

---

自由曲面からなる高層構造物－天道白衣大観音像－の耐震設計

Aseismic Design of High-Rise Thin Shell Structure—the Goddess-of-Mercy Statue in Sendai

武元 弘之(Hiroyuki Takemoto) 浦田 勲(Isao Urata) 森田 昌敏(Masatoshi Morita) 安田 博和(Hirokazu Yasuda) 田中 晃(Akira Tanaka) 黒木 康文(Yasufumi Kuroki)

---

要旨：

天道白衣大観音像は 100m の高さをもつ鉄筋コンクリート構造の観音像である。この観音像の設計において、大地震を想定した弾塑性地震応答解析を行うため観音像を楕円筒の集合体に近似した設計モデルに置換し、地震応答解析を行った。また観音像の特異な形状に着目した種々の構造解析を行い、耐震安全性を十分に検討した。本報では天道白衣大観音像の耐震設計の概要について述べ、自由曲面からなる高層構造物のモデル化手法とその解析結果について紹介する。

---

Synopsis：

The statue of the "Goddess of Mercy (Tendo-Hakui-Kannon)" is a reinforced concrete structure with a height of 100 meters. To predict the elastic and plastic behavior of this statue in a major earthquake, a basic design model was adopted in which a series of ellipsoids approximates the configuration of the statue. Aseismic safety was also examined with respect to the complex surfaces unique to the statue using structural analysis models. As reported here, the aseismic design of the statue involved analysis methods applicable to high-rise, free-form thin shell structures.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

|                   |
|-------------------|
| 本文は次のページから閲覧できます。 |
|-------------------|

# 自由曲面からなる高層構造物—天道白衣大観音像— の耐震設計\*

川崎製鉄技報  
20 (1988) 4, 337-343

## Aseismic Design of High-Rise Thin Shell Structure— the Goddess-of-Mercy Statue in Sendai



武元 弘之

Hiroyuki Takemoto

エンジニアリング事業  
部 建築技術部開発設  
計室 主査(部長)



浦田 勲

Isao Urata

エンジニアリング事業  
部 建築技術部建築技  
術室 主査(課長)



森田 昌敏

Masatoshi Morita

エンジニアリング事業  
部 建築技術部建築技  
術室 主査(掛長)



安田 博和

Hirokazu Yasuda

エンジニアリング事業  
部 建築技術部開発設  
計室



田中 晃

Akira Tanaka

(株)熊谷組 建築本部  
設計第3部 課長代理



黒木 康文

Yasufumi Kuroki

(株)熊谷組 原子力開  
発室建築技術部

### 1 はじめに

宮城県仙台市において建設が計画されている天道白衣大観音像は最高高さが地上100.0mの観音像である。川崎製鉄エンジニアリング事業部は川鉄エンジニアリング株式会社および株式会社熊谷組と共同でこの観音像の設計を行った。構造形式は観音像の外形をそのまま構造体とする鉄筋コンクリート構造で、鉄筋コンクリート構造の観音像としては日本最大の規模となる<sup>1)</sup>。

この構造物の特色は構造体が自由曲面で構成されている点にある。このため構造設計においては、

- (1) 自由曲面からなる高層構造物への地震入力
- (2) 断面急変部への応力集中・曲面壁の局部変形
- (3) 質量の偏在によるねじれ
- (4) 立像の軸心の折れ曲がりによる応力の発生

\* 昭和63年8月23日原稿受付

### 要旨

天道白衣大観音像は100mの高さをもつ鉄筋コンクリート構造の観音像である。この観音像の設計において、大地震を想定した弾塑性地震応答解析を行うため観音像を楕円筒の集合体に近似した設計モデルに置換し、地震応答解析を行った。また観音像の特異な形状に着目した種々の構造解析を行い、耐震安全性を十分に検討した。

本報では天道白衣大観音像の耐震設計の概要について述べ、自由曲面からなる高層構造物のモデル化手法とその解析結果について紹介する。

### Synopsis:

The statue of the "Goddess of Mercy (Tendo-Hakui-Kannon)" is a reinforced concrete structure with a height of 100 meters. To predict the elastic and plastic behavior of this statue in a major earthquake, a basic design model was adopted in which a series of ellipsoids approximates the configuration of the statue. Aseismic safety was also examined with respect to the complex surfaces unique to the statue using structural analysis models. As reported here, the aseismic design of the statue involved analysis methods applicable to high-rise, free-form thin shell structures.

