

| | |
|------------------|------------|
| 東海第二発電所 工事計画審査資料 | |
| 資料番号 | 工認-676 改2 |
| 提出年月日 | 平成30年8月27日 |

V-5-44 計算機プログラム（解析コード）の概要・R E S P - T

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 RESP-T Ver. 5.1.3.4 | 4 |
| 2.2 RESP-T Ver. 5.1.2.2 | 4 |
| 3. 解析コードの検証 (RESP-T Ver. 5.1.3.4) | 5 |
| 4. 解析コードの検証 (RESP-T Ver. 5.1.2.2) | 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）RESP-T 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-2-2-37 | 防潮堤（鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁）の耐震性についての計算書 | Ver. 5.1.3.4 |
| V-3-別添 3-2-1-3 | 防潮堤（鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁）の強度計算書 | Ver. 5.1.3.4 |
| V-3-別添 3-2-1-4 | 防潮扉の強度計算書 | Ver. 5.1.3.4 |
| V-3-別添 3-2-3 | 構内排水路逆流防止設備の強度計算書 | Ver. 5.1.3.4 |
| V-2-11-2-12 | サービス建屋の耐震性についての計算書 | Ver. 5.1.2.2 |

2. 解析コードの概要

2.1 RESP-T Ver. 5.1.3.4

| | |
|-------------------------------------|--|
| 項目 \ コード名 | RESP-T |
| 使用目的 | 2次元はりモデルによる静的解析 |
| 開発機関 | 株式会社構造計画研究所 |
| 開発時期 | 1989年 |
| 使用したバージョン | Ver. 5.1.3.4 |
| コードの概要 | <p>(株)構造計画研究所によって開発され保守されている建築・土木構造物等の構造解析用の汎用市販コードである。</p> <p>建屋、機器及び配管を含む3次元構造物を、はり要素、配管要素、平面要素(面内要素)及びバネ要素に置換して、静的・動的非線形解析(応答解析を含む)を行うものである。</p> |
| 検証(Verification)及び妥当性確認(Validation) | <p>RESP-T Ver. 5.1.3.4は、鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の2次元フレームモデルを対象とした静的解析に使用している。</p> <p>【検証(Verification)】</p> <p>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"> ・本解析コードによる解析解と、既工事計画において実績のある別コード(Femap with NX Nastran)による解析解が概ね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> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は、下記のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、建築、土木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。 ・開発機関が提示するマニュアルにより、本工事計画で使用する2次元梁要素による静的フレーム解析が本解析コードで適用できることを確認している。 ・本解析コードの適用制限として使用節点数・要素数があるが、開発機関から提示された範囲内であることを確認している。 ・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画において使用されているものと異なるが、使用する機能に変更はないことを確認している。 |

2.2 RESP-T Ver. 5.1.2.2 (※建物, 構築物関連)

| | |
|---|--|
| 項目 | コード名 RESP-T |
| 使用目的 | 固有値解析及び弾塑性応答解析 |
| 開発機関 | 株式会社構造計画研究所 |
| 開発時期 | 1989年 |
| 使用したバージョン | Ver. 5.1.2.2 |
| コードの概要 | RESP-Tは、建築・土木構造物を対象とした静的解析及び時刻歴による地震応答解析を行う解析用プログラムである。建物の諸定数（せん断ばね、減衰定数、層高さ、質量等）を入力として、静的解析及びニューマークβ法を用いた地震応答解析を行うことができる。解析結果としては、加速度、変位、せん断力、曲げモーメント等が求められる。 |
| 検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation) | <p>RESP-Tは、サービス建屋の水平方向について、基準地震動 S_s に対する建屋の応答を評価するために使用している。</p> <p>【検証 (Verification)】 本解析コードの検証の内容は以下の通りである。 ・既工事計画において実績のある別コード (TDAPⅢ) による解析結果と一致することを確認している。 ・動作環境を満足する計算機にインストールして使用している。</p> <p>【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通りである。 ・検証の内容のとおり、弾塑性を考慮した多質点系の地震応答について検証していることから、解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。 ・地震応答解析に対して、川内原子力発電所1号機第1回工事計画認可申請書の3-16-1 (原子炉格納施設の地震応答解析) において、動的解析に使用された実績がある TDAPⅢを用いた解析解と、本コードによる解析解を比較した結果、双方の解が一致していることを確認した。 ・本工事計画における構造に対し使用する要素、応力解析及び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。</p> |

3. 解析コードの検証(Resp-T Ver. 5.1.3.4)

3.1 検証方法

Resp-T Ver 5.1.2 と Femap with NX Nastran Ver10.2 で 2次元静的フレーム解析の結果を比較する。

3.2 諸元

3.2.1 検証モデル

モデル化の条件：

- ・ T.P. + 0.0 = EL. + 0.0
- ・ はり要素(線形)及び地盤バネ(非線形)を用いる。
- ・ 被覆コンクリートは剛性を考慮せず、荷重のみを節点荷重として入力する。
- ・ 鋼管内は地表面より上は空洞、地表面より下は周辺地盤が詰まっているものとし、その剛性は考慮しない。
- ・ 杭間は 2.3m とする。

