

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-工-B-22-0009_改0
提出年月日	2021年2月25日

## VI-5-2 計算機プログラム（解析コード）の概要

・BG0195HDW1

2021年2月

東北電力株式会社

## 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. 解析手法.....	4
3.1 一般事項.....	4
3.2 解析コードの特徴.....	4
3.3 解析手法.....	5
3.4 解析フローチャート.....	7
3.5 検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation) .....	8
3.5.1 検証 (Verification) .....	8
3.5.2 妥当性確認 (Validation) .....	10
3.5.3 評価結果.....	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）BG0195HDW1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
VI-1-1-6-別添1	可搬型重大事故等対処設備の保管場所及びアクセスルート	ver. 5.0.6

## 2. 解析コードの概要

項目	コード名 BG0195HDW1
使用目的	2次元有限要素法による常時応力解析
開発機関	鹿島建設株式会社
開発時期	2006年
使用したバージョン	ver. 5.0.6
コードの概要	<p>BG0195HDW1（以下「本解析コード」という。）は、2次元有限要素法解析を行う解析コードである。本解析コードの主な特徴は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>① 2次元有限要素法による解析プログラムである。</li> <li>② 地盤～構造物連成系モデルの相互作用解析が可能である。</li> <li>③ 地盤の掘削過程を考慮したステップ解析が可能である。</li> </ul>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p><b>【検証(Verification)】</b> 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"> <li>・半無限弾性地盤におけるブシネスクの理論解と、本解析コードによる解析解との比較を実施し、解析解が理論解とおおむね一致することを確認している。</li> <li>・本解析コードの運用環境について、動作確認を満足する計算機にインストールして用いていることを確認している。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認(Validation)】</b> 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"> <li>・原子力産業界において実績のあるTDAPⅢを用いた自重解析結果と、本解析コードによる自重解析結果を比較し、解がおおむね一致することを確認している。</li> </ul>

### 3. 解析手法

#### 3.1 一般事項

本資料は、静的解析（常時応力算出用）解析コード BG0195HDW1 の概要である。

本解析コードは、鹿島建設株式会社によって開発された 2 次元有限要素法解析を行う解析コードである。

#### 3.2 解析コードの特徴

本解析コードの主な特徴として、以下の①～③を挙げることができる。

① 2次元有限要素法による解析プログラムである。

② 地盤～構造物連成系モデルの相互作用解析が可能である。

③ 地盤の掘削過程を考慮したステップ解析が可能である。

### 3.3 解析手法

地盤の FEM 解析では、土は連続体として仮定している。通常、全応力解析手法を用いて、地盤の変形、破壊をシミュレートする。ここで、静的全応力解析の理論基礎について説明する。

#### (1) 釣合い方程式

静的解析では、慣性力は無視できるので x-y 平面上の微小領域に  $F_x$ ,  $F_y$  の荷重が作用する場合の力の釣合い方程式は (1) 式で表せる。

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + F_x = 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + F_y = 0 \end{cases} \quad (1)$$

#### (2) 変位とひずみの関係

要素内部の変位  $\{u\}$  は、その要素を構成する節点の変位  $\{\delta\}$  を用いて (2) 式のように関係づけられる。

$$\{u\} = [N]\{\delta\} \quad (2)$$

ここに  $[N]$  は形状関数と呼ばれる。これらを用いて、ひずみ  $\{\epsilon\}$  は、(3) 式のように表される。

$$\{\epsilon\} = [\bar{D}]\{u\} = [\bar{D}][N]\{\delta\} = [B]\{\delta\} \quad (3)$$

ここに、 $[\bar{D}]$  は、ひずみと要素内変位を関係づけるマトリックス、 $[B]$  は、要素を構成する節点の変位とひずみを関係づけるマトリックスを表す。

#### (3) 応力とひずみ関係

応力-ひずみ関係は次式のようになる。

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon\} \quad (4)$$

ここに、 $\{\sigma\}$  は応力、 $\{\epsilon\}$  はひずみ、 $[D]$  は応力-ひずみマトリックスを表す。

(4) 有限要素の定式化

有限要素のひずみエネルギー及び外力によるポテンシャルエネルギーの和，すなわち全ポテンシャルエネルギーを求め，ポテンシャルエネルギー最小の原理を適用して有限要素の定式化を行う。その結果，式(5)に示すような要素剛性方程式が導かれる。

$$[k]\{\delta\} = \{f_b\} + \{f_q\} + \{f_p\} \quad (5)$$

ここに， $[k]$ は要素剛性マトリックス， $\{\delta\}$ は節点変位， $\{f_b\}$ は物体力， $\{f_q\}$ は要素表面力， $\{f_p\}$ は節点集中荷重を表す。

