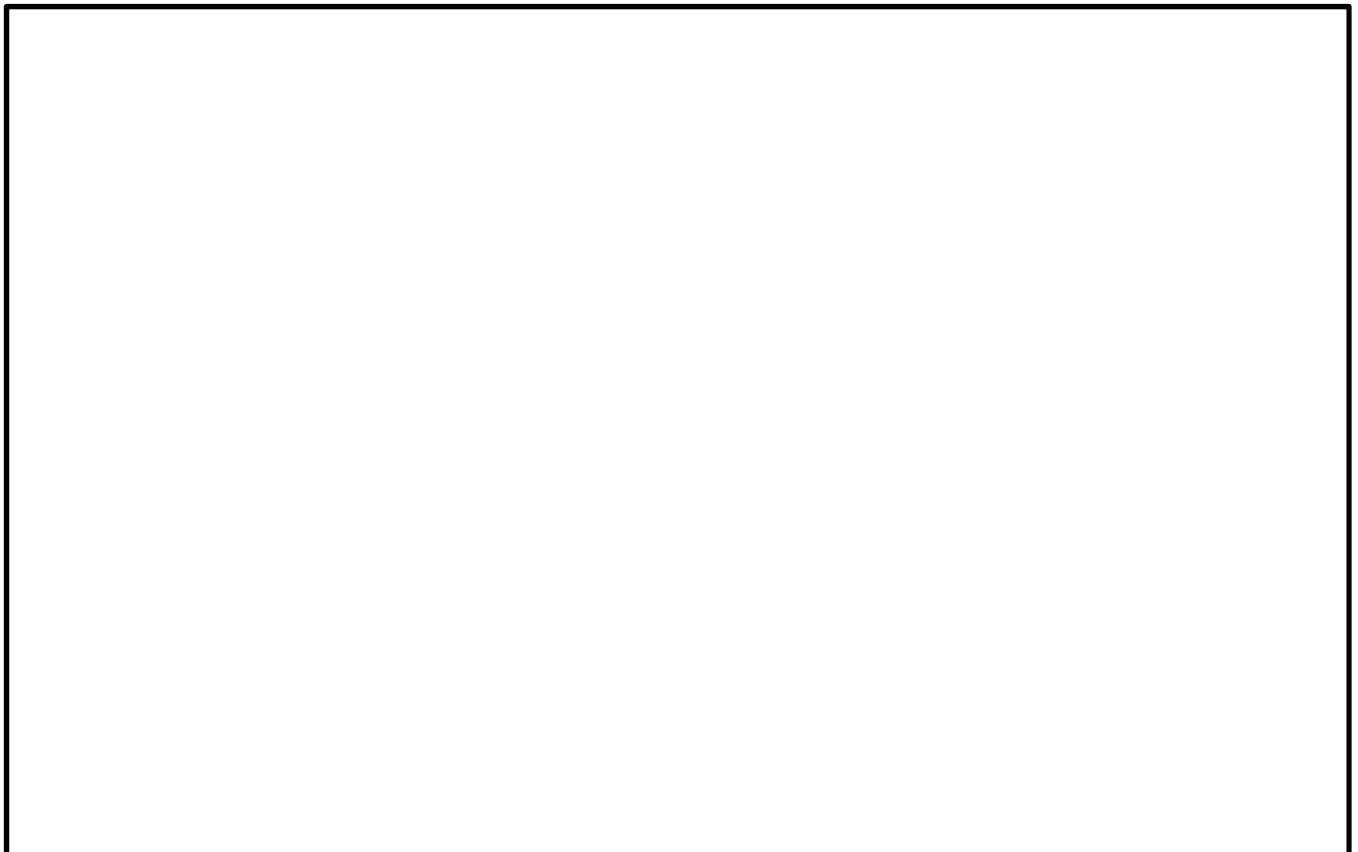


図3-3 壁軸方向加時震時の比較結果

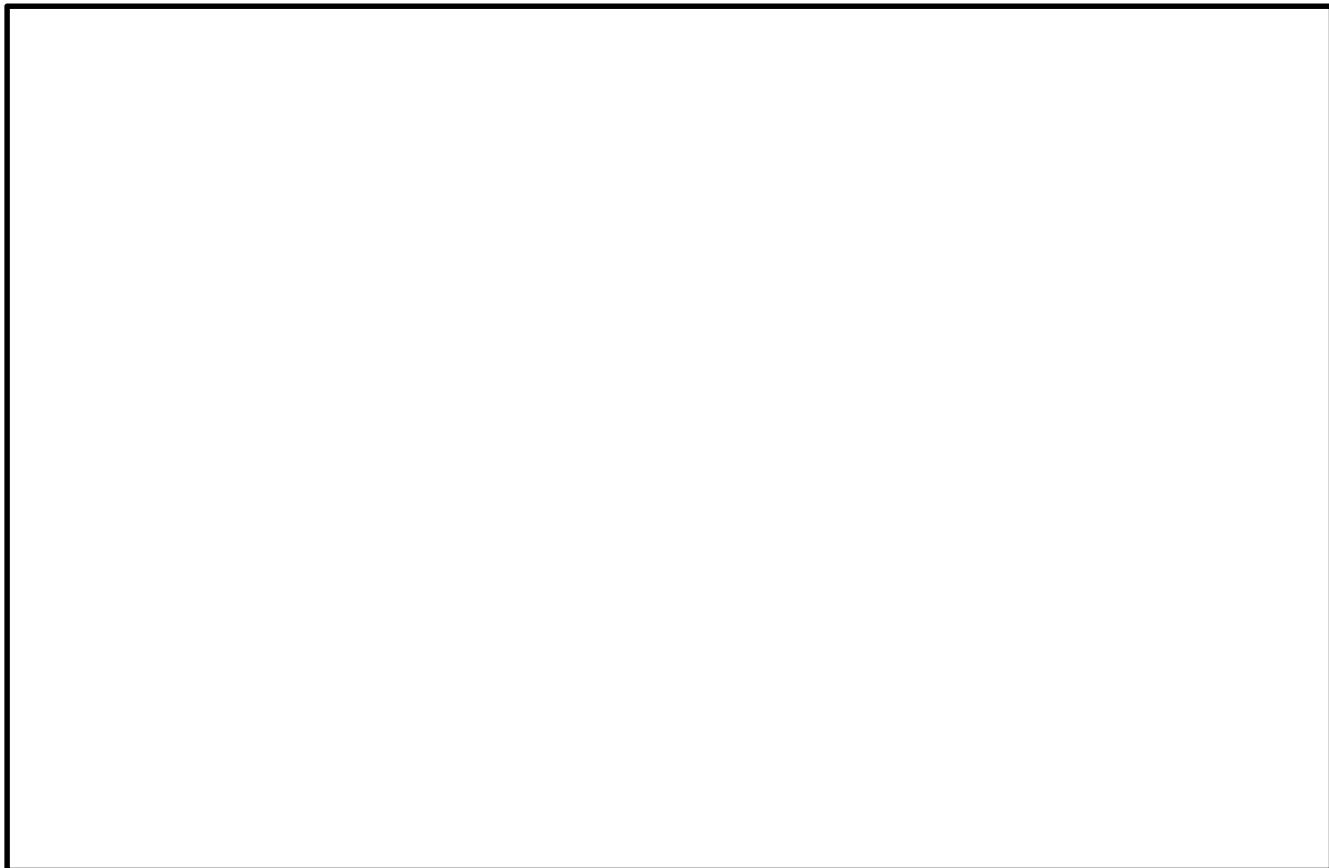


図3-4 壁直方向加時震時の比較結果

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 拡幅付け根下端	北基礎 拡幅付け根下端
変位出力 節点番号	180	10071	10286

