

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-22-0083_改1
提出年月日	2021年10月26日

VI-5-76 計算機プログラム（解析コード）の概要  
・COM3

2021年10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. COM3 の解析手法について .....	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
3.3.1 FEM 解析の基礎式 .....	5
3.3.2 基本構成則 .....	7
3.4 解析フローチャート .....	9
3.5 検証(Verification)と妥当性確認(Validation) .....	10
3.5.1 ソリッド要素の適用性の検証 .....	10
3.5.2 妥当性確認 .....	13
3.5.3 評価結果 .....	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）COM3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-2-2-8	海水ポンプ室の耐震性についての計算書	ver. 9. 15
VI-2-2-10	第3号機海水ポンプ室の耐震性についての計算書	ver. 9. 15
VI-2-10-4-3	取水口の耐震性についての計算書	ver. 9. 15
VI-2-10-4-4-2	取水路（標準部）の耐震性についての計算書	ver. 9. 15

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	COM3
使用目的	3次元有限要素法（非線形ソリッド要素）による静的解析
開発機関	東京大学
開発時期	1980年
使用したバージョン	ver. 9.15
コードの概要	<p>COM3（以下「本解析コード」という。）は、東京大学コンクリート研究室で開発された、有限要素法（FEM）による鉄筋コンクリート構造物の動的/静的非線形プログラムであり、コンクリートに発生するひび割れによって鉄筋とコンクリートに生じる局所的な応力分布を鉄筋コンクリート部材としての平均的な応力と平均ひずみの関係として表現する構成則を用いてひび割れ発生に伴う非線形挙動を解析するコードである。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p><b>【検証(Verification)】</b></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"> <li>・計算に用いる構成則のモデルが適正であることは、鉄筋コンクリート版に関する載荷実験と応力-ひずみ関係を比較することで確認している。</li> <li>・本解析コードによる非線形ソリッド要素を用いた解析結果と実験結果が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、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、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・本解析コードによる3次元有限要素法による応力解析について、国内の原子力産業界における使用実績があり、十分に妥当性が確認されている。</li> <li>・本工事計画における3次元有限要素法による静的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. COM3 の解析手法について

#### 3.1 一般事項

COM3は、東京大学コンクリート研究室で開発された、有限要素法（FEM）による鉄筋コンクリート構造物の3次元動的・静的非線形解析プログラムである。非線形材料に関する構成則は、実験結果を忠実に再現した経路依存型の履歴モデルを採用している。分散ひび割れモデルと離散ひび割れモデルの組み合わせにより、部材の全体的な挙動を非常に精度よく追跡することが可能である。

本解析コードは、海水ポンプ室、第3号機海水ポンプ室、取水口及び取水路（標準部）の耐震安全性評価のための3次元静的材料非線形解析に用いる。

#### 3.2 解析コードの特徴

本解析コードは、コンクリートに発生するひび割れによって鉄筋とコンクリートに生じる局所的な応力分布を、鉄筋コンクリート部材としての平均的な応力と平均ひずみの関係として表現する構成則を用いてひび割れ発生に伴う非線形挙動を解析するコードである。

- ・鉄筋コンクリート構造物の挙動は、コンクリート及び鉄筋の各応力と剛性を「平均応力ー平均ひずみ」の関係で与えられる材料構成則から求め、それらを足し合わせることで表現している。（分散ひび割れ法）。
- ・コンクリート及び鉄筋のそれぞれの材料非線形モデルを基に、有限要素法を用いて非線形方程式を解くことにより、鉄筋コンクリート構造物全体の挙動を求めている。
- ・多方向のひび割れが考慮できる。
- ・コンクリート及び鉄筋は完全固着としている。（ひずみが同一の値となる）。