全要素について，要素剛性方程式を組み合わせて，連続体を近似する連立方程式を得ることができる。最終的に，この連立方程式を解くことにより，変位を得られる。



### 3.4 解析フローチャート

解析フローチャートを図 3-1 に示す。

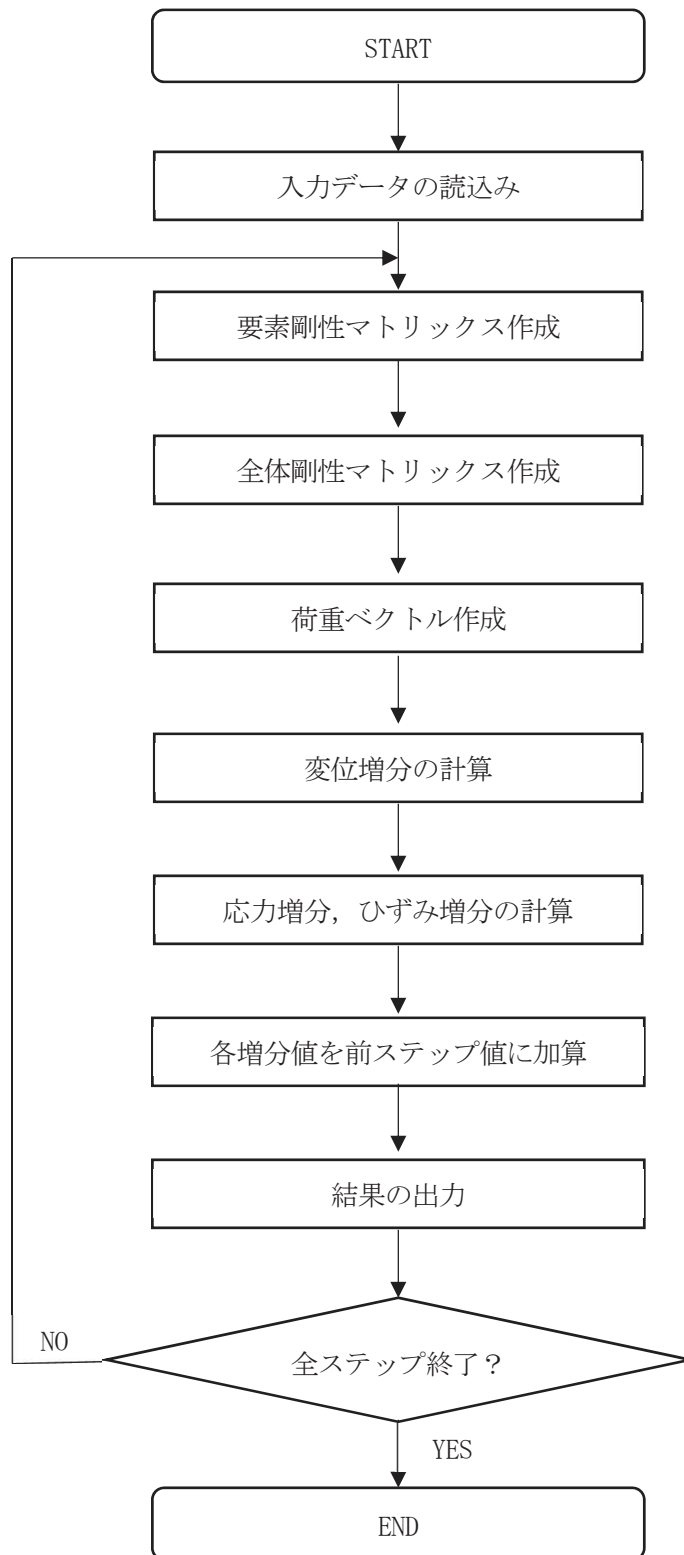


図3-1 解析フローチャート

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

本解析コードを本解析に用いるにあたり、検証として半無限弾性地盤におけるブシネスク (Boussinesq) の理論解と本解析コードによる解析解との比較を、妥当性確認として類似の汎用構造解析プログラム TDAPⅢによる解析結果と、本解析コードによる解析結果との比較を実施した。その詳細な内容については以下のとおりとする。