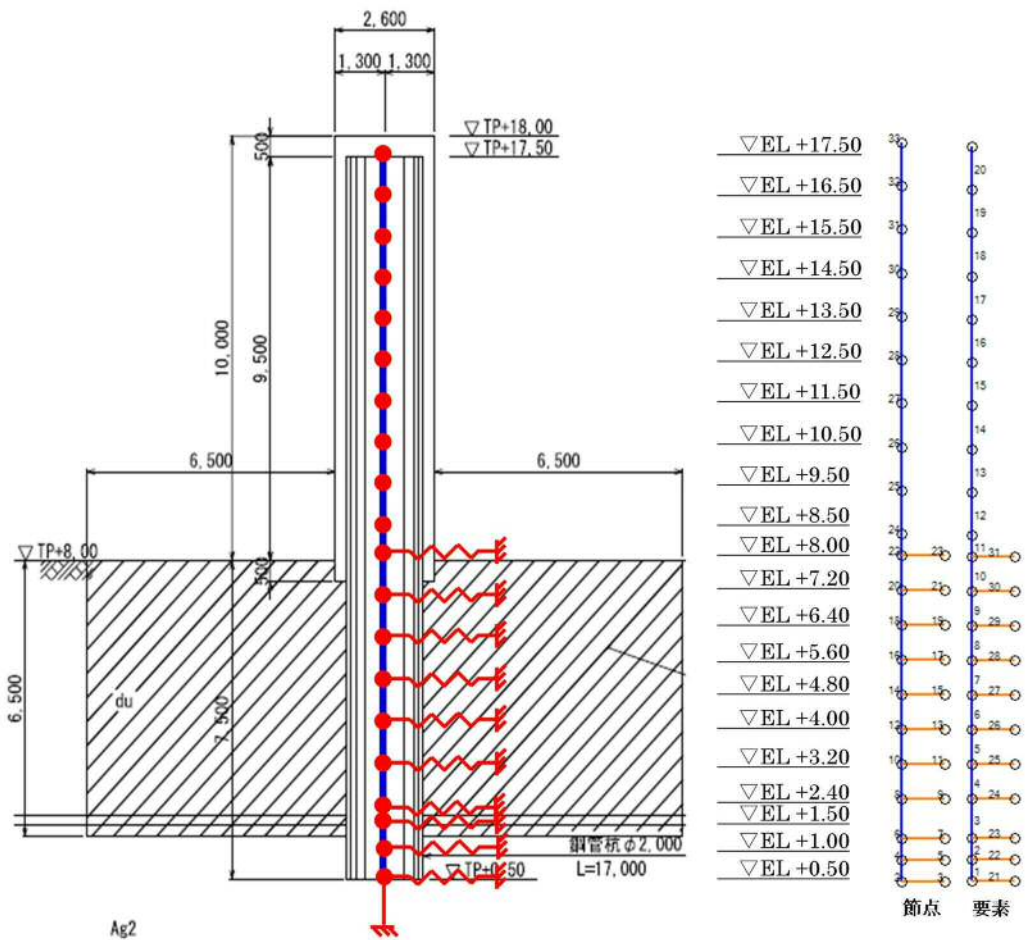


図 3-1 2次元フレーム解析モデル

3.2.2 検証ケース

検証ケースを表 3-1 に示す。

表 3-1 検証ケース

| ケース | 長期荷重 | | 地震 | | 津波 | 風 | 漂流物 | 動水圧 | その他 | 地盤バネの評価 | | 備考 |
|-----|------|-------|----|----|----|---|-----|-----|-----|---------|-----------|----------------------------|
| | 死荷重 | 積雪・降灰 | 本震 | 余震 | | | | | | 算定法 | 上限値 | |
| 津波時 | ○ | ○ | | | ○ | | ○ | | ○ | 静的地盤バネ | ピーク強度より算定 | 津波遡上 高さ T. P. +18.0m |

3.2.3 入力荷重

(1) 長期荷重

a. 死荷重

死荷重は被覆コンクリート、鋼管及び杭体内の土の重量とし、各節点の節点荷重とする。

b. 積雪

積雪は被覆コンクリートの水平面のみ作用するものとし、天端の節点の節点荷重とする。

c. 降灰

降灰は被覆コンクリートの水平面のみ作用するものとし、天端の節点の節点荷重とする。

表 3-2 長期荷重の節点荷重

| T. P. (m) | 支配 長さ (m) | 天端コン 節点荷重 (kN) | 被覆コン 節点荷重 (kN) | 鋼管 節点 荷重 (kN) | 地盤 改良層 荷重 (kN) | Ag2 層 荷重 (kN) | 積雪 節点 荷重 (kN) | 降灰 節点 荷重 (kN) |
|--------------|-----------------|----------------------|----------------------|------------------------|-------------------------|---------------------|------------------------|------------------------|
| 17.50 | 0.50 | -73.26 | -34.77 | -5.97 | 0.00 | 0.00 | -3.83 | -35.19 |
| 16.50 | 1.00 | 0.00 | -69.54 | -11.94 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 15.50 | 1.00 | 0.00 | -69.54 | -11.94 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 14.50 | 1.00 | 0.00 | -69.54 | -11.94 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 13.50 | 1.00 | 0.00 | -69.54 | -11.94 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 12.50 | 1.00 | 0.00 | -69.54 | -11.94 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 11.50 | 1.00 | 0.00 | -69.54 | -11.94 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 10.50 | 1.00 | 0.00 | -69.54 | -11.94 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 9.50 | 1.00 | 0.00 | -69.54 | -11.94 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 8.50 | 0.75 | 0.00 | -52.16 | -8.96 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 8.00 | 0.65 | 0.00 | -52.16 | -7.76 | -23.89 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 7.20 | 0.80 | 0.00 | 0.00 | -9.56 | -47.78 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 6.40 | 0.80 | 0.00 | 0.00 | -9.56 | -47.78 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 5.60 | 0.80 | 0.00 | 0.00 | -9.56 | -47.78 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 4.80 | 0.80 | 0.00 | 0.00 | -9.56 | -47.78 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 4.00 | 0.80 | 0.00 | 0.00 | -9.56 | -47.78 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 3.20 | 0.80 | 0.00 | 0.00 | -9.56 | -47.78 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 2.40 | 0.85 | 0.00 | 0.00 | -10.15 | -50.77 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 1.50 | 0.70 | 0.00 | 0.00 | -8.36 | -26.88 | -14.72 | 0.00 | 0.00 |
| 1.00 | 0.50 | 0.00 | 0.00 | -8.96 | 0.00 | -44.15 | 0.00 | 0.00 |
| 0.50 | 0.25 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 2.00 |

