

2次元 FEM 静的解析におけるエネルギー伝達境界の適用性の検討

地震工学研究所 正会員 ○大島 快仁

地震工学研究所 正会員 宇高 竹和

1. はじめに

自重解析で代表される静的解析には有限要素法 (FEM) が多く用いられ, その際, 一般的な境界条件として, 底面には剛体基盤, 側方には水平変位を拘束する鉛直ローラー境界や荷重境界などが使用されてきた. この鉛直ローラーや荷重境界を使用したモデルにおいて解析の精度を向上するには, 側方境界を十分遠方に設置する必要があるが, 十分な精度が得られる境界の設置場所についての理論的な目安はいまだに確立されていないため, 技術者の経験に頼らざるを得ないのが現状である. 本研究では, 動的解析に使用されるエネルギー伝達境界¹⁾を静的解析に用いることにより, 境界の位置に関係なく解析精度を向上させる手法を提案する.

2. 理論的背景

図 1 のような静的解析の全体剛性方程式, 境界の節点に加えられるエネルギー伝達境界マトリックス, および境界に加えられる力は, 以下の式(1)で表すことができる.

$$([K_s] + [L] + [R])\{u\} = \{F\} + [L]\{u_f^L\} + [R]\{u_f^R\} + [D^L]\{u_f^L\} + [D^R]\{u_f^R\} \quad (1)$$

ただし,

$[K_s]$: 剛性マトリックス

$[L]$ $[R]$: 左右のエネルギー伝達境界

$\{u\}$: 不規則領域 (FEM 部) の変位ベクトル

$\{F\}$: 外力ベクトル

$\{u_f^L\}$ $\{u_f^R\}$: 左右の自由地盤の変位ベクトル

$[D^L]$ $[D^R]$: 左右の自由地盤の境界力マトリックス

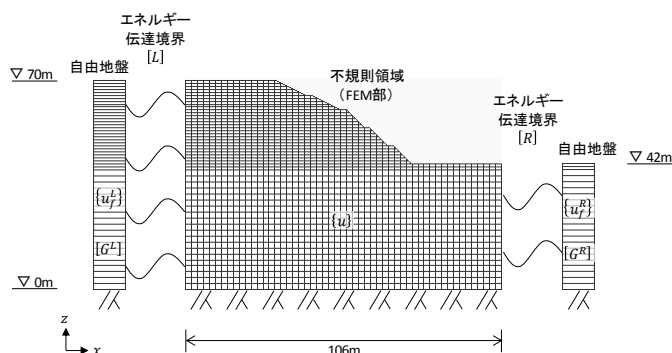


図 1 検討用モデル (エネルギー伝達境界)

自由地盤とは, 不規則領域 (FEM 部) の側方に存在すると仮定される水平成層地盤を指す (図 1 参照). 上式は, 文献²⁾の動的な運動方程式に相当する. 式(1)のエネルギー伝達境界¹²⁾と境界力²⁾についてはこれまで数多くの論文¹⁾²⁾で紹介され, その精度についても色々なところで検証されてきている (理論説明は参考文献を参照). 動的解析において, この処理法によりほぼ完全に水平方向の無限性を表現することが可能であり, その効果は顕著である³⁾.

本研究では, 振動数=0.0Hz とすることにより, エネルギー伝達境界を静的解析に応用した.

3. 解析モデルと解析ケース

表 1 の物性をもつ図 1 の検討用モデルと, 検討用モデルの左右を 1km 延長したモデル (基本モデル) を使用した. 各モデル底面は剛体基盤とした.

解析ケースとして, 基本モデルに鉛直ローラー境界を設置したケース, 検討用モデルに鉛直ローラー境界, 荷重境界およびエネルギー伝達境界の各境界を設置したケースの計 4 ケースを設定し (表 2 参照), 各ケースに対して自重解析を行った. なお, ケース 3 以外の解析には汎用解析プログラム Nastran⁴⁾を使用した.

表 1 物性諸元

材料番号	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m ³)	せん断係数 (kN/m ²)
1 地盤	0.38	19.6	1,000,000

表 2 解析ケース

ケース	側方境界 (左側)	側方境界 (右側)	解析モデル
基本	左右 1km 延長 + 鉛直ローラー境界		基本モデル
1	鉛直ローラー境界		検討用モデル
2	荷重境界	鉛直ローラー境界	検討用モデル
3	エネルギー伝達境界		検討用モデル