### 3.3 解析手法

#### 3.3.1 FEM 解析の基礎式

FEM 解析の基礎式として、荷重レベル  $t$  (または時刻  $t$ ) において、応力とひずみは次のように表される。

$$\boldsymbol{\sigma}_t = \mathbf{D}(\boldsymbol{\varepsilon}_t), \quad \boldsymbol{\varepsilon}_t = \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}_t \cdots \cdots \cdots (3.1)$$

ここに、 $\boldsymbol{\sigma}_t$  は応力ベクトル、 $\mathbf{D}$  は応力-ひずみ関係、 $\boldsymbol{\varepsilon}_t$  はひずみベクトル、 $\mathbf{B}$  はひずみ-変位マトリックス、 $\mathbf{u}_t$  は変位ベクトル。仮想仕事の原理より、外力  $\mathbf{F}_t$  と内力  $\mathbf{P}_t$  の釣合い条件式は次式となる。

$$\mathbf{F}_t = \mathbf{P}_t \cdots \cdots \cdots (3.2)$$

ここに、

$$\mathbf{P}_t = \sum \int \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}_t dV \cdots \cdots \cdots (3.3)$$

材料非線形性を考慮して式(3.2)を解くために、荷重レベルを  $\mathbf{F}_0, \mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \dots, \mathbf{F}_n$  のように分割する。荷重レベル  $t$  の解 ( $\mathbf{u}_t$  と  $\boldsymbol{\sigma}_t$ ) を用いて、次式で表される荷重レベル  $t + \Delta t$  の釣合い条件式の解 ( $\mathbf{u}_{t+\Delta t}$  と  $\boldsymbol{\sigma}_{t+\Delta t}$ ) を求める。

$$\mathbf{F}_{t+\Delta t} - \mathbf{P}_{t+\Delta t} = \mathbf{0}, \quad \mathbf{P}_{t+\Delta t} = \sum \int \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}_{t+\Delta t} dV \cdots \cdots \cdots (3.4)$$

解は Newton 法による反復計算の収束値として求めるが、はじめに荷重レベル  $t + \Delta t$  の初期解を次のように求める。

$$\mathbf{K}_t \Delta \mathbf{u}^{(0)} = \mathbf{F}_{t+\Delta t} - \sum \int \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}_{t+\Delta t} dV \cdots \cdots \cdots (3.5)$$

$$\mathbf{u}_{t+\Delta t}^{(0)} = \mathbf{u}_t + \Delta \mathbf{u}^{(0)}, \quad \Delta \boldsymbol{\varepsilon}^{(0)} = \mathbf{B} \cdot \Delta \mathbf{u}^{(0)} \cdots \cdots \cdots (3.6)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{t+\Delta t}^{(0)} = \boldsymbol{\varepsilon}_t + \Delta \boldsymbol{\varepsilon}^{(0)}, \quad \boldsymbol{\sigma}_{t+\Delta t}^{(0)} = \mathbf{D}(\boldsymbol{\varepsilon}_{t+\Delta t}^{(0)}) \cdots \cdots \cdots (3.7)$$

ここに、

$$\mathbf{K}_t = \sum \int \mathbf{B}^T (\partial \mathbf{D} / \partial \boldsymbol{\varepsilon})_t \mathbf{B} dV \cdots \cdots \cdots (3.8)$$

以降、反復回数  $(i)$  での収束計算スキームは、

$$\mathbf{K}_{t+\Delta t}^{(i-1)} \Delta \mathbf{u}^{(i)} = \mathbf{F}_{t+\Delta t} - \mathbf{P}_{t+\Delta t}^{(i-1)} \cdots \cdots \cdots (3.9)$$

$$\mathbf{u}_{t+\Delta t}^{(i)} = \mathbf{u}_{t+\Delta t}^{(i-1)} + \Delta \mathbf{u}^{(i)}, \quad \boldsymbol{\sigma}_{t+\Delta t}^{(i)} = \mathbf{D}(\boldsymbol{\varepsilon}_{t+\Delta t}^{(i)}) \cdots \cdots \cdots (3.10)$$