(2) 短期荷重

a. 設計波圧

各節点に作用する波圧は以下の計算により算出する。堤体外側から作用するものとする。

b. 漂流物

漂流物による荷重は道路橋示方書の式により算出する。堤体に対して最も厳しい評価とするため、津波が堤体高さまで遡上しているとし、上端の節点のみに漂流物の全荷重を被覆コンクリート面に垂直に作用させる。方向は堤外側からとする。

表 3-3 津波の節点荷重

| T. P. (m) | 支配長さ (m) | 設計波圧 節点荷重 (kN) | 漂流物 節点荷重 (kN) |
|--------------|-------------|----------------------|---------------------|
| 17.50 | 0.50 | 127.78 | 180.00 |
| 16.50 | 1.00 | 151.01 | 0.00 |
| 15.50 | 1.00 | 174.24 | 0.00 |
| 14.50 | 1.00 | 197.47 | 0.00 |
| 13.50 | 1.00 | 220.70 | 0.00 |
| 12.50 | 1.00 | 243.94 | 0.00 |
| 11.50 | 1.00 | 267.17 | 0.00 |
| 10.50 | 1.00 | 290.40 | 0.00 |
| 9.50 | 1.00 | 313.63 | 0.00 |
| 8.50 | 0.75 | 250.47 | 0.00 |
| 8.00 | 0.65 | 86.39 | 0.00 |
| 7.20 | 0.80 | 0.00 | 0.00 |
| 6.40 | 0.80 | 0.00 | 0.00 |
| 5.60 | 0.80 | 0.00 | 0.00 |
| 4.80 | 0.80 | 0.00 | 0.00 |
| 4.00 | 0.80 | 0.00 | 0.00 |
| 3.20 | 0.80 | 0.00 | 0.00 |
| 2.40 | 0.85 | 0.00 | 0.00 |
| 1.50 | 0.70 | 0.00 | 0.00 |
| 1.00 | 0.50 | 0.00 | 0.00 |
| 0.50 | 0.25 | 0.00 | 0.00 |

3.2.4 地盤バネ

2次元静的フレーム解析に用いる地盤バネは「道路橋示方書・同解説 IV下部構造物」の「9.6.2 地盤力反力係数」及び「12.10.4 断面力、杭頭反力及び変位の計算(2)の2)」に従い水平方向地盤反力係数を求め、さらに「11.5.2 地盤反力の上限值」と同じく「12.10.4 断面力、杭頭反力及び変位の計算(2)の2)」により上限値を設定するバイリニア型とする。

表 3-4 地盤バネ

| T. P. (m) | H (m) | E_0 (kN/m ²) | αE_0 (kN/m ²) | k_{H0} (kN/m ²) | $1/\beta$ (m) | k_H (kN/m ³) | k_h (kN/m) |
|--------------|----------|-------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------------|-----------------|
| 8.00 | 0.40 | 300000 | 600000 | 2000000 | 2.882 | 420338 | 336271 |
| 7.20 | 0.80 | 300000 | 600000 | 2000000 | 2.882 | 420338 | 672541 |
| 6.40 | 0.80 | 300000 | 600000 | 2000000 | 2.882 | 420338 | 672541 |
| 5.60 | 0.80 | 300000 | 600000 | 2000000 | 2.882 | 420338 | 672541 |
| 4.80 | 0.80 | 300000 | 600000 | 2000000 | 2.882 | 420338 | 672541 |
| 4.00 | 0.80 | 300000 | 600000 | 2000000 | 2.882 | 420338 | 672541 |
| 3.20 | 0.80 | 300000 | 600000 | 2000000 | 2.882 | 420338 | 672541 |
| 2.40 | 0.85 | 300000 | 600000 | 2000000 | 2.882 | 420338 | 714575 |
| 1.50 | 0.70 | 67200 | 537600 | 1792000 | 2.971 | 372370 | 564490 |
| 1.00 | 0.50 | 67200 | 537600 | 1792000 | 2.971 | 372370 | 372370 |
| 0.50 | 0.25 | — | — | — | — | — | 186185 |