等について検討を行う必要がある。

今回の設計では目的に応じて複数の解析モデルを作成し、各々の解析結果を比較することによって構造物の性状を全体的に把握する手法をとった。なぜならば3次元の大規模な自由曲面構造物を精密にモデル化し、かつ材料非線形性を考慮した弾塑性解析を行うには時間面、技術面での制約が多いからである。

本報では天道白衣大観音像の概要について述べ耐震設計で行った種々の解析について報告する。

### 2 観音像の概要

天道白衣大観音像の原型となった模型(像高2m)をPhoto 1に、観音像の立断面図をFig. 1に示す。本観音像は立像部と台座部からなり、台座部は直径が33.75mの円形平面をもつ鉄筋コンクリート構造である。

立像部は楕円形に近い平面をもつ鉄骨コンクリート構造であり、楕円断面の長径×短径は最下部で約24.5×17.8mの大きさをもつ。台座を除く立像部の全高は92mで23mの頭と69mの体を持ち、台座を含む観音像全体の高さは地上100mである。立像部の中心にはエレベーターシャフトを設け、それを取り囲むように壁の内部に沿ってらせん階段を設置している。



Photo 1 Archetype for the statue of Goddess of Mercy (Tendo-Hakui-Kannon)

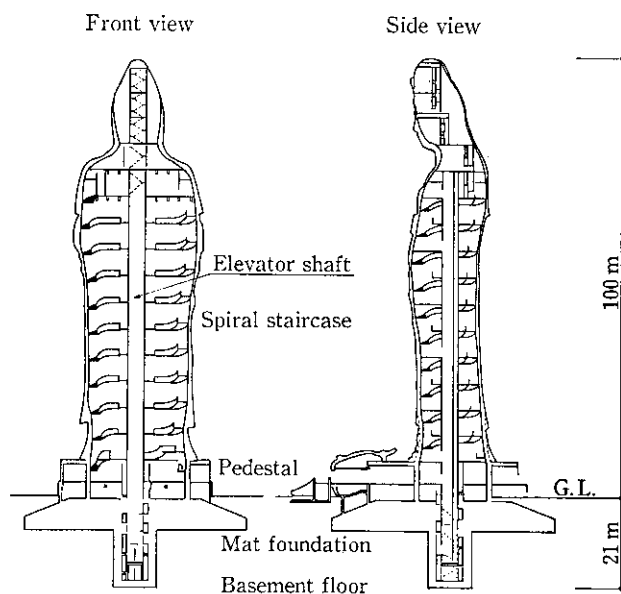


Fig. 1 Sectional view of the statue

基礎は八角形の平面をもつ直接基礎で、基礎中央から地下21mの深さまで突出した地下室を設ける。

### 3 耐震安全性の検討

耐震設計は、設計用地震力の算定、静的応力解析、断面算定および地震応答解析による耐震安全性の判定という手順で進めた。ここでは耐震設計で行った地震応答解析について述べる。

#### 3.1 耐震安全性の判定方針

耐震設計における地震動の強さは2種類のレベルを設定した。

Table 1 Seismic waves and maximum accelerations used in earthquake response analysis

| Name of seismic waves | Max. acceleration (cm/s <sup>2</sup> ) |           | Duration time for analysis (s) |
|-----------------------|----------------------------------------|-----------|--------------------------------|
|                       | Level 1*1                              | Level 2*2 |                                |
| EL CENTRO 1940 NS     | 255.4                                  | 510.8     | 20.0                           |
| TAFT 1952 EW          | 248.4                                  | 496.8     | 20.0                           |
| SENDAI501 1962 NS     | 415.5                                  | 831.0     | 13.98                          |
| THO30 1FL 1978 EW     | 183.7                                  | 367.4     | 20.0                           |

\*1 Maximum velocity=25 cm/s

\*2 Maximum velocity=50 cm/s

(1) レベル1: 構造物の耐用年数を100年とし、その期間における再現期待値から定めた強さ

(2) レベル2: 建設地で最強の地震動と考えられる強さ

具体的には基盤への入力強さを過去の歴史地震、活断層、建設地周辺における地震動期待値の既往の研究結果等により定め、水平多層地盤振動応答解析によって建設地での基盤から地表への増幅特性を調べた。その結果レベル1では最大速度振幅を25 cm/sとし、レベル2はこの振幅の2倍とした。地震応答解析に使用した地震動波形4波と各々の地震波の最大加速度をTable 1に示す。

これらの地震動に対して地震応答解析を行い、以下の方針によって耐震安全性を判定した。

- (1) レベル1の地震動に対して構造物を弾性範囲（コンクリートのひび割れを許し鉄筋およびコンクリートの降伏強度以下の範囲）に納める。
- (2) レベル2の地震動に対して構造物の崩壊を防ぐ（塑性率が2.0以下となることを条件とした）。