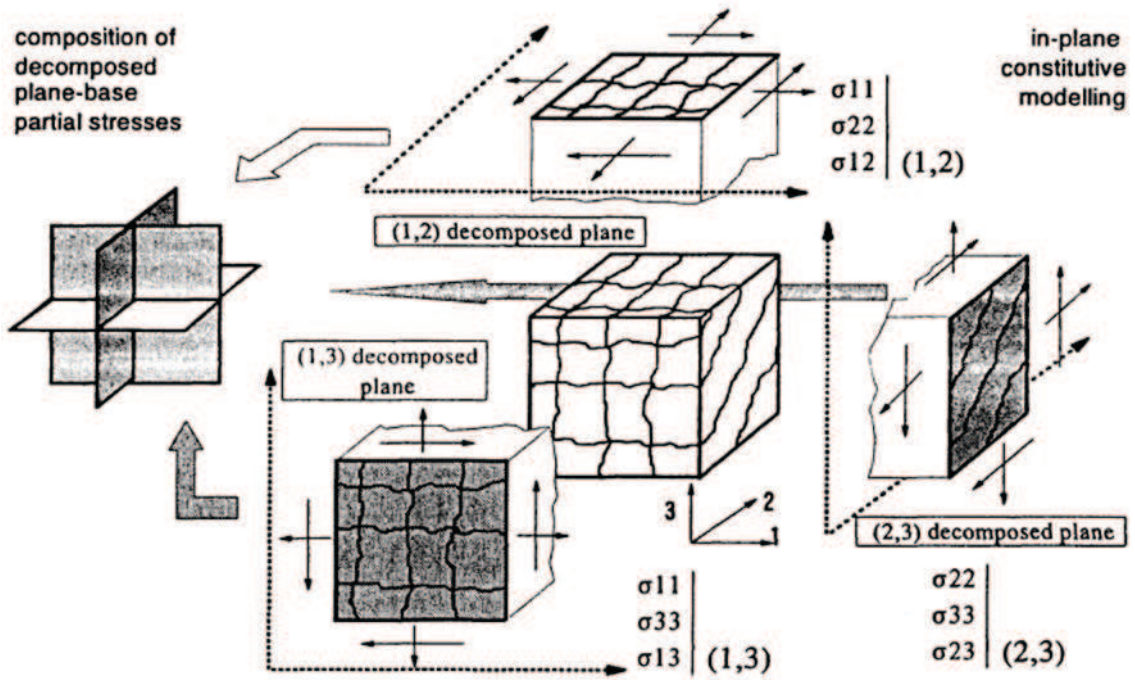
ここに,

$$\mathbf{P}_{t+\Delta t}^{(i-1)} = \Sigma \int \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}_{t+\Delta t}^{(i-1)} dV \dots \dots \dots (3.11)$$



### 3.3.2 基本構成則

本解析コードでは，図 3-1 に示すように，開口が最も大きいひび割れ面に平行な平面および直交する 2 平面からなる 3 つの 2 次元平面において，それぞれ 2 次元の基本構成則を適用し，これらを合算することによって 3 次元応力場に拡張している。以下では，2 次元平面における基本構成則を示す。