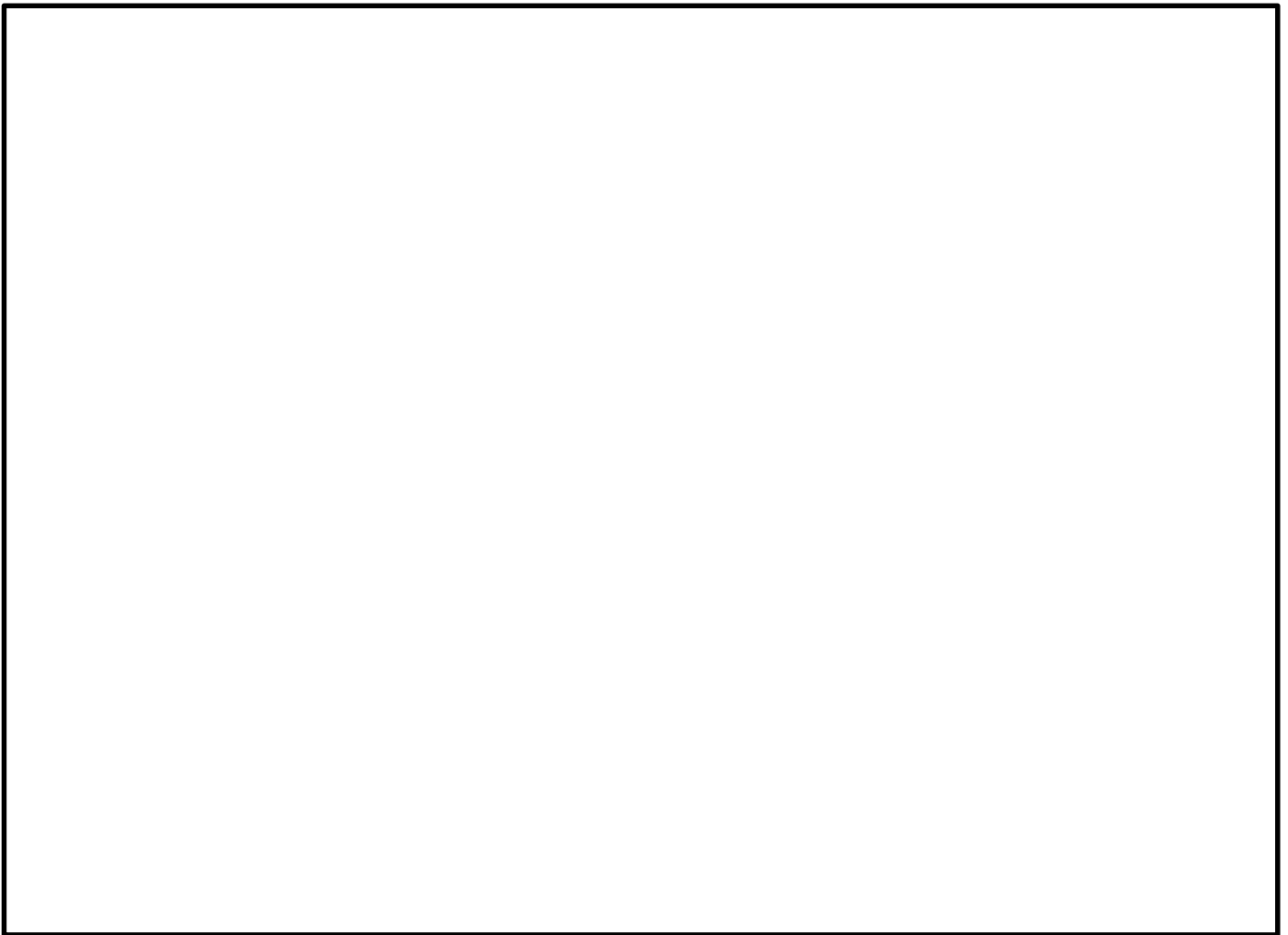


図3-5 検証モデル及び応答値出力位置

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

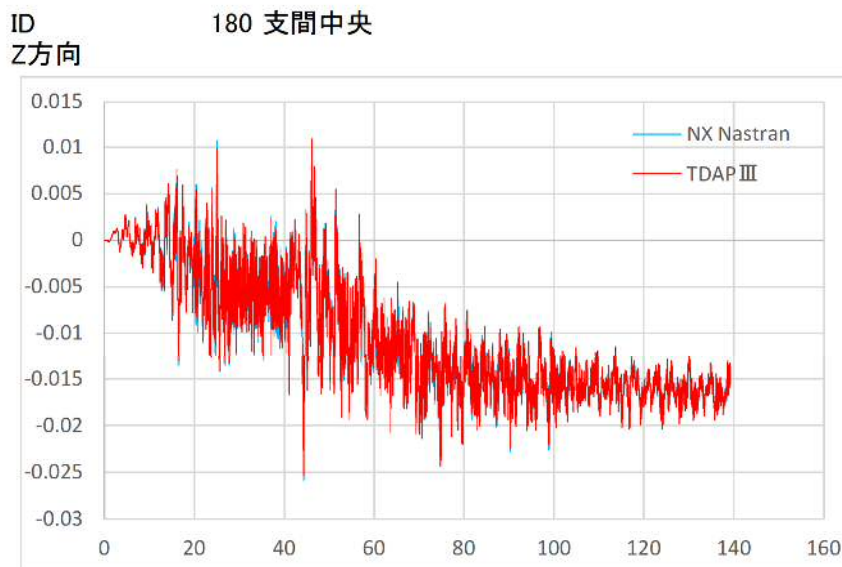