#### 3.5.1 検証 (Verification)

平面ひずみ要素の鉛直応力を半無限弾性地盤におけるブシネスク (Boussinesq) の理論解と比較した。図 3-2 に解析モデル及び境界条件を示す。

比較結果より、解析解が理論解とおおむね一致することを確認した。

##### (1) 解析モデル

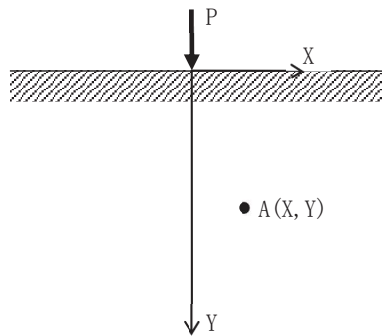


図3-2 解析対象とした地盤モデル

##### (2) 解析条件

モデルサイズ	: X400m×Y200m
物性値	: $E=1.0 \times 10^6 \text{kN/m}^2$ , $\nu=0.49$
境界条件	: 底面固定, 側方鉛直ローラー
荷重条件	: $P=100\text{kN}$ ( $X=0, Y=0$ )

## (3) 鉛直応力

等方均質な半無限弾性地盤の表面に鉛直方向の集中荷重  $P$  が载荷されたときに弾性体内部で発生する応力は 1885 年にブシネスク (Boussinesq) によって求められている。

線荷重が载荷された場合の地盤内応力については、平面変形条件として取り扱うことができ、奥行方向に集中荷重が無限に並んでいると考える。そのとき図 3-2 における点 A の鉛直応力  $\sigma_Y$  の理論解は以下の式で求められる。