#### 3.2 設計用地震応答解析モデル

耐震設計の基本となる地震応答解析モデル（設計モデル）は以下に基づいて作成した。

- (1) 基礎部を固定とする33質点の曲げせん断系を採用する。またモデルを構成する部材の軸折れを考慮する（Fig. 2）。
- (2) 立像を楕円筒断面に近似して取り扱う。すなわち高さ方向に立像を33ブロックの楕円筒に分割して各々の筒体の初期剛性、質量、復元力特性を算出し、これら33個の筒体が軸折れをもちながら高さ方向に積み上げられた「楕円筒の集合体」として立像の形状を近似した。
- (3) 立像の断面を楕円筒に置換するとき、構造壁として耐力を期待する部分と期待しない仕上げ部分（ふかし部）に分けて考え、ふかし部にはその質量を考慮する。Fig. 3に立像の水平断面の例を示す。
- (4) 自由度は、平面内の水平・垂直変位、面内回転変位とする。
- (5) 減衰機構は内部粘性型とし1次減衰定数を5%とする。
- (6) 曲げ復元力特性にはピーク指向型 Tri-linear モデルを採用する。第1折点はコンクリートのひび割れ発生時、第2折点は引張側最外縁鉄筋の降伏開始時とし、圧縮側縁コンクリートの圧壊をもって終局状態とする。
- (7) せん断復元力特性として原点指向型 Tri-linear モデルを採用する。第1折点はせん断ひび割れ発生時、第2折点は第1折点の応力度の1.5倍とし、ひずみ度の算出に黒正式<sup>2)</sup>を用いて第2折点および終局状態を定める。
- (8) 復元力特性の第2折点をもって塑性率1.0の点とする。

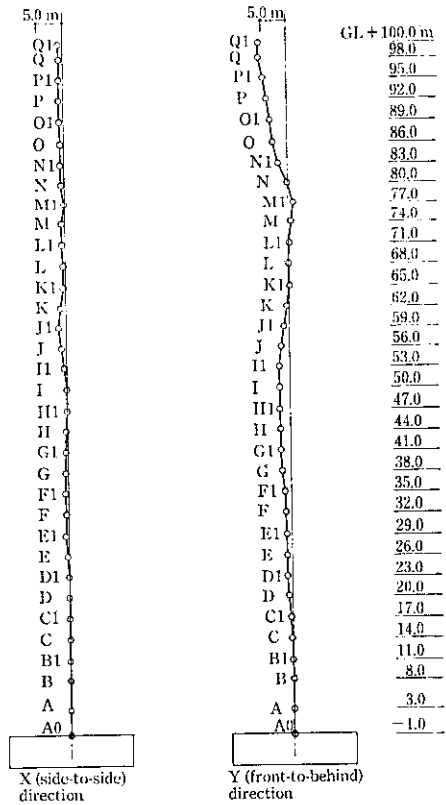


Fig. 2 Basic model for the earthquake response analysis

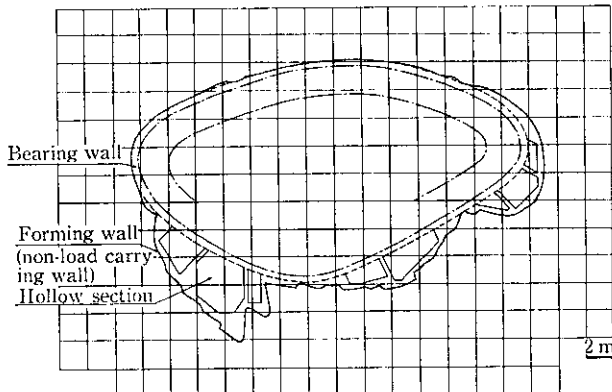


Fig. 3 Typical horizontal section of the statue (62.0 meters high from ground level)

上述の条件のうち、(1)～(4)は今回採用した解析上の仮一定であるが、自由曲面構造物をモデル化するうえで実用性のある手法の一つと考えられる。

### 3.3 地震応答解析結果

レベル1の地震動に対する最大応答せん断力をFig. 4に、最大応答曲げモーメントをFig. 5に示す。また曲げ復元力特性とレベル2の地震動に対する最大応答曲げモーメントとの関係をFig. 6に示す。これらの図はいずれも観音像の正面方向(Y方向)に関する解析結果を示す。

