I-484　放射性廃棄物貯蔵用地下空洞の地震応答解析

熊本工業大学　正員　○上杉　真平
熊本大学工学部　正員　大津　政康

1．はじめに

近年、原子力発電による電力量の増加に伴い、発電所や再処理工場から出る放射性廃棄物の処理処分が大きな課題となってきている。特に高レベル廃棄物は、その環境に与える影響が大きいことから、比較的安全な地層内処分が具体化しつつある[1]。本研究では、放射性廃棄物貯蔵用地下空洞の地震時の挙動を考察するために、ＢＥＭ－ＦＥＭ結合法を用いていくつかの数値計算を行い、その安全性を検討した。

2．定式化

半無限の広がりをもつ領域Ｄと有限な領域Ａとから成る領域Ｒについて考える。いま、領域Ｄが均質な地盤であり、その中に地下空洞（領域Ａ）があるものとすると、このような結合された領域Ｒ＝Ｄ＋Ａでの弾性波動問題の解析には、領域Ｄを境界要素法（ＢＥＭ）で、また領域Ａを有限要素法（ＦＥＭ）でモデル化し、両者を組み合わせて全体領域Ｒについて定式化する結合法が有用である。

そこで、まず領域Ｄが均質、等方かつ線形の弾性体であるとして平面ひずみ状態を考え、物体力はないものと仮定すると、二次元面内定常波動場の支配方程式は次のNavierの式で表される。

$$(k_S^2/k_P^2-1)u_{\beta,\alpha\beta}(x)+u_{\alpha,\beta\beta}(x)+k_S^2u_\alpha(x)=0 \quad , \quad \alpha,\beta=1,2 \tag{1}$$

ここに、u_α は変位ベクトル，$k_P=\omega/C_P$，$k_S=\omega/C_S$ は、それぞれＰ波，Ｓ波の波数であり、C_P および C_S は、Ｐ波，Ｓ波の波速，ω は円振動数である。また、下指標のギリシャ文字は総和規約に従うものとする。いま、領域Ｄの境界が $B=L+\Gamma$ で表されるものとすると、Greenの公式によりSomiglianaの式として知られる次の積分方程式が得られる。

$$u_\alpha(x)=\int_B G_{\alpha\beta}(x,y)t_\beta(y)dB-\int_B T_{\alpha\beta}(x,y)u_\beta(y)dB \quad , \quad x\in D \tag{2}$$

ただし、Γは結合境界を意味する。式（２）において、$x\in D\rightarrow x\in B$ なる極限移行操作を行うことによって次の境界積分方程式が得られる。

$$C^e u_\alpha(x)=\int_B G_{\alpha\beta}(x,y)t_\beta(y)dB-⨍_B T_{\alpha\beta}(x,y)u_\beta(y)dB \quad , \quad x\in B \tag{3}$$

ここに、C^e は二重層核の自由項の係数であり、また、$⨍\ dB$ はCauchyの主値積分を意味している。ここで、自由場の変位を u_α^o と表すものとすると、式（１）の解は次のように積分表示することができる[2]。

$$C^e u_\alpha(x)=\int_B G_{\alpha\beta}(x,y)t_\beta(y)dB-⨍_B T_{\alpha\beta}(x,y)u_\beta(y)dB+u_\alpha^o(x) \tag{4}$$

ただし、

$$G_{\alpha\beta}(x,y)=i/4\mu\,[H_0^{(1)}(k_Sr)\delta_{\alpha\beta}+1/k_S^2\{H_0^{(1)}(k_Sr)-H_0^{(1)}(k_Pr)\}_{,\alpha\beta}]$$

$$T_{\alpha\beta}(x,y)=\mu\,[G_{\beta\alpha,\gamma}n_\gamma+G_{\gamma\alpha,\beta}n_\gamma+2\nu/(1-2\nu)n_\beta G_{\gamma\alpha,\gamma}]$$

である。ここに、$G_{\alpha\beta}$，$T_{\alpha\beta}$ は、それぞれ第１種および第２種Green関数であり、$H_0^{(1)}$ は第１種Hankel関数、μ はせん断弾性係数、ν はポアソン比、ｎはｙ点における法線方向単位ベクトルである。式（４）を離散化および変形し、ＦＥＭの定式化に適合した形にマトリックス表示すると次式が得られる。

$$K_b\ u_b=F_b \tag{5}$$

ただし、

$$K_b=[C^TC]^{-1}C^TD \quad , \quad F_b=t+[C^TC]^{-1}C^Tu^o \quad , \quad t=\sum_B\int_{\Delta B}N^TNt_bdB$$

ここで、Ｃ，Ｄのマトリックスの成分は以下のとおりである。

$$C_{\alpha\beta ij}=\int_{\Delta B_j}G_{\alpha\beta}(x,y)dB \quad , \quad D_{\alpha\beta ij}=\int_{\Delta B_j}T_{\alpha\beta}(x,y)dB+C^e\delta_{\alpha\beta}\delta_{ij}$$