$$\sigma_Y = \frac{2PY^3}{\pi(X^2+Y^2)^2}$$

今回は自重成分を除き、外力による純粋な応力伝播のみを予測する。図 3-2 の荷重载荷位置における鉛直応力と深度の関係の結果を図 3-3 に示す。

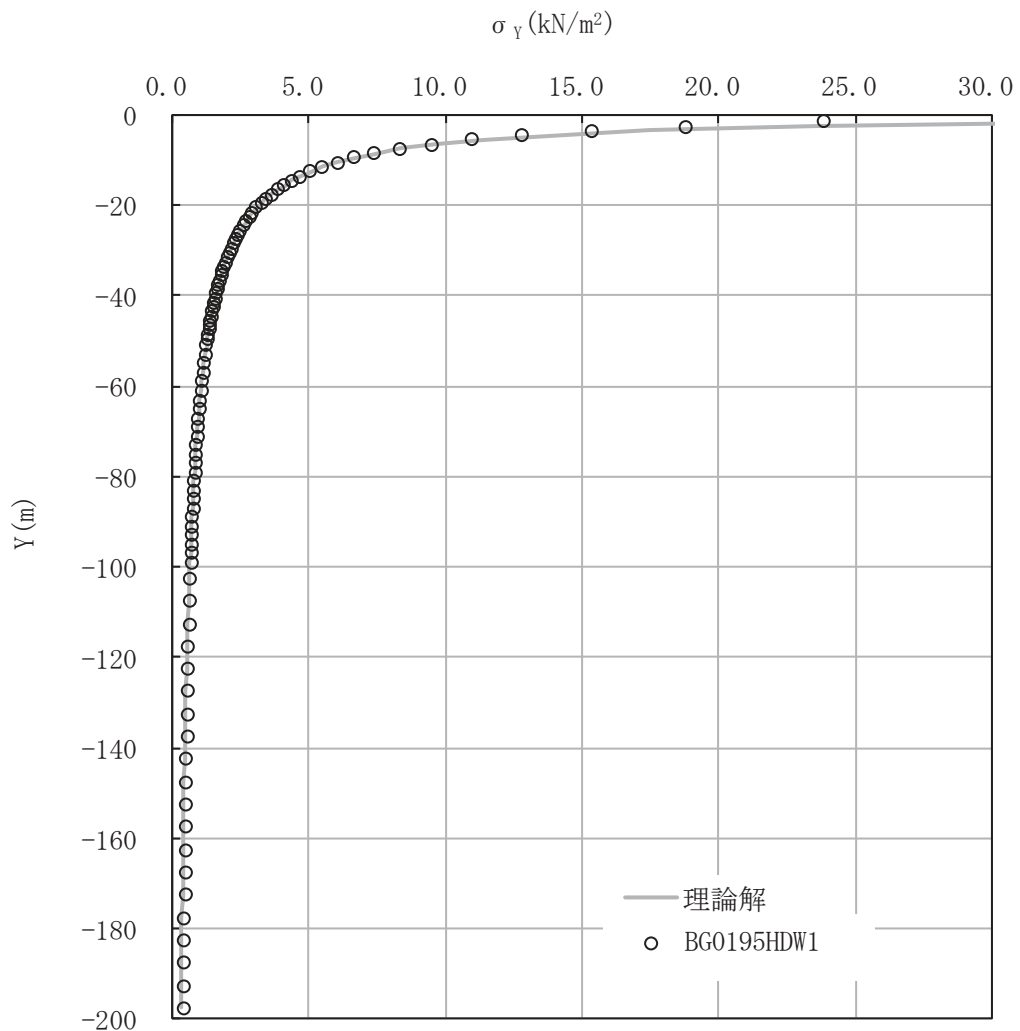


図3-3 検証結果

### 3.5.2 妥当性確認 (Validation)

土木・建築向け汎用構造解析プログラム TDAPⅢとの自重解析結果による比較を実施した。

#### (1) 検証モデル

検討モデル及び境界条件を図3-4に示す。

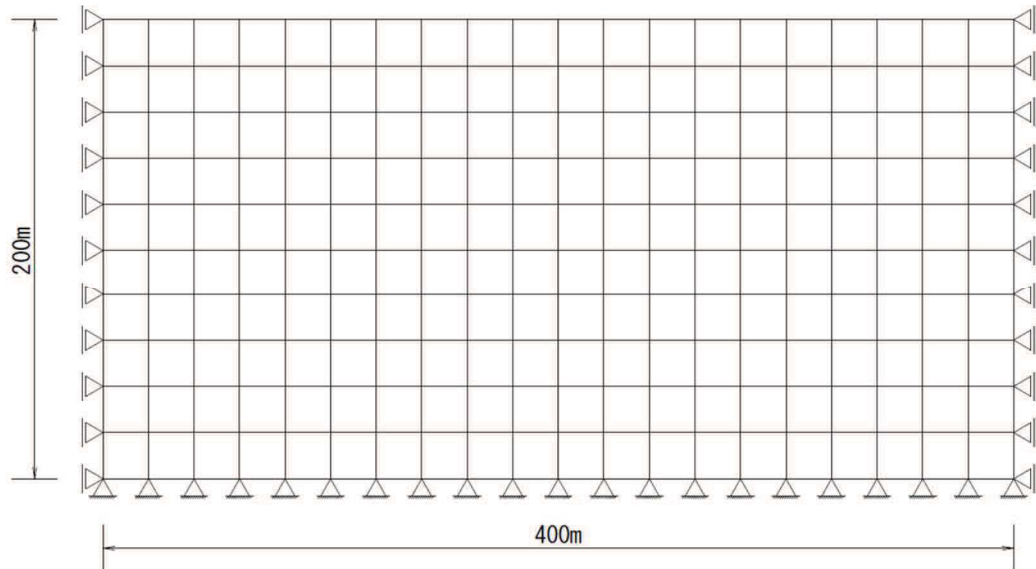


図3-4 解析モデル

#### (2) 解析条件

モデルサイズ : X400m×Y200m

物性値 :  $E=1.0 \times 10^6 \text{kN/m}^2$ ,  $\nu=0.49$ ,  $\gamma=20 \text{kN/m}^3$