レベル1の地震動に対する最大応答値はせん断力および曲げモーメントとも降伏耐力を超えなかった。レベル2においてもひび割れ時のモーメント値は超えるが、曲げモーメントとせん断力の応答値は降伏耐力以下であり塑性率は1.0を超えないことが示された。

以上より本構造物はレベル1, 2の地震動に対して安全であることが証明された。

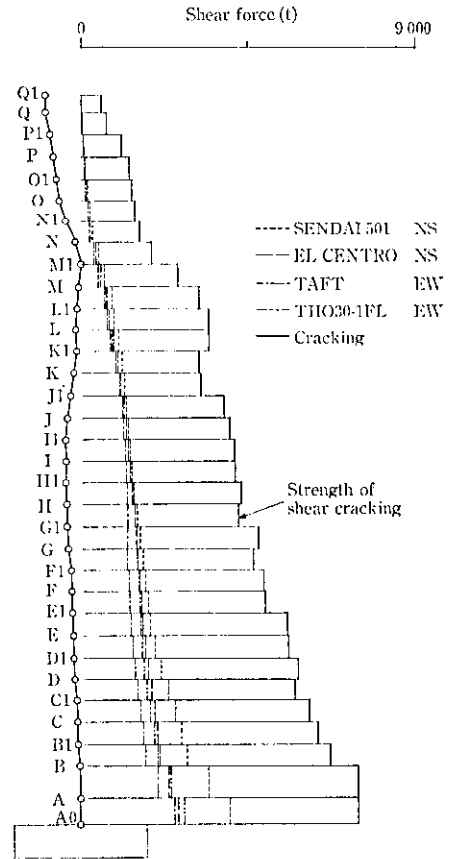


Fig. 4 Maximum shear forces to seismic waves at intensity level 1, Y (front-to-back) direction

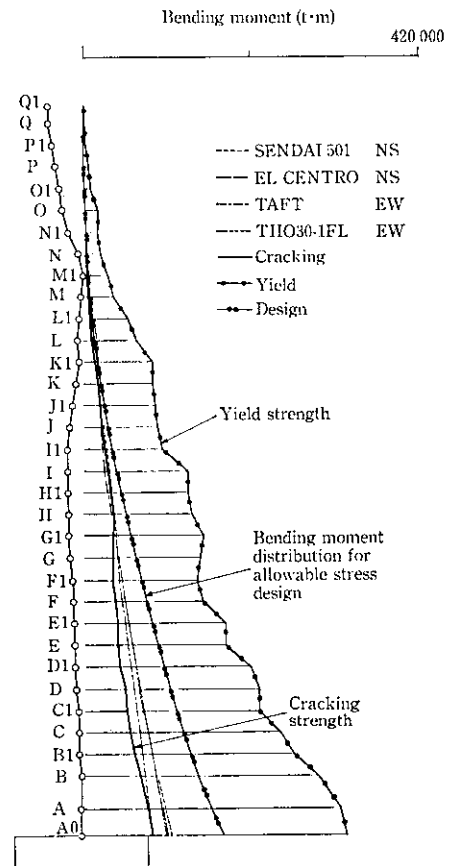


Fig. 5 Maximum bending moment to seismic waves at intensity level 1, Y (front-to-back) direction

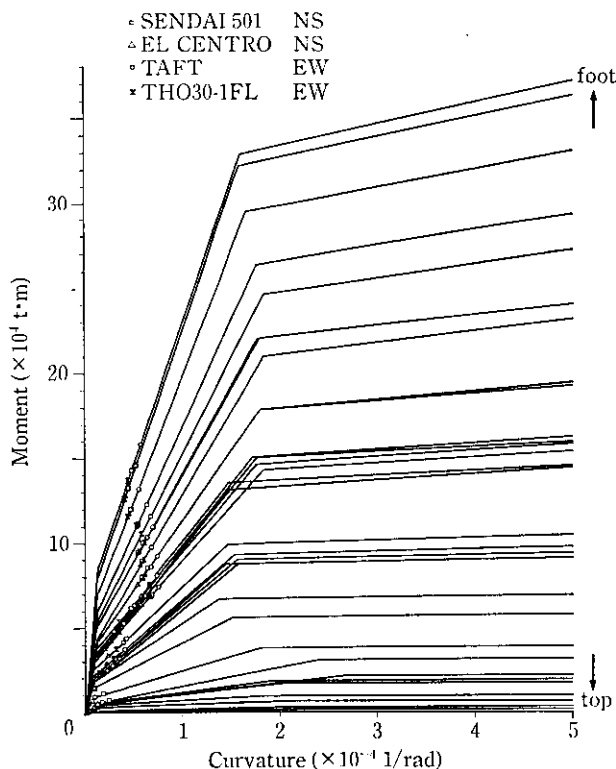


Fig. 6 Maximum response bending moment on restoring force curve calculated for each layer of the statue (intensity level 2, Y direction)