キーワード 有限要素法, 静的解析, エネルギー伝達境界, 鉛直ローラー境界, 自由地盤

連絡先 〒160-0004 東京都新宿区四谷 4 丁目 27 番 2 号 新宿 Y ビル 3 階 (株)地震工学研究所 TEL 03-3226-8733

4. 解析結果

各ケースの自重解析の結果から、各境界条件の解析精度の比較検討を行った。ここでは、応力 σ_x 、応力 σ_z およびせん断応力 τ_{zx} について図2および図3に示す。図2は、基本モデルのうち検討用モデルと共通の領域の結果のコンター図であり、図3は、式(2)によって算出した、基本モデルの応答を基準とした相対誤差のコンター図である。

$$\text{相対誤差} = (X - X_e) / X_e \quad (2)$$

ただし、 X :検討用モデルの応答、 X_e :基本モデルの応答

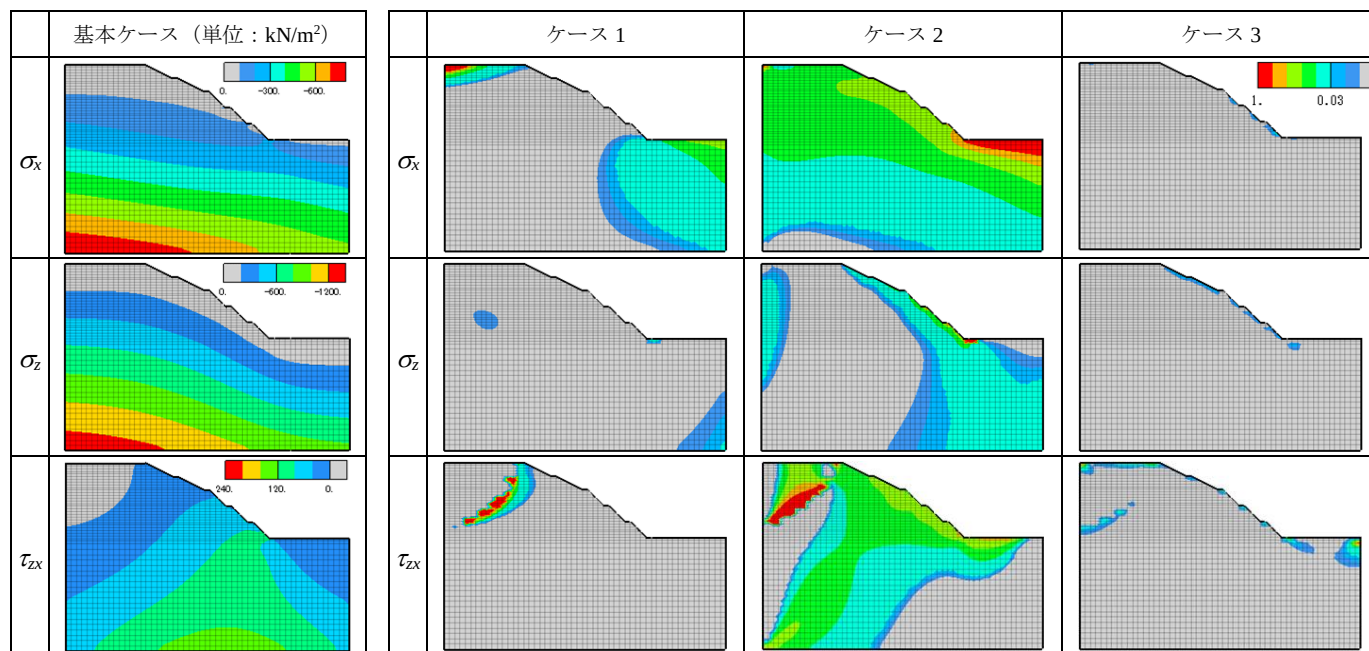


図2 基本ケースの応力

図3 基本ケースとの相対誤差

解析結果より以下の傾向が得られた。

- 1) 鉛直ローラーの場合、応力 σ_x については斜面裾野と斜面頂部に、せん断応力 τ_{zx} については正から負の値に変化する地点において、それぞれ大きな誤差が認められた。
- 2) 荷重境界の場合、すべての応力、特に応力 σ_x に大きな誤差が認められ、解析精度の向上を図るには、モデル側方の更なる延長が必要と思われる。
- 3) エネルギー伝達境界の場合はすべての応力で良好な一致が得られた。モデル左側のせん断応力 τ_{zx} の誤差については、ゼロとみなしてよい正負の値の割り算だったため、無視してよいと考える。

5. まとめ

本研究では、振動数=0.0Hzに対応するエネルギー伝達境界を静的解析に導入し、鉛直ローラー境界や荷重境界との応答を比較した。その結果、エネルギー伝達境界を使用した場合、境界の位置に関係なく解析精度を保ちつつ、解析領域を従来の領域より小さく設定することが可能になった。また、エネルギー伝達境界を用いる利点として、静的解析・動的解析ともに同精度の側方境界とすることができる等が挙げられる。

参考文献

- 1) Lysmer, J. and Drake, L.A.: A Finite Element Method for Seismology, Method of Computational Physics, Volume II, Academic Press, 1972.
- 2) Lysmer, J., Udaka, T., Tsai, C.-F. and Seed, H.B.: FLUSH - A Computer Program for Approximate 3-D Analysis of Soil-Structure Interaction Problems, Earthquake Engineering Research Center, Report No. EERC 75-30, University of California, Berkeley, 1975, 60pp.
- 3) 入門・建物と地盤との動的相互作用, 日本建築学会, pp.181-188, 1996.
- 4) NX Nastran ver.8.5, Siemens