表 3-5 上限値

| T. P. (m) | 支配 長さ H (m) | 粘着力 C (kN/m ²) | 内部 摩擦角 ϕ (°) | 地表面と 水平面の 角度 α (°) | 杭と土 の 摩擦角 δE (°) | 有効 上載圧 q (kN/m ²) | 受動 土圧 係数 K _{EP} | 水平地盤 反力度 P _u (kN/m ²) | 係数 $\eta_p \alpha_p$ | 上限値 P _h (kN) |
|--------------|----------------------|----------------------------------|----------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--|-----------------------------------|---|-------------------------|-------------------------------|
| 8.00 | 0.40 | 500.0 | 0.0 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 1016.00 | 1.50 | 1219.2 |
| 7.20 | 0.80 | 500.0 | 0.0 | 0.00 | 0.00 | 16.00 | 1.00 | 1032.00 | 1.50 | 2457.6 |
| 6.40 | 0.80 | 500.0 | 0.0 | 0.00 | 0.00 | 32.00 | 1.00 | 1048.00 | 1.50 | 2496.0 |
| 5.60 | 0.80 | 500.0 | 0.0 | 0.00 | 0.00 | 48.00 | 1.00 | 1064.00 | 1.50 | 2534.4 |
| 4.80 | 0.80 | 500.0 | 0.0 | 0.00 | 0.00 | 64.00 | 1.00 | 1080.00 | 1.50 | 2572.8 |
| 4.00 | 0.80 | 500.0 | 0.0 | 0.00 | 0.00 | 80.00 | 1.00 | 1096.00 | 1.50 | 2611.2 |
| 3.20 | 0.80 | 500.0 | 0.0 | 0.00 | 0.00 | 96.00 | 1.00 | 1112.00 | 1.50 | 2649.6 |
| 2.40 | 0.85 | 500.0 | 0.0 | 0.00 | 0.00 | 112.00 | 1.00 | 1130.00 | 1.50 | 2859.9 |
| 1.50 | 0.70 | 81.0 | 36.7 | 0.00 | -6.12 | 130.00 | 4.96 | 1055.32 | 1.15 | 2317.0 |
| 1.00 | 0.50 | 81.0 | 36.7 | 0.00 | -6.12 | 134.95 | 4.96 | 1079.88 | 1.15 | 1227.7 |
| 0.50 | 0.25 | 81.0 | 36.7 | 0.00 | -6.12 | 139.89 | 4.96 | 1104.44 | 1.15 | 620.9 |

3.2.5 鋼管杭の物性

表 3-6 鋼管杭の物性

【 $\phi=2000\text{mm}$, $t=25\text{mm}$ 】

| 管種 SKK490*1 | 外形 ϕ (mm) | 長さ L (mm) | 厚さ t (mm) | 単位質量 w(kg/m) | ヤング係数*3 E(N/mm ²) |
|-------------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---|----------------------------------|
| | 2,000 | 17,000 | 25 | 1218 | 2.0×10^5 |
| | 断面積 A (m ²) | 断面係数 Z (m ³) | 断面 2 次モーメント I (m ⁴) | 有効せん断 断面積 A _s *2 (m ²) | ポアソン比*3 ν |
| $14,884 \times 10^{-5}$ | 726×10^{-4} | 725×10^{-4} | $14,884 \times 10^{-5}$ | 0.30 | |

