

3次元地震応答解析における構造物と地盤の接触面のモデル化に関する一考察

大成建設（株） 正会員 ○堀田 渉 正会員 鈴木 俊一
海洋研究開発機構 フェロー会員 堀 宗朗

1. はじめに

原子力発電所など重要構造物の耐震評価においては、東日本大震災以降、地震時の構造物の応答を精緻に予測する必要性が高まっている。著者らは、このような社会的な要請に対応するために、高性能計算を利用した並列有限要素法（以下、HPC-FEM）の実用化に努めてきている。HPC-FEMの主な用途の一つとしては、強地震時における構造物の地震応答の評価である。強地震時には、コンクリートや地盤の他、構造物と地盤の間の接触・剥離といった非線形を考慮する必要がある。このうち、構造物と地盤の間の接触・剥離を模擬することが可能な要素として、Goodmanらのジョイント要素が挙げられる。しかしながら、この要素は、接触する要素間の変位の連続性を接触要素間では考慮せず、ジョイント要素を通じて接続された節点の変位差から接触・剥離を評価するものであり、接触面を構成する要素サイズに依存して接触剥離面の挙動が大きく変化するということが懸念される。

本稿では、構造物と地盤の間の接触・剥離について、数値計算の観点で厳密な接触面要素¹⁾を用いて、構造物-地盤連成モデルによる地震時応答解析を行い、接触面の挙動を評価する。本稿で示す接触面要素では、ガウス積分点で接触・剥離が評価可能であるため、同一の要素サイズにおけるガウス積分点の数を変化させたときの応答結果を分析・考察する。

2. 接触面要素の概要

3次元座標 \mathbf{x} を、2次元アイソパラメトリック座標 $\xi = [\xi, \eta]^T$ の関数として、以下のように与える。

$$\mathbf{x}(\xi) = \sum_{\alpha=1}^4 N^{\alpha}(\xi) \mathbf{x}^{\alpha}, \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{x}^{α} は第 α 節点の座標、 N^{α} は対応する形状関数である。接触面内の単位ベクトルを $\mathbf{s}_{\xi} = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \xi} / \left| \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \xi} \right|$ と $\mathbf{s}_{\eta} = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \eta} / \left| \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \eta} \right|$ 、法線方向の単位ベクトルを $\mathbf{n} = \mathbf{s}_{\xi} \times \mathbf{s}_{\eta} / |\mathbf{s}_{\xi} \times \mathbf{s}_{\eta}|$ と置く。接触面の鉛直ばね係数とせん断ばね係数を k_n と k_s とし、接触面の相対変位 $\Delta \mathbf{u}$ （接触面の上下の変位を \mathbf{u}^{\pm} とすると $\Delta \mathbf{u} = \mathbf{u}^+ - \mathbf{u}^-$ ）の汎関数 $U[\Delta \mathbf{u}]$ を使って、二つのばねの弾性エネルギーを次のように定義する。

$$U[\Delta \mathbf{u}] = \int_{\frac{1}{2}} \Delta \mathbf{u} \cdot \{k_n(\mathbf{n} \otimes \mathbf{n}) + k_s(\mathbf{s}_{\xi} \otimes \mathbf{s}_{\xi} + \mathbf{s}_{\eta} \otimes \mathbf{s}_{\eta})\} \cdot \Delta \mathbf{u} \, dS_x, \quad (2)$$

ここで、 dS_x は3次元座標系 \mathbf{x} での面積分を意味する。汎関数 $U[\mathbf{u}]$ の変分を計算し、式(1)で用いた形状関数を使って相対変位 $\Delta \mathbf{u}$ を離散化すると、要素剛性行列は以下で表される。

$$K_{ij}^{\alpha\beta} = \{k_n(n_i n_j) + k_s(s_{\xi i} s_{\xi j} + s_{\eta i} s_{\eta j})\} \int N^{\alpha} N^{\beta} J dS_{\xi}. \quad (3)$$

上添え字は節点番号、下添え字は相対変位の3次元座標系 \mathbf{x} での成分、 J は3次元座標系 \mathbf{x} の面積分を2次元座標系 ξ で行うためのヤコビアンであり、 dS_{ξ} は2次元座標系 ξ での面積分を意味する。本要素の要素剛性行列では、通常のFEMと同様、接触面に介在している剛性（ばね）に働く分布力を積分して節点力としている。

接触・剥離の場合、この接触面の介在している剛性は非線形となる。すなわち、接触面の点 \mathbf{x} において相対変位 $\Delta \mathbf{u}(\mathbf{x})$ が作る非線形ばねの分布力 \mathbf{t} は、

$$\mathbf{t} = \begin{cases} \{k_n(\mathbf{n} \otimes \mathbf{n}) + k_s(\mathbf{s}_{\xi} \otimes \mathbf{s}_{\xi} + \mathbf{s}_{\eta} \otimes \mathbf{s}_{\eta})\} \Delta \mathbf{u} & \Delta \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} < 0 \\ \mathbf{0} & \text{else} \end{cases}, \quad (4)$$

となる。この場合、式(3)の積分 $\int N^{\alpha} N^{\beta} J dS_{\xi}$ は $\Delta \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} < 0$ を満たす接触面の部分のみで行えば良い。

積分の計算方法としては、通常のFEMと同様、形状関数の次数に応じてガウス積分を設定する。式(4)の非線形

キーワード 接触・剥離, ジョイント要素, 高性能計算, 地震応答解析

連絡先 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 大成建設（株）原子力本部 TEL 03-5381-5196