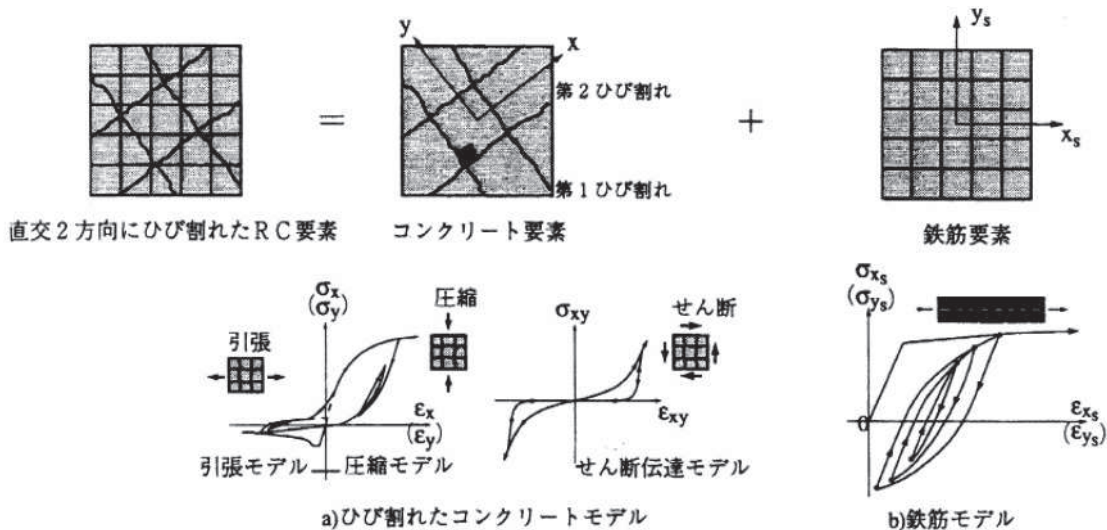


出典：Bernhard HAUKE, Koichi MAEKAWA : Three-dimensional modelling of reinforced concrete with multi-directional cracking, Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, JSCE, No. 634/V-45, pp. 349-368, 1999. 11

図 3-1 投影法による 3 次元応力場への拡張

コンクリートの非線形特性は、コンクリートの構成則と鉄筋の構成則の重ね合わせで表現している。分散ひび割れモデルを採用しているため、ひび割れたコンクリートの構成則及び鉄筋の構成則は、要素内の平均応力と平均ひずみの関係で与えられることになる。

図 3-2 に示すように、ひび割れたコンクリートの構成則は、引張剛性モデル、圧縮剛性モデル及びせん断剛性モデルを組み合わせたものである。これにコンクリート中の鉄筋の引張剛性モデルを重ね合わせて鉄筋コンクリート要素としている。



出典：前川宏一，福浦尚之：疑似直交2方向ひび割れを有する平面RC要素の空間平均化構成モデルの再構築，土木学会論文集，No. 634/V-45，pp157-176，1999.11