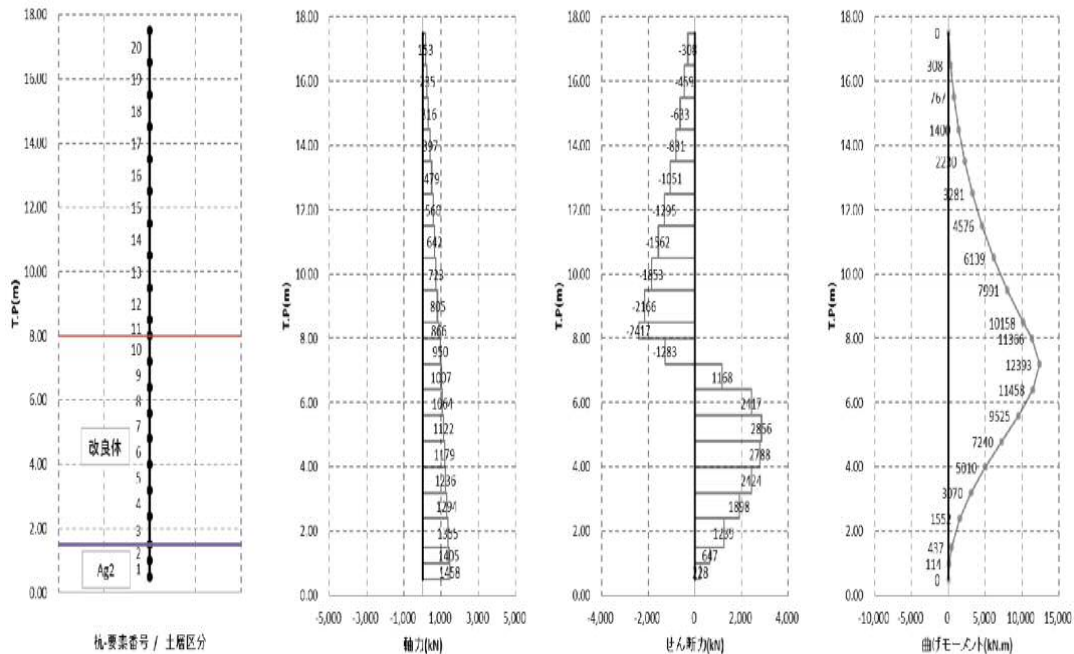
注記 *1: JFE スチール株式会社 「JFE の鋼管杭」 より

*2: 有効せん断断面積比は 1.0 とした

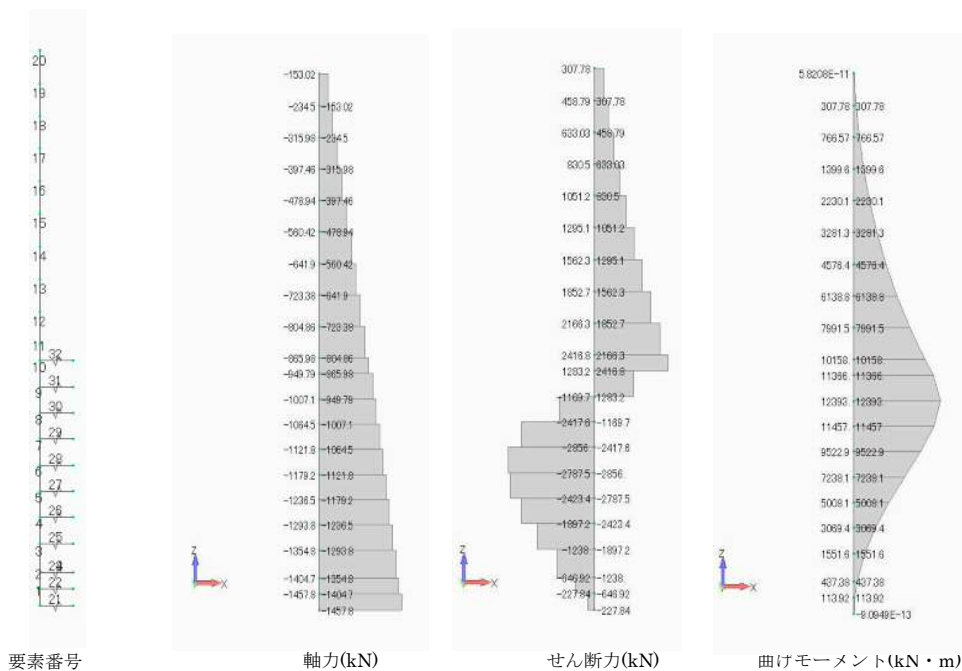
*3: 「道路橋示方書・同解説 I 共通編」 「3.3 設計計算に用いる物理定数」 (P.86) より

3.3 結果比較

3.3.1 断面力



(1) RESP-T



(2) Femap with NX Nastran

図 3-2 断面力図

表 3-7 断面力の比較

| 要素 番号 | 軸力 (kN) | | |
|----------|---------|---------|-------|
| | RESP-T | NASTRAN | 差異の比率 |
| 1 | 1457.82 | 1457.82 | 0.00% |
| 2 | 1404.71 | 1404.71 | 0.00% |
| 3 | 1354.75 | 1354.75 | 0.00% |
| 4 | 1293.83 | 1293.83 | 0.00% |
| 5 | 1236.49 | 1236.49 | 0.00% |
| 6 | 1179.15 | 1179.15 | 0.00% |
| 7 | 1121.81 | 1121.81 | 0.00% |
| 8 | 1064.47 | 1064.47 | 0.00% |
| 9 | 1007.13 | 1007.13 | 0.00% |
| 10 | 949.79 | 949.79 | 0.00% |
| 11 | 865.98 | 865.98 | 0.00% |
| 12 | 804.86 | 804.86 | 0.00% |
| 13 | 723.38 | 723.38 | 0.00% |
| 14 | 641.90 | 641.90 | 0.00% |
| 15 | 560.42 | 560.42 | 0.00% |
| 16 | 478.94 | 478.94 | 0.00% |
| 17 | 397.46 | 397.46 | 0.00% |
| 18 | 315.98 | 315.98 | 0.00% |
| 19 | 234.50 | 234.50 | 0.00% |
| 20 | 153.02 | 153.02 | 0.00% |

| 要素 番号 | せん断力 (kN) | | |
|----------|-----------|----------|--------|
| | RESP-T | NASTRAN | 差異の比率 |
| 1 | 227.64 | 227.84 | -0.09% |
| 2 | 647.35 | 646.92 | 0.07% |
| 3 | 1238.54 | 1238.04 | 0.04% |
| 4 | 1897.66 | 1897.23 | 0.02% |
| 5 | 2424.01 | 2423.40 | 0.03% |
| 6 | 2787.84 | 2787.53 | 0.01% |
| 7 | 2856.09 | 2856.02 | 0.00% |
| 8 | 2416.78 | 2417.55 | -0.03% |
| 9 | 1168.30 | 1169.68 | -0.12% |
| 10 | -1283.16 | -1283.16 | 0.00% |
| 11 | -2416.81 | -2416.81 | 0.00% |
| 12 | -2166.34 | -2166.34 | 0.00% |
| 13 | -1852.71 | -1852.71 | 0.00% |
| 14 | -1562.31 | -1562.31 | 0.00% |
| 15 | -1295.14 | -1295.14 | 0.00% |
| 16 | -1051.20 | -1051.20 | 0.00% |
| 17 | -830.50 | -830.50 | 0.00% |
| 18 | -633.03 | -633.03 | 0.00% |
| 19 | -458.79 | -458.79 | 0.00% |
| 20 | -307.78 | -307.78 | 0.00% |