ここに、δ はKroneckerのデルタ、ΔB_j は分割積分区間、C^T はＣの転置をそれぞれ示している。また、u_b，F_b はＢＥＭ境界上の全節点変位および節点力ベクトル、t_b は表面力ベクトルであり、

$u_b = u_L \cup u_{\Gamma}$，$F_b = F_L \cup F_{\Gamma b}$とする。

次に、境界$S = C + \Gamma$をもつ領域Aが等方弾性体であるとしてＦＥＭで定式化すると、その構成方程式は次のように表される。

$$K_f u_f = F_f \tag{6}$$

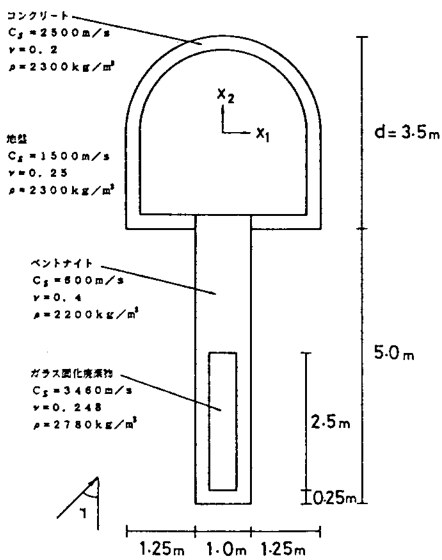
ただし、

$$F_f = \sum_S \int_{\Delta S} N^T N t_f dS \quad , \quad K_f = \sum_A \int_{\Delta A} B^T D B \, dA - \omega^2 M$$

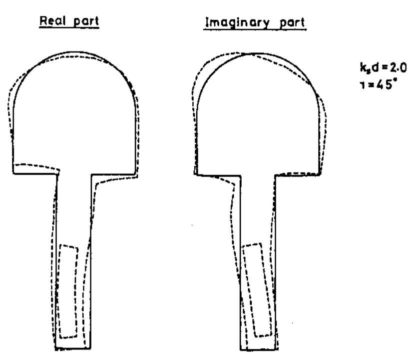
である。ここに、Ｂ，Ｄ，Ｍは、それぞれひずみ－変位マトリックス，応力－ひずみマトリックスおよび質量マトリックスであり、Ｎは内挿関数、ΔＡは１要素の面積、ｔ　はＦＥＭ領域の表面力ベクトルである。また、u_f，F_fはＦＥＭ領域Ａ内の全節点変位および節点力ベクトル、u_{Γ}，F_{Γ}は結合境界Γ上の節点変位および節点力ベクトルであり、$u_f = u_C \cup u_{\Gamma}$，$F_f = F_C \cup F_{\Gamma f}$とする。ＢＥＭ領域における式（５）とＦＥＭ領域の式（６）は全く同型であるので、結局、結合境界Γにおける応力および変位の連続条件のもとで両式を組み合わせることにより貯蔵用地下空洞の地震応答が求まる。

３．数値解析例

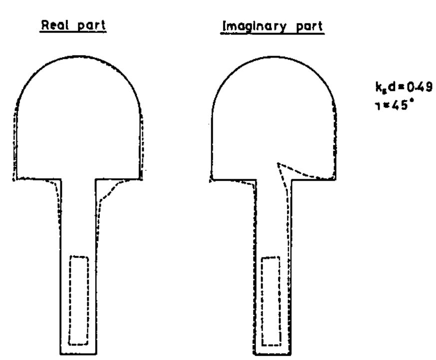
廃棄物収納用ボアホールを運搬用トンネル軸方向に連続な矩形の溝と考え、全断面がベントナイトで充填された場合について他の数値解析結果[2)]と比較して手法の妥当性を確認した。解析モデルとしては、Ｆｉｇ．１に示すような地下貯蔵庫を考えた。Ｆｉｇ．２には斜め$\gamma = 45°$から$k_S d = 2.0$のＳＶ波が入射した時の応答変位の結果を示す。この場合には、固化廃棄物付近もかなり変形することがわかる。次に、同じ地下貯蔵庫に波長の長いＳＶ波が入射した場合（$\gamma = 45°$，$k_S d = 0.49$）の応答を計算したものをＦｉｇ．３に示す。全体的にほとんど変形しないが、隅角部で応力集中が起こっており、注意を要することがわかる。なお、詳細については当日に報告する予定である。



Ｆｉｇ．１



Ｆｉｇ．２



Ｆｉｇ．３

謝辞　本研究を行う上で間組技術研究所よりデータの提供を頂きました。紙面にて感謝の意を表します。

（参考文献）１）雨宮，鳥辺，オアン，笠，馬渡：高レベル放射性廃棄物処分における緩衝材の研究，間組研究年報，1987.２）Kitahara,M.,Hamada,M.,Nakagawa,K.,Muranishi,Y.:Transient wave fields around elastic inclusions in a semi-infinite foundation,Proc.6th.Int.BEM in Eng.,1984.