図 3-2 直交2方向にひび割れた鉄筋コンクリート要素

### 3.4 解析フローチャート

各平面における解析フローチャートを図 3-3 に示す。

本解析コードでは、図 3-1 に示すように、3 つの平面でそれぞれ算定し、座標変換によって合算している。

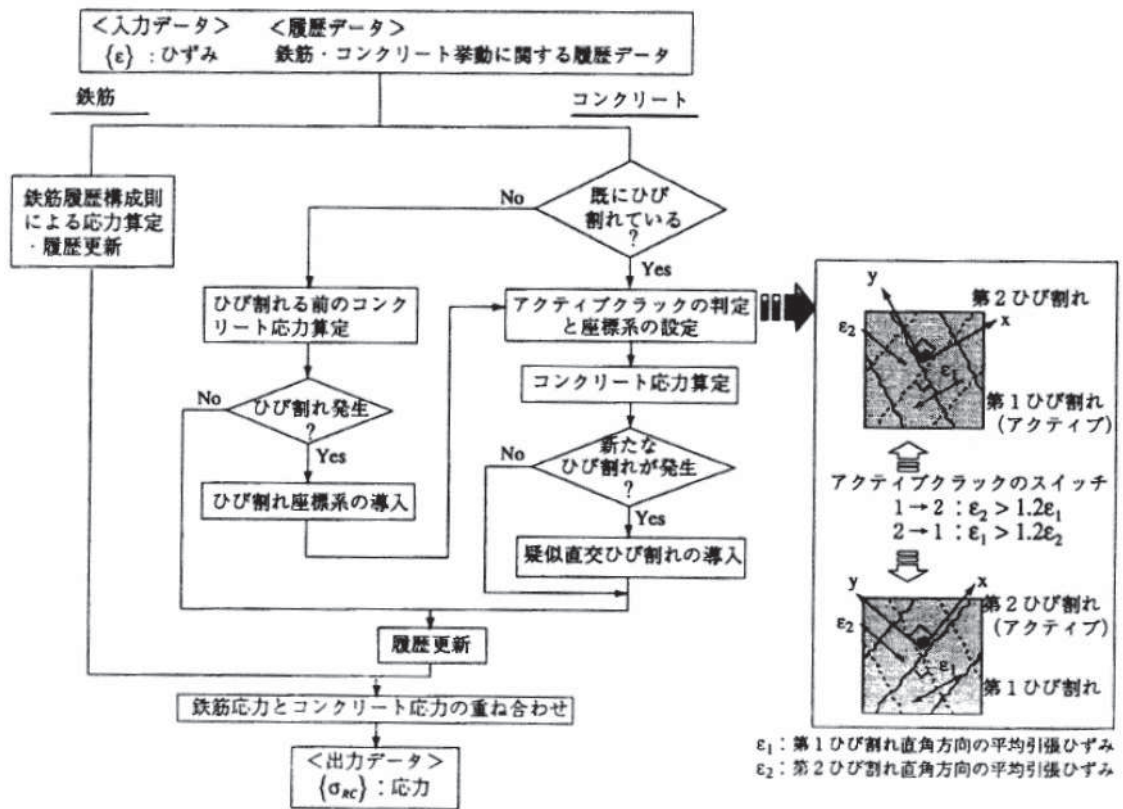


図-10 擬似直交 2 方向にひび割れる鉄筋コンクリート要素の応力算定

出典：前川宏一，福浦尚之：擬似直交 2 方向ひび割れを有する平面 RC 要素の空間平均化構成モデルの再構築，土木学会論文集，No. 634/V-45，pp157-176，1999. 11

図 3-3 各平面における解析フローチャート

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

#### 3.5.1 ソリッド要素の適用性の検証

3次元非線形ソリッド要素は、コンクリート及び鉄筋の非線形特性を考慮し、鉄筋コンクリート部材を複数のソリッド要素の集合体とみなしモデル化する要素である。3次元非線形ソリッド要素を用いた解析の適用性は、単純はりモデルの荷重-変位関係について、本解析コードによる解析結果と実験結果を比較することで検証する。

##### (1) 実験概要

比較対象とする実験の概念図を図3-4に示す。実験では鉄筋コンクリートはりの試験体に対し、試験体天端2点に載荷し、試験体中央位置での鉛直変位に関する荷重-変位関係を確認する。

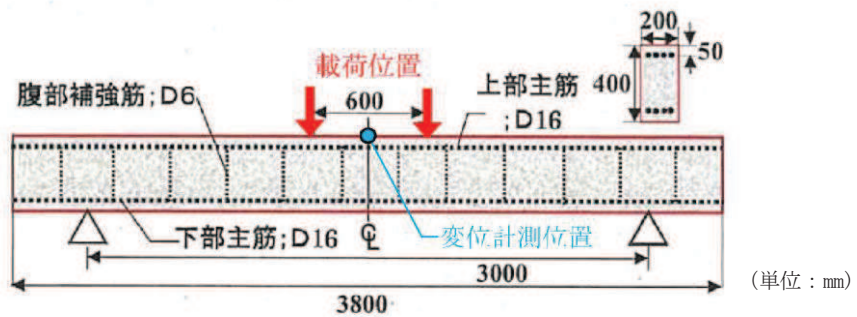


図 3-4 実験概念図

(原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針 (技術資料) (2005年) より引用)