| 要素 番号 | 曲げモーメント I端 (kN・m) | | |
|----------|-------------------|-----------|--------|
| | RESP-T | NASTRAN | 差異の比率 |
| 1 | 0.00 | 0.00 | 0.00% |
| 2 | -113.82 | -113.92 | -0.09% |
| 3 | -437.49 | -437.38 | 0.03% |
| 4 | -1552.18 | -1551.61 | 0.04% |
| 5 | -3070.31 | -3069.39 | 0.03% |
| 6 | -5009.52 | -5008.11 | 0.03% |
| 7 | -7239.79 | -7238.13 | 0.02% |
| 8 | -9524.66 | -9522.95 | 0.02% |
| 9 | -11458.10 | -11456.99 | 0.01% |
| 10 | -12392.70 | -12392.73 | 0.00% |
| 11 | -11366.20 | -11366.21 | 0.00% |
| 12 | -10157.80 | -10157.80 | 0.00% |
| 13 | -7991.46 | -7991.46 | 0.00% |
| 14 | -6138.75 | -6138.75 | 0.00% |
| 15 | -4576.44 | -4576.44 | 0.00% |
| 16 | -3281.30 | -3281.30 | 0.00% |
| 17 | -2230.10 | -2230.10 | 0.00% |
| 18 | -1399.60 | -1399.60 | 0.00% |
| 19 | -766.57 | -766.57 | 0.00% |
| 20 | -307.78 | -307.78 | 0.00% |

4. 解析コードの検証(Resp-T Ver. 5.1.2.2)

4.1 Resp-T の解析手法について

(1) 一般事項

Resp-T は、構造計画研究所が開発したプログラムであり、時間領域における構造解析用計算機コードである。Resp-T は、サービス建屋の水平方向の地震応答解析における質点系地盤連成モデルの応答を評価するために使用している。

(2) 解析コードの特徴

Resp-T の主な特徴を以下に示す。

- ・ばね要素やはり要素などでモデル化した、多質点系の応答解析を行う。
- ・質量は、集中質量として評価する。
- ・要素に非線形特性を設定し、非線形解析を行うことができる。
- ・ひずみエネルギー比例型及びレーリー減衰型の減衰を用いることができる。
- ・固有値解析は、サブスペース法による。
- ・応答解析は、時間領域の直接積分法による。

(3) 解析手法

a. 固有値解析

多自由度系の運動方程式は以下の式で表される。

$$[M] \{\ddot{u}\} + [C] \{\dot{u}\} + [K] \{u\} = \{f\} \quad (4.1-1)$$

ここで、

- [M] : 質量マトリクス
- [C] : 減衰マトリクス
- [K] : 剛性マトリクス
- $\{\ddot{u}\}$: 加速度ベクトル
- $\{\dot{u}\}$: 速度ベクトル
- $\{u\}$: 変位ベクトル
- $\{f\}$: 外力ベクトル

(4.1-1)式の荷重ベクトルを $\{0\}$ とし、減衰項を除いた自由振動を表す方程式は以下の式で表される。

$$[M] \{\ddot{u}\} + [K] \{u\} = \{0\} \quad (4.1-2)$$

(4.1-2)式の変位 $\{u\}$ に調和振動を仮定すると次のような関係が得られる。

$$(-\omega_r^2 [M] + [K]) \{u_r\} = \{0\} \quad (4.1-3)$$

一般に、 $\{u_r\} = \{0\}$ 以外の(4.1-3)式を満足する ω_r 及び $\{u_r\}$ を求めることを固有値問題と呼び、 ω_r を固有値、 $\{u_r\}$ を固有ベクトルという。

b. ひずみエネルギー比例型減衰

建屋の減衰は、各次の振動モードにおける部材のひずみエネルギーに比例するものとして以下の式から設定する。

$$h_i = \frac{\sum_k h_0^j E_i^j}{\sum_k E_i^j} \quad (4.1-4)$$

ただし、

$$E_i^j = \frac{1}{2} \{ \phi_i^j \}^T [k^j] \{ \phi_i^j \}$$

ここで、

h_0^j : j 部材の減衰定数

$[k^j]$: j 部材の剛性マトリクス

$\{ \phi_i^j \}$: i 次の振動モードにおける j 部材の材端変位ベクトル

c. 直接積分法

直接積分法はニューマークの β 法を用いる。n ステップの変位 $\{u_n\}$ 、速度 $\{\dot{u}_n\}$ 及び加速度 $\{\ddot{u}_n\}$ が既知の場合、次の (n+1) ステップの変位及び速度は β 及び γ をパラメータとして、以下の式で表される。

$$\{\dot{u}_{(n+1)}\} = \{\dot{u}_n\} + (1-\gamma) \{\ddot{u}_n\} + \gamma \{\ddot{u}_{(n+1)}\} \quad (4.1-5)$$

$$\{u_{(n+1)}\} = \{u_n\} + \Delta t \{\dot{u}_n\} + \frac{\Delta t^2}{2} \{\ddot{u}_n\} + \beta \Delta t^2 (\{\ddot{u}_{(n+1)}\} - \{\ddot{u}_n\}) \quad (4.1-6)$$

(4.1-5) 式及び (4.1-6) 式を (2.4.2-1) 式に代入し、 $\{\dot{u}_{(n+1)}\}$ 及び $\{\ddot{u}_{(n+1)}\}$ を消去すると、変位増分に対する次のような関係が得られる。

$$[\bar{K}] (\{u_{(n+1)}\} - \{u_n\}) = \{\bar{f}\} \quad (4.1-7)$$

ただし、

$$[\bar{K}] = [K] + \frac{1}{\beta \Delta t^2} [M] + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} [C]$$

$$\{\bar{f}\} = \{f_{(n+1)}\} - \{f_n\} + [M] \left(\frac{1}{\beta \Delta t} \{\dot{u}_n\} + \frac{1}{2\beta} \{\ddot{u}_n\} \right) + [C] \left\{ \frac{\gamma}{\beta} \{\dot{u}_n\} + \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) \Delta t \{\ddot{u}_n\} \right\}$$