#### 4 立像の特異形状に対する検討

本構造物の特徴を設計に反映するためには耐震設計における地震応答解析用の設計モデルで採用した諸仮定（立像形状の楕円筒近似，剛性評価，自由度，地震動，基礎固定）だけでは十分とはいえない。そこでさらに Table 2 に示すように本構造物の特異な形状に起因して発生する可能性がある応力集中，局部変形，ねじれ等に関する解析を行った。

##### 4.1 有限要素法解析

設計モデルでは立像を楕円筒の集合として近似したため実形状と精密には合致せず局所的な剛性急変の影響が反映されない。そこで有限要素法 (FEM) による解析を行った。

###### 4.1.1 解析モデル

以下の要領で FEM モデルを作成した。

- (1) 基礎部を固定とし台座部・エレベータシャフトを除いた立像部をモデル化する。解析モデルを Fig. 7 に示す。
- (2) 水平断面の実形状に即して節点座標を定め各節点の支配面積によりふかし部や腕等の質量の偏在を反映させる。
- (3) 解析モデルの自由度は 3 次元 6 自由度とし，平板要素（壁，床）およびはり要素（階段）を用いる。

この FEM モデルを用いて固有値解析と設計用地震力に対する静的応力解析を行った。

###### 4.1.2 固有値解析結果

FEM モデルの固有周期と振動モード図を Fig. 8 に示す。要所に床を設けて立像の水平断面形状の保持を図っているため，断面変形現象（オパリング等）はみられなかった。

Table 2 List of structural analyses in aseismic design of the statue

| Model                   | Analyzing purpose                                                                               | Model dimension | Degree of freedom |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-------------------|
| FEM model               | To calculate vibration mode and stresses under static force by finite element method            | 3               | 6                 |
| Strain energy model     | To analyze earthquake response of model with stiffness equivalent to FEM model in strain energy | 2               | 3                 |
| Forming wall model      | To analyze influence of stiffness of non-load carrying (forming) wall                           | 2               | 3                 |
| Torsional effect model  | To analyze torsional response of structure                                                      | 3               | 6                 |
| Vertical response model | To analyze effects of vertical earthquake motion                                                | 2               | 3                 |
| Soil-structure model    | To analyze effects of basement floor expanding from footing into soil by finite element method  | 2               | 3                 |

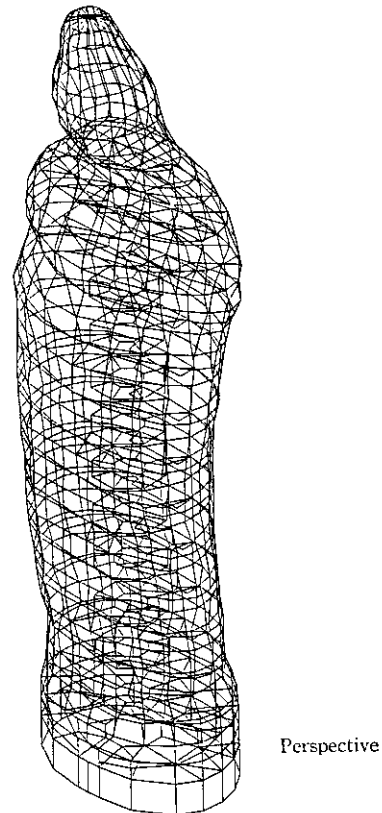


Fig. 7 Mesh model for finite element method

###### 4.1.3 静的応力解析結果

静的応力解析の結果，平板要素の面内応力が支配的であり，断面急変に起因すると思われる面外曲げ応力は立像下部の着衣のすそや頸部にわずかにみられるにすぎないことがわかった (Fig. 9)。