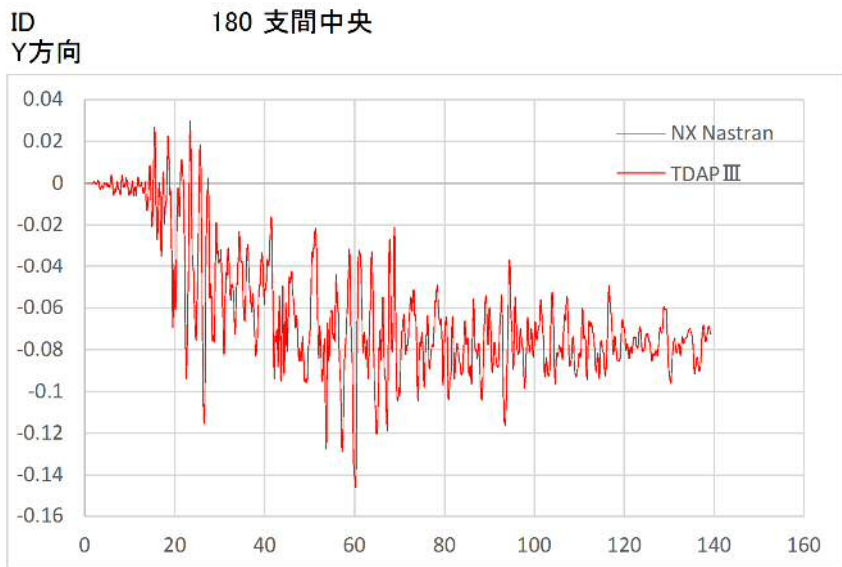
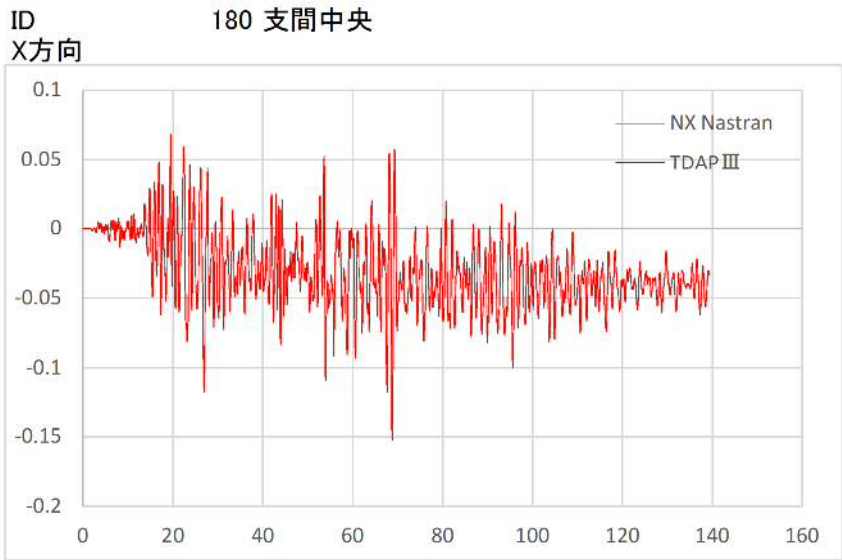
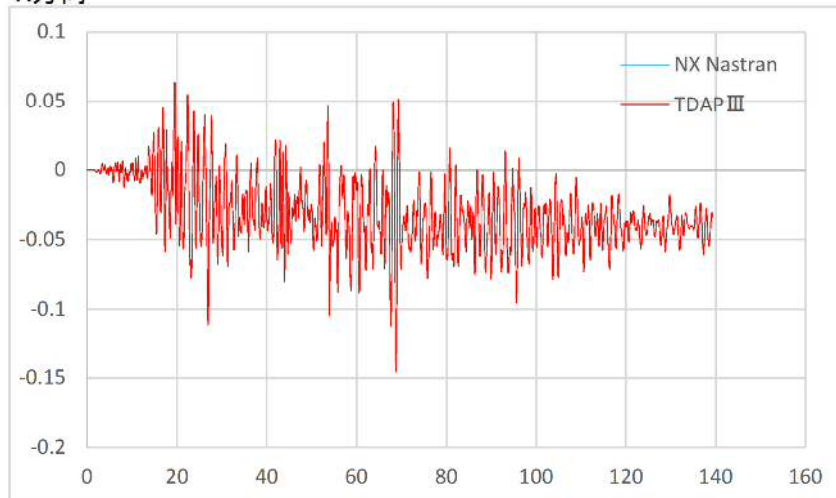