(4.1-7) 式から、(n+1) ステップの変位が得られ、速度及び加速度を得ることができる。

(4) 解析フローチャート

解析フローチャートを図 4.1-1 に示す。

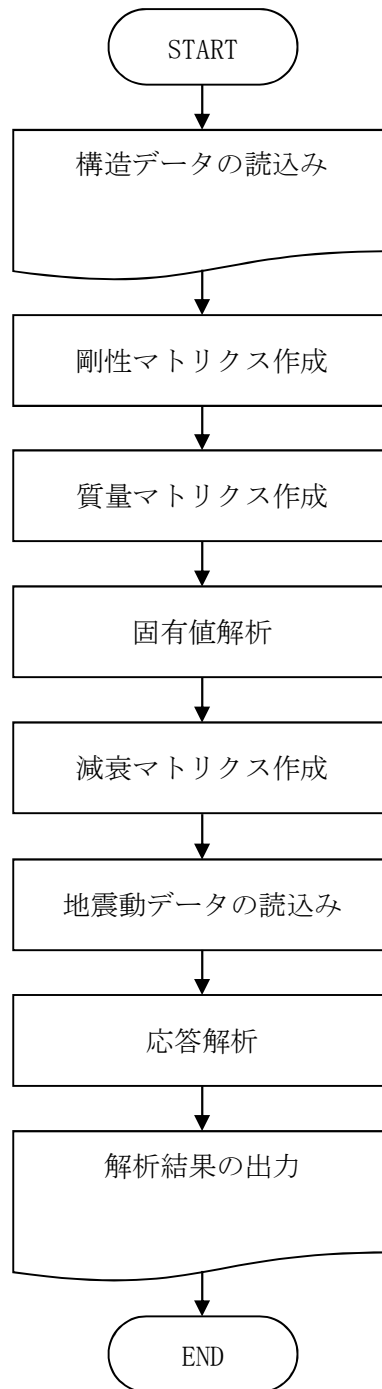


図 4.1-1 解析フローチャート

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

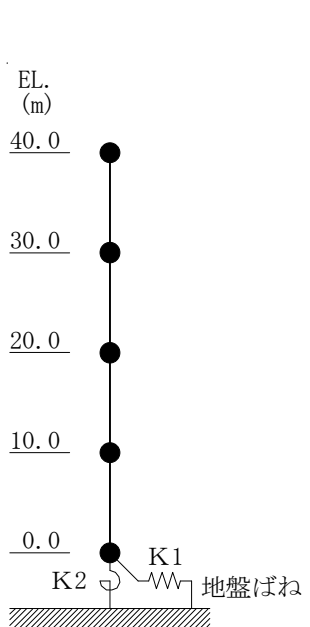
a. 他コードとの比較による検証

例題に対して、市販されている汎用構造解析プログラム「TDAPⅢ Ver. 3.09」(大成建設株式会社/株式会社アーク情報システム)との比較を行う。なお、「TDAPⅢ ver. 3.05」は、川内原子力発電所第1号機の工事計画で実績がある。

解析モデルの諸元を表 4.1-1～表 4.1-4 に、検討に用いる入力地震動を図 4.1-2 に、解析結果の比較を図 4.1-3 に示す。

図より、RESP-T の結果は TDAPⅢ による結果と良い一致を示していることが確認できる。

表 4.1-1 解析モデル諸元



| EL. (m) | 重量 W (kN) | 回転慣性重量 I_g ($\times 10^6 \text{kN}\cdot\text{m}^2$) | せん断断面積 A_s (m^2) | 断面2次モーメント I (m^4) |
|---------|-----------|---|-------------------------------|--------------------------------|
| 40.0 | 150,000 | 3.0 | | |
| 30.0 | 200,000 | 4.0 | 100 | 20,000 |
| 20.0 | 250,000 | 5.0 | 150 | 30,000 |
| 10.0 | 300,000 | 6.0 | 200 | 40,000 |
| 0.0 | 400,000 | 8.0 | 250 | 50,000 |

表 4.1-2 材料定数

| ヤング係数 E (N/mm^2) | せん断弾性係数 G (N/mm^2) | 減衰定数 h (%) |
|--------------------------------------|--|--------------|
| 22100 | 9210 | 5 |

表 4.1-3 (1/2) 復元力特性 ($\tau - \gamma$ 関係)

| 要素 番号 | τ_1 (N/mm ²) | τ_2 (N/mm ²) | τ_3 (N/mm ²) | γ_1 ($\times 10^{-3}$) | γ_2 ($\times 10^{-3}$) | γ_3 ($\times 10^{-3}$) |
|----------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 1 | 1.79 | 2.42 | 5.46 | 0.194 | 0.582 | 4.0 |
| 2 | 1.96 | 2.65 | 5.75 | 0.213 | 0.639 | 4.0 |
| 3 | 2.08 | 2.81 | 6.09 | 0.226 | 0.678 | 4.0 |
| 4 | 2.18 | 2.94 | 6.50 | 0.237 | 0.711 | 4.0 |