##### (2) 解析モデル

解析モデルは図3-4の実験概念図に基づき、3次元ソリッド要素でモデル化する。解析に用いる要素分割を図3-5に示す。また、解析における境界条件は、底面片側固定、片側水平ローラーとして、頂部2点に強制変位を与えた(図3-6)。本解析はRC要素とPL要素に領域を分割する。また、載荷版及び支点は弾性のコンクリート部材としてモデル化する。

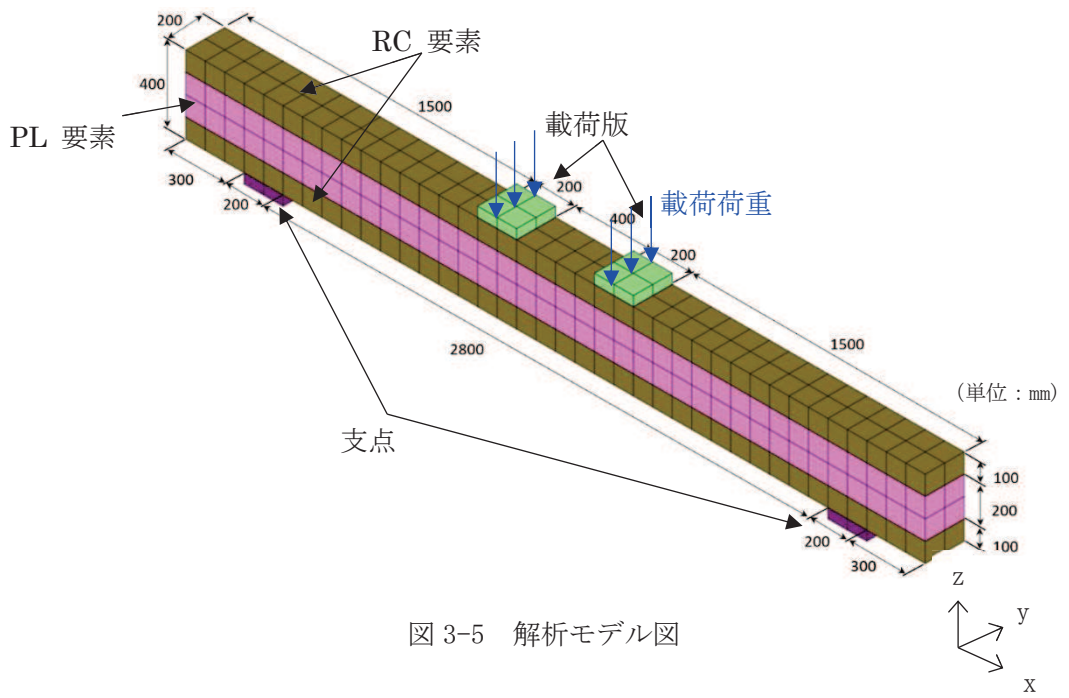


図 3-5 解析モデル図

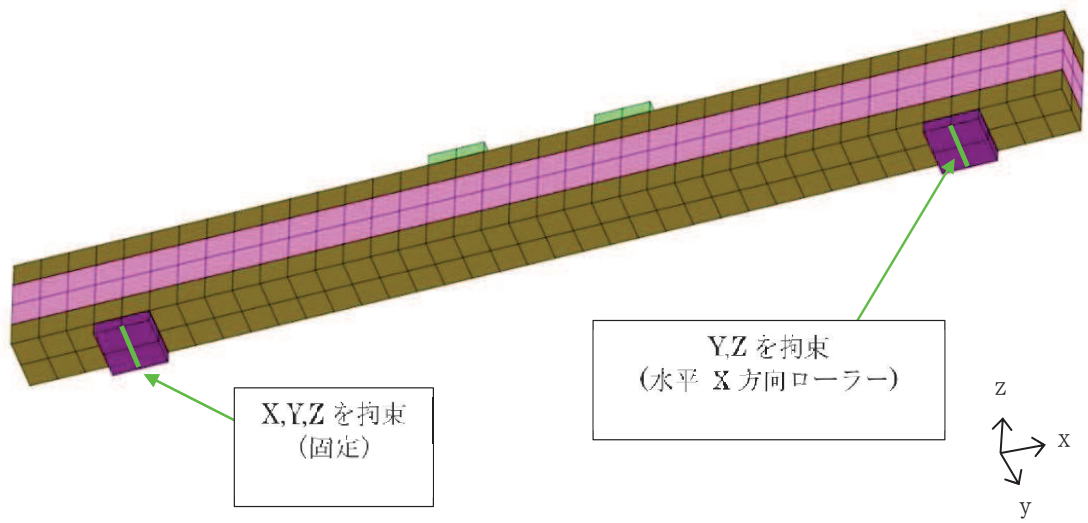


図 3-6 境界条件

(3) 解析用物性値

解析用物性値を表 3-1 に示す。

表 3-1 解析用物性値

コンクリート	圧縮強度 $f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	45.3
	引張強度 $f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	3.7
	ヤング係数 $E_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$3.06 \times 10^4$
鉄筋	降伏強度 $f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	344
	ヤング係数 $E_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	$1.94 \times 10^5$