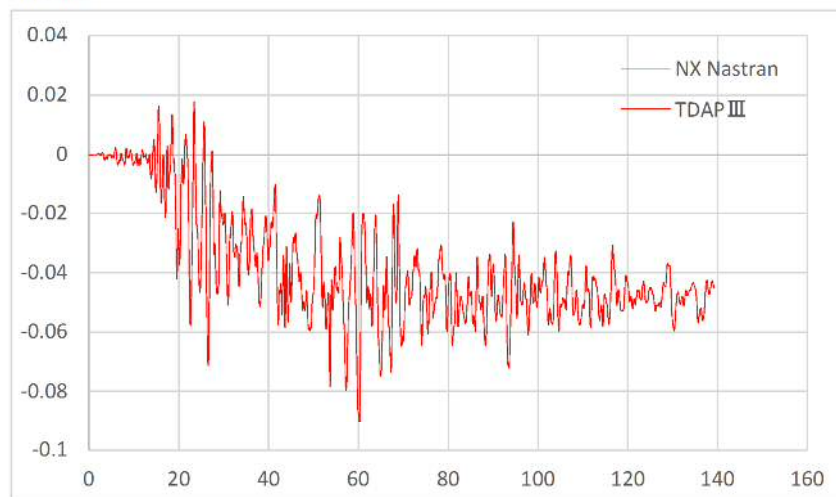
図3-6 節点180(支間中央)におけるX, Y, Z方向の時刻歴応答変位比較結果

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

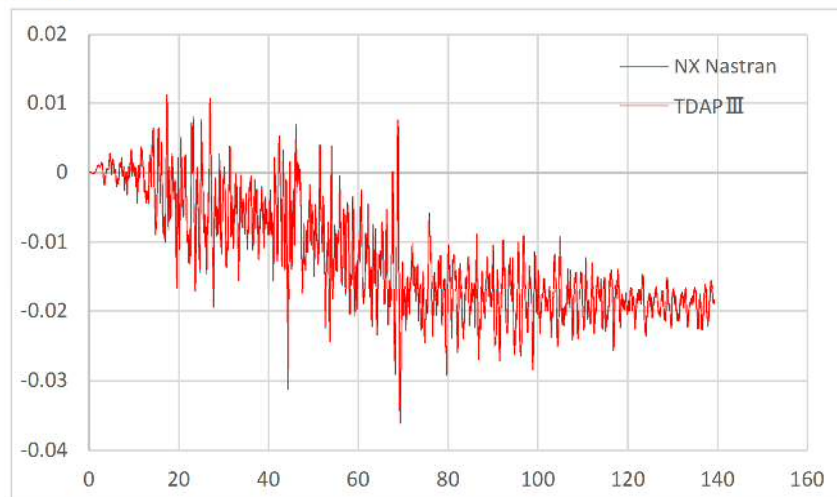
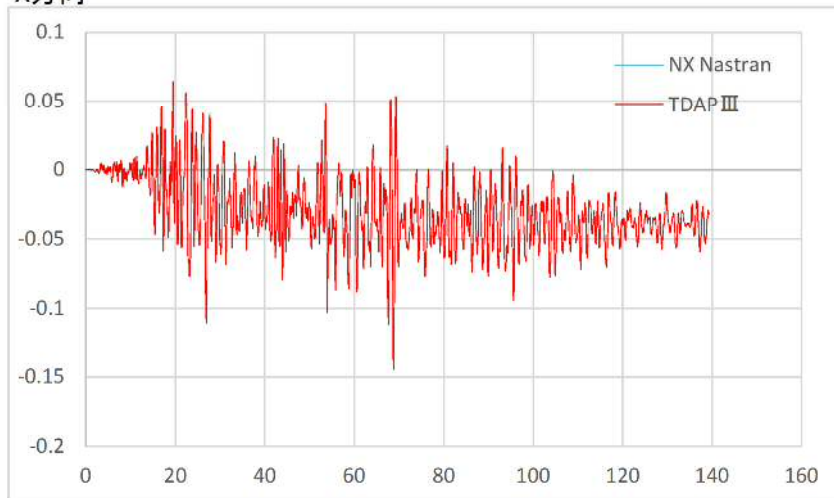