得られた面内外の応力に対し断面算定を行い安全性を確認した。

##### 4.2 ひずみエネルギー換算剛性モデルによる解析

FEM モデルは精密に立像をモデル化しているため動的性状もより立像の実応答に近いと考えられる。そこでひずみエネルギーを変

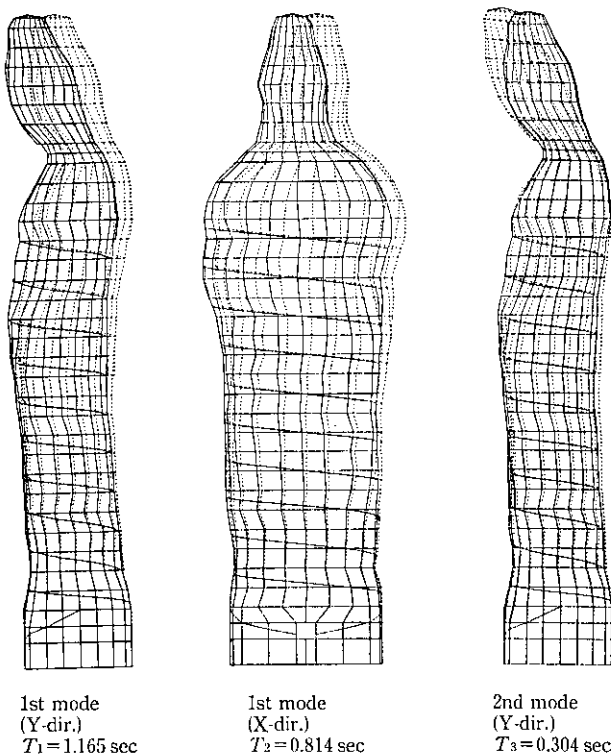


Fig. 8 Vibration mode of FEM model

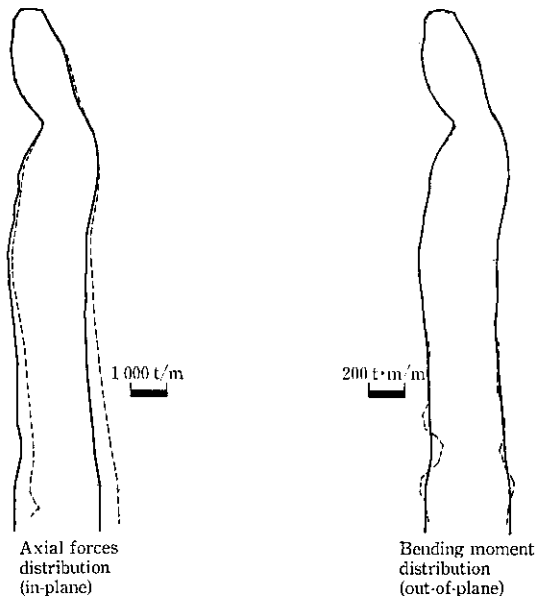


Fig. 9 Results of FEM analysis (Y-dir., horizontal load)

換尺度としてFEMモデルを曲げせん断系に置換し地震応答解析を行った。

#### 4.2.1 解析モデル

FEMモデルを用いて1次固有モードに相似な水平力に対する静的応力解析から鉛直方向の節点変位と節点力を求め、層内のひずみエネルギーの和を得る。これがその層にたわみ角の増分を発生させる曲げモーメントのひずみエネルギーに等しいと仮定し等価曲げ剛性を求める<sup>3)</sup>。

#### 4.2.2 地震応答解析結果

等価剛性を設計用剛性と比較してTable 3に示す。全体に設計用剛性と等価剛性はよく一致しているが、頸部や頭部においては等価

Table 3 Comparison between bending stiffness of design model and bending stiffness equivalent to FEM model

| Location in the statue | Bending stiffness ( $m^4$ ) |                               | Ratio $I_{ed}/I_d$ |
|------------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------|
|                        | Design model $I_d$          | FEM equivalent model $I_{ed}$ |                    |
| Head (O*)              | 121.13                      | 71.50                         | 0.60               |
| Neck (M*)              | 381.69                      | 296.59                        | 0.77               |
| Body (J*)              | 813.90                      | 794.68                        | 0.98               |

\*1 Symbols of layer are shown in Fig. 2.

剛性が設計用剛性に比べて6~7割に低下している。この剛性を用いて作成した曲げせん断系棒モデルにより地震応答解析を行った結果、ひずみエネルギー換算剛性モデルの振動モードは設計モデルに対して各次数ともよく一致し、最大応答値も数%内の誤差で一致することがわかった。

### 4.3 ふかし部を考慮したモデルによる解析

設計モデルでは立像を楕円筒に置換するとき構造壁として耐力を期待しないふかし部と構造壁とを分けて考え、ふかし部はその質量のみを考慮した。ここではふかし部の質量のみならず剛性も考慮したモデルを作成し地震応答解析を行った。

#### 4.3.1 解析モデル

以下の手順でモデル化を行った。

- (1) ふかし部断面を細分・集計してふかし部の剛性を求め、これに構造壁の剛性を加えたものをふかし部を考慮したモデルの初期剛性とする。
- (2) ふかし部を加えた剛性と等価な剛性をもつ楕円寸法を求める。この楕円について設計モデルと同じ手法で復元力特性を求める。