(原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針 (技術資料) (2005 年) より引用)

(4) 解析条件

図 3-4 の実験概念図の載荷位置と同様に、図 3-5 に示す載荷位置に載荷し、モデル中央位置における荷重-変位関係を算出する。

(5) 結果の検証

解析結果と実験結果の荷重-変位関係の比較を図 3-7 に示す。

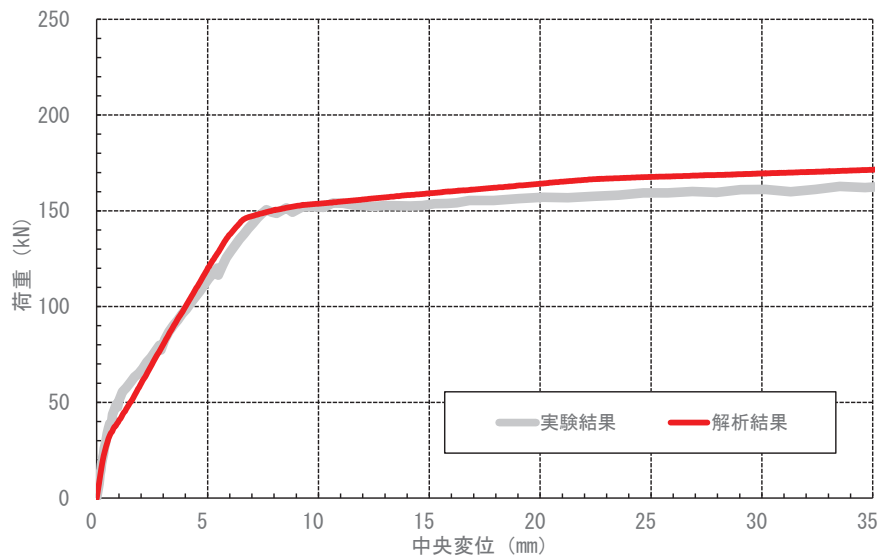


図 3-7 荷重-変位関係の比較

解析結果と実験結果の荷重-変位関係はおおむね一致しており、鉄筋降伏時の荷重もおおむね同等である。以上より、3次元非線形ソリッド要素を用いた解析の適用性を確認した。

### 3.5.2 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。

- ・本解析コードは、国内の土木・建築分野における使用実績を有しており、十分に妥当性が確認されている。
- ・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、検証の結果をもって、解析機能の妥当性も確認できる。
- ・本工事計画で使用する応力解析の用途、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。

### 3.5.3 評価結果

以上の検証結果及び妥当性確認結果により、本解析コードを、建物・構築物及び屋外重要土木構造物の応力解析に使用することは妥当である。