表 4.1-3 (2/2) 復元力特性 (M- ϕ 関係)

| 要素 番号 | M ₁ ($\times 10^6$ kN \cdot m) | M ₂ ($\times 10^6$ kN \cdot m) | M ₃ ($\times 10^6$ kN \cdot m) | ϕ_1 ($\times 10^{-6}$ 1/m) | ϕ_2 ($\times 10^{-6}$ 1/m) | ϕ_3 ($\times 10^{-6}$ 1/m) |
|----------|---|---|---|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 2.29 | 5.74 | 9.40 | 5.18 | 46.0 | 415 |
| 2 | 4.06 | 10.8 | 17.0 | 6.12 | 48.0 | 350 |
| 3 | 6.11 | 16.9 | 26.1 | 6.91 | 49.4 | 312 |
| 4 | 8.46 | 24.0 | 36.6 | 7.66 | 50.7 | 286 |

表 4.1-4 地盤のばね定数と減衰係数

| ばね 番号 | 質点 番号 | 地盤ばね 成分 | ばね定数 K _c | 減衰係数 C _c |
|----------|----------|------------|---------------------------------------|--|
| K1 | 5 | 底面・並進 | 4.0×10^7 kN/m | 1.0×10^6 kN \cdot s/m |
| K2 | 5 | 底面・回転 | 3.0×10^{10} kN \cdot m/rad | 3.0×10^8 kN \cdot m \cdot s/rad |

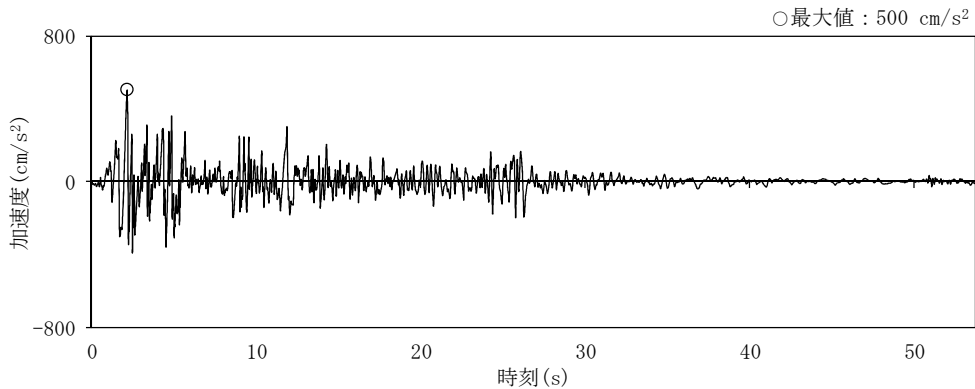
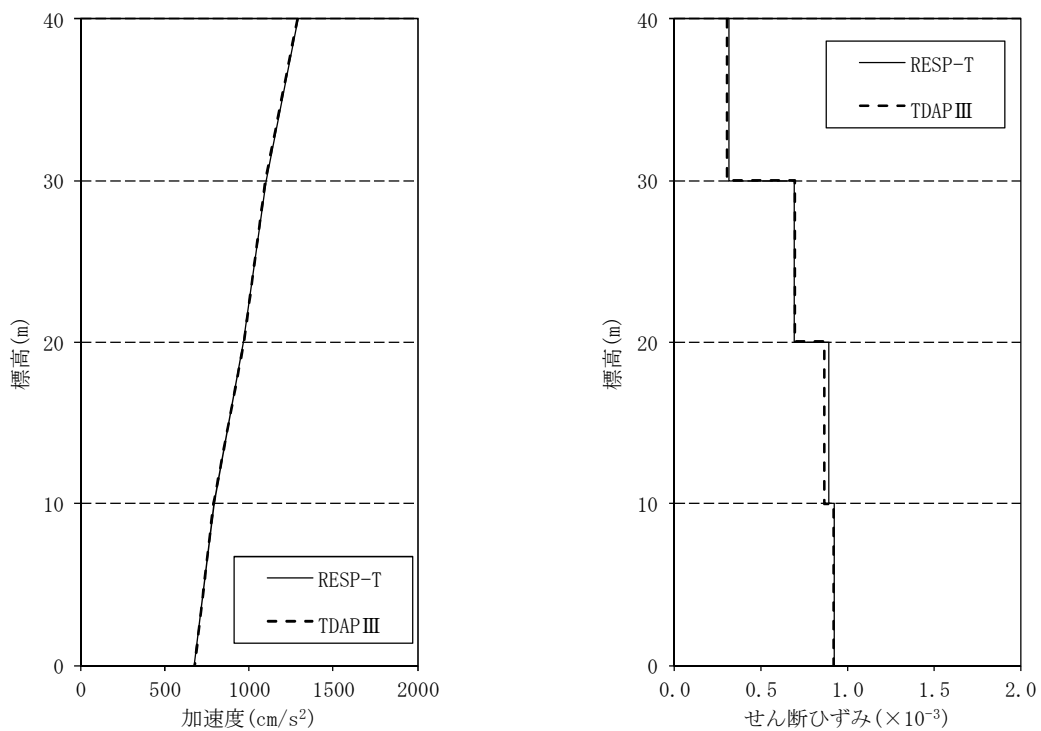


図 4.1-1 入力地震動



(a) 加速度

(b) せん断ひずみ

図 4.1-3 解析結果の比較 (最大応答分布)

b. 使用内容に対する妥当性

サービス建屋の地震応答解析に RESP-T 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、弾塑性を考慮した多質点系の地震応答について検証していることから、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。