#### 4.3.2 地震応答解析結果

ふかし部の剛性を加算することにより初期剛性が部位によっては2倍以上増加した。このためレベル1の入力に対する応答値は、設計モデルに比べて最下層で34%増加したが、降伏強度を超えることはなかった。

### 4.4 ねじれを考慮したモデルによる解析

本観音像は右手、左手等の突出部をもち、頭部は正面方向へ傾斜している。設計モデルの自由度は解析平面内の水平変位、垂直変位および面内回転の3自由度であり、立体的な質量の偏在によるねじれの影響を考慮できない。そこで3次元6自由度の地震応答解析を行い本構造物におけるねじれの影響を調査した。

#### 4.4.1 解析モデル

解析モデルは以下に基づいて作成した。

- (1) 解析モデルの自由度は並進変位3、回転変位3とする。
- (2) 立像の水平断面を分割し各々の要素の付加重量と重心位置を求め、これらを集計して直交3軸まわりの回転慣性モーメントを求める。
- (3) 極慣性モーメントは薄肉楕円筒断面として求める。

#### 4.4.2 地震応答解析結果

鉛直軸まわりの最大応答回転角は偏心重量が加わる右手および左手位置に発生したが $1.0 \times 10^{-4}$  radを超えない。ねじれせん断応力度は大部分が $0.0 \sim 3.0 \text{ kg/cm}^2$ で最大 $6.3 \text{ kg/cm}^2$ であった。ねじれせん断応力を面内せん断応力と合成した応力がひび割れせん断応力以下であることを確認した。

Table 4 Maximum response to SENDAI 501 earthquake at the lowest layer of the statue\*4

|                      | Response to NS wave*1 | Response to UD wave*2 | SRSS methods*3 | Response to NS & UD |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|---------------------|
| Horizontal force (t) | 3 974                 | 160                   | 3 980          | 4 041               |
| Vertical force (t)   | 313                   | 3 429                 | 3 442          | 3 505               |
| Moment (t·m)         | 111 640               | 3 848                 | —              | 112 480             |

\*1 NS wave: Horizontal direction

\*2 UD wave: Vertical direction

\*3 Square root of square sum from each response to NS wave and UD wave

\*4 Analysis direction: Y (front-to-behind of the statue)

#### 4.5 上下地震動を考慮した地震応答解析

##### 4.5.1 入力地震動

水平動の最大加速度を半分にした上下動を設計モデルへ入力することにより、折れ曲がった軸心をもつ立像に上下地震動が作用した場合の検討を行った。

##### 4.5.2 地震応答解析結果

上下動を入力すると鉛直成分地震力の他に水平成分地震力が立像軸心の折れ曲がり部を中心に発生した。そこで水平動・上下動を同時に入力して得た最大応答値と、別々に入力して得た最大応答値の自乗和平方根とを比較した。両者はおおむね等しいが、Table 4に示すように同時入力の応答値が自乗和平方値を上まわる傾向にあったので、同時入力の応答値を用いて断面を再度検定した。

#### 4.6 構造物と地盤の連成モデルによる解析

本構造物は基礎下端より鉛直下方に突出した地下室をもつ。この部分が上部構造物の振動性状に与える影響を調べるため構造物と地盤の連成モデルによる地震応答解析を行った。

##### 4.6.1 解析モデル

立像、基礎および周辺地盤を以下のようにモデル化した。

- (1) 有限要素法による2次元構造物と地盤の連成モデル (Fig. 10) を採用した。ここに軸線に関して対称な1/2モデルとし、地下室がある場合とない場合を比較した。
- (2) 上部構造物は33質点の曲げせん断棒要素、地盤は平面ひずみ要素によってモデル化した。

##### 4.6.2 地震応答解析結果

上部構造物の伝達関数および最大応答値を地下室のある場合とない場合について比較した結果をTable 5に示す。1次固有周期は両者とも一致するほか、伝達率、立像頂部および最下部での応答値における両者の差は1%以内である。この結果より地下室が上部構造物の振動性状に与える影響は少ないことがわかった。