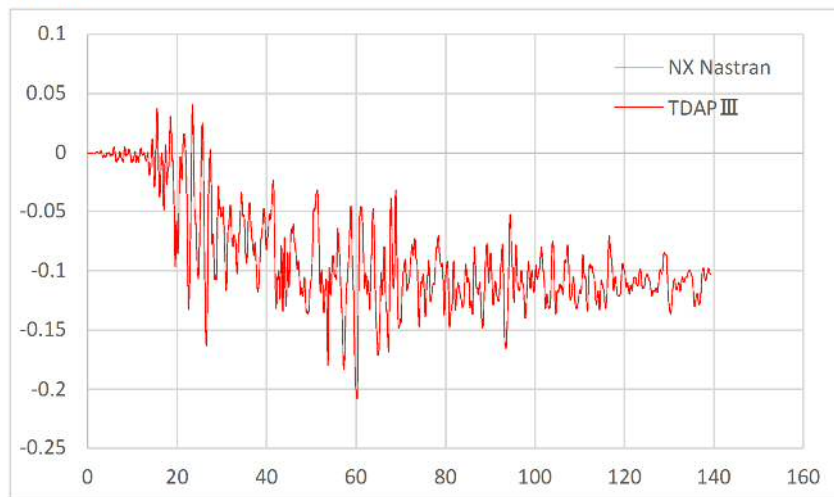
図3-7 節点10071(南基礎側付け根)におけるX, Y, Z方向の時刻歴応答変位比較結果

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

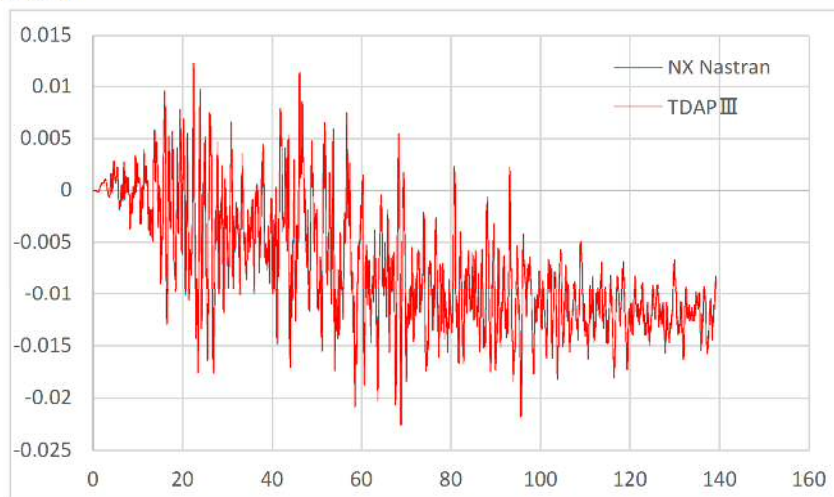


図3-8 節点10286(北基礎側付け根)におけるX, Y, Z方向の時刻歴応答変位比較結果

表3-4 X, Y, Z方向の最大最小変位比較結果

		節点: 180 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 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 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。