境界条件 : 底面固定, 側方鉛直ローラー

荷重条件 : 自重のみ

(3) 解析結果

解析結果の応力分布図を図 3-5, 図 3-6 に示す。各図より結果はおおむね一致していることが確認できる。

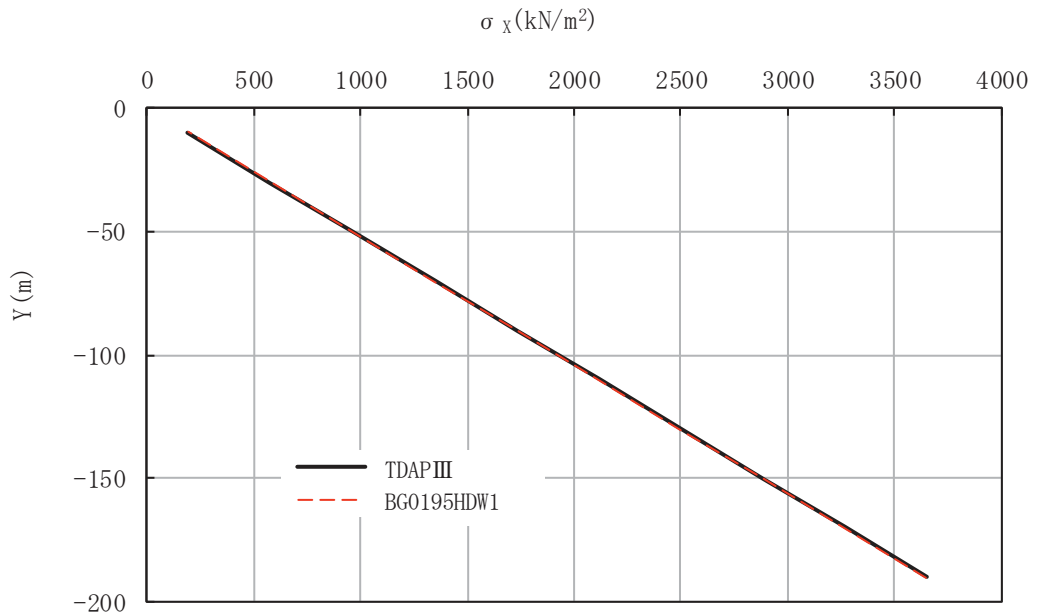


図3-5 水平応力  $\sigma_x$

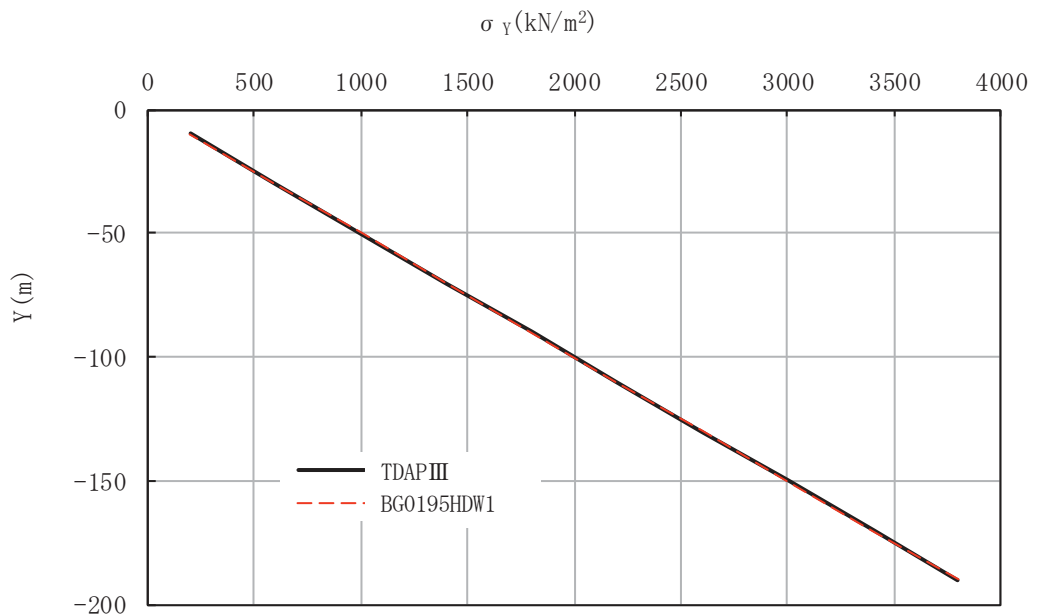


図3-6 鉛直応力  $\sigma_y$

### 3.5.3 評価結果

本解析コードの解析解とブシネスクの理論解との比較を行い、解析解が理論解とおおむね一致していることを確認した。また類似の汎用構造解析プログラム TDAPⅢの解析結果と本解析コードによる解析結果の比較を行い、解がおおむね一致していることを確認した。

以上のことから、本解析コードを本解析に使用することは妥当である。