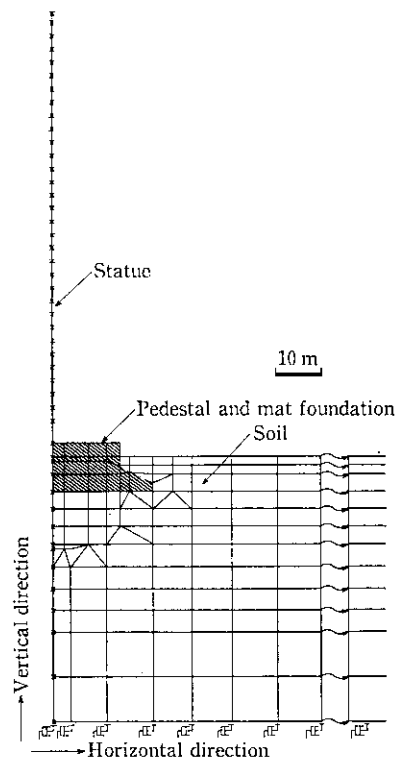


Fig. 10 Soil-structure interaction model in FEM method

#### 4.7 固有周期の比較

以上に述べてきた複数のモデルによる解析結果から得られた固有周期をTable 6に一覧する。FEMモデルおよび構造物と地盤の連成モデルによる固有周期は設計モデルより若干長めになる傾向にあ

Table 5 Comparison of response between case 1 (with basement floor) and case 2 (without basement floor)

|                              |                                  | Case 1  | Case 2  |
|------------------------------|----------------------------------|---------|---------|
| Transfer function            | Natural frequency, 1st mode (Hz) | 1.17    | 1.17    |
|                              | Transmissibility                 | 11.48   | 11.57   |
| Maximum response at the top  | Acceleration (gal)               | 1 266   | 1 254   |
|                              | Displacement (cm)                | 17.25   | 17.39   |
| Maximum response at the foot | Shear force (t)                  | 5 530.1 | 5 551.0 |
|                              | Bending moment (t·m)             | 275 730 | 278 460 |

Table 6 Natural period from various response analyses

(sec)

| Direction & mode |     | Design model | FEM model | Strain energy model | Torsional effect model | Forming wall model | Soil structure model |
|------------------|-----|--------------|-----------|---------------------|------------------------|--------------------|----------------------|
| X                | 1st | 0.804        | 0.814     | —                   | 0.804                  | 0.672              | 0.855                |
|                  | 2nd | 0.179        | 0.207     | —                   | 0.180                  | 0.150              | 0.186                |
|                  | 3rd | 0.096        | —         | —                   | 0.097                  | 0.078              | —                    |
| Y                | 1st | 1.071        | 1.165     | 1.072               | 1.072                  | 0.900              | —                    |
|                  | 2nd | 0.234        | 0.304     | 0.236               | 0.235                  | 0.188              | —                    |
|                  | 3rd | 0.122        | —         | 0.125               | 0.122                  | 0.100              | —                    |

るが、ひずみエネルギー換算剛性モデルおよびねじれ考慮モデルにおける固有値はよく一致している。一方ふかし部剛性評価モデルは設計モデルに対して剛性が増加したため1次固有周期で約15%短くなっている。

全体として設計モデルの振動性状と他のモデルのそれとはよい一致がみられるため設計モデルの妥当性を確認できた。

## 5 ま と め

天道白衣大観音像の設計において大地震を想定した弾塑性地震応答解析を行うため、観音像を楕円筒の集合体に近似し33質点曲げせん断系モデル（設計モデル）に置換した。この設計モデルを用いて地震応答解析を行い大地震時の構造物の安全性を確認した。

それとともに構造物の特異な形状から引き起こされるさまざまな問題点に着目した解析を行うため、FEMモデル、ひずみエネルギー換算剛性モデル、ふかし部剛性評価モデル、ねじれ考慮モデルおよび構造物と地盤の連成モデルを作成し、構造物の耐震安全性を検討するとともに設計モデルの妥当性を検証した。

これらの結果、本構造物においては設計モデルと他のモデルとの間に振動性状により一致がみられ、設計モデルの妥当性が証明された。ここに述べたのは自由曲面構造物のモデル化手法の一例であるが、実施設計において実用性の高い手法であるといえる。

最後に、財団法人日本建築センターの高層建築物構造評定部会において担当委員としてご指導を仰いだ東北大学和泉正哲教授、筑波大学園部泰寿教授に心から感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) 町田亘寛, 吉原貞一, 末富健治, 田中 晃, 黒木康文, 菅原正晴, 真栄城玄一, 松井浩一, 牛田慎一: 「任意形状構造物の動的設計」, 熊谷技報, 40 (1987) 2, 77-89
- 2) 梅村 魁: 「鉄筋コンクリート建物の動的耐震設計法」, (1973), [技報堂]
- 3) 新建築学体系 38: 「構造の動的解析」, (1984), 222-224, [彩国社]