ばねの場合、形状関数を使って離散化された相対変位が、複雑な分布力 t を生じさせるため、分布力を積分して要素剛性行列を計算する際、形状関数の次数よりは高いガウス積分を使うことが必要となる。2次元アイソパラメトリック座標のガウス積分点と重みを ξ^G と w^G すると、式(3)の積分は下式により計算される。

$$\int N^\alpha N^\beta J dS_\xi = \sum_G N^\alpha(\xi^G) N^\beta(\xi^G) J(\xi^G) w^G. \tag{5}$$

3. 解析条件

解析モデルを図1、入力物性値を表1および表2に示す。コンクリートおよび地盤は線形とし、接触面には図2に示す非線形構成モデルを設定した。まず自重解析を行い、その後地震応答解析を実施した。地震応答解析時の減衰は、コンクリートおよび地盤に Rayleigh 減衰を与え、接触面要素には解析安定化のために微小な剛性比例減衰 ($\beta=0.0001$) を設定した。境界条件は、底面を固定境界、側面については自由境界とした。加藤らが提案したスペクトル波²⁾の1.5倍を入力地震動とし、3方向同時加振した(最大水平加速度675gal, 最大鉛直加速度428gal)。非線形解析の収束性を確実に確保するために、積分時間間隔は原波の1/10である0.001秒/stepとした。

4. 解析結果

コンクリートと地盤の接触する面積が最小となった時刻の接触面の接触・剥離分布を図3に示す。本図は、ガウス積分点位置で接触している場合黒丸となる。ガウス積分点の数が増えると、接触している分布はより厳密に評価されることが分かる。一般に、要素サイズが細かくなると、接触面の分布もより正確になるが、本要素を用いれば、ガウス積分点の数を増やすことにより同様の評価が可能であることが分かる。

接触分布と剥離分布の境界付近では、3方向同時加振に伴う複雑な分布が見られ、これは3次元解析特有の挙動である。本要素を用いてかつガウス積分点を増やすことにより、滑らかな接触と剥離の境界を再現できることが分かる。

5. まとめ

本稿では、構造物と地盤の間の接触面に接触面要素を用いると、ガウス積分点を増やすことにより、要素サイズを細かくすることなく、地震時の接触・剥離の厳密な分布を再現可能であることを示した。

参考文献

- 1) W. Hotta, H. Sonobe, S. Suzuki and M. Hori: A NUMERICAL STUDY ON INTERACTION BETWEEN STRUCTURE AND FOUNDATION ROCK DURING EARTHQUAKE USING 3D FEM, 17WCEE, 2020.
- 2) 加藤研一, 宮腰勝義, 武村雅之, 井上大栄, 上田圭一, 壇一男: 震源を事前に特定できない内陸地殻内地震による地震動レベル—地質学的調査による地震の分類と強震観測記録に基づく上限レベルの検討—, 日本地震工学会論文集, Vol.4, No.4, pp.46-86, 2004.

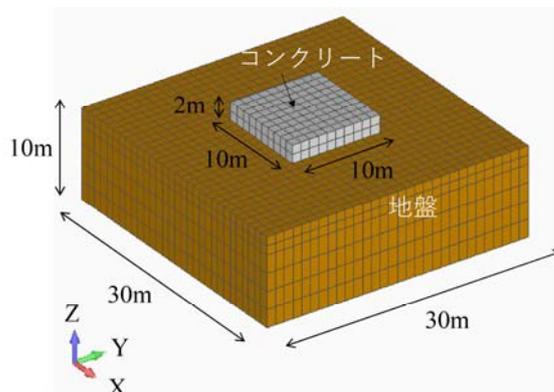


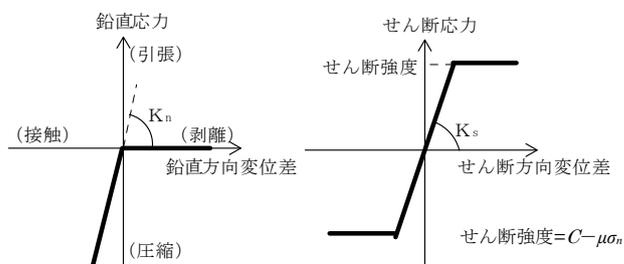
図-1 解析モデル

表1 コンクリートおよび地盤の入力物性値

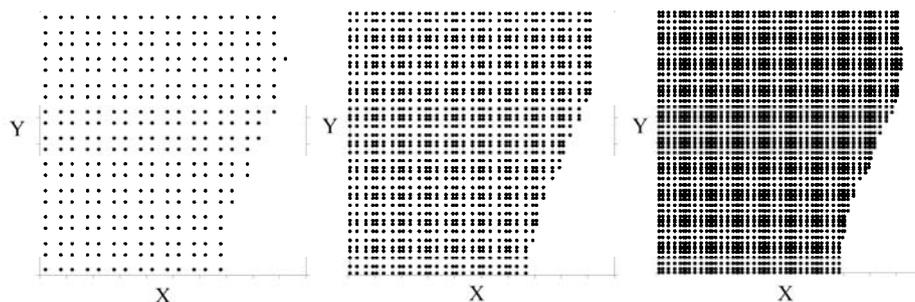
	ヤング率 E (kPa)	ポアソン比 ν	質量密度 ρ (t/m ³)
コンクリート	45,490,000	0.3000	2.4
地盤	1,330,000	0.3333	2.0

表2 接触面の入力物性値

鉛直ばね 係数 k_n (kN/m ²)	せん断ばね 係数 k_s (kN/m ²)	粘着力 C (kN/m ²)	摩擦係数 μ
5.0×10^6	5.0×10^6	0.0	0.6



(a) 鉛直方向 (b) せん断方向
図2 接触面の構成モデル



(a) ガウス積分点4 (b) ガウス積分点16 (c) ガウス積分点36
図-3 5.42秒時の接触面の接触・剥離分布