

I-3 境界—有限要素の結合手法による熱応力解析

信州大学工学部 学生員 ○青木 賢治

信州大学工学部 正 員 大上 俊之

信州大学工学部 正 員 三井 康司

1. まえがき 地盤改良法の1つである地盤凍結工法の施工、LNG、LPG のような低温液化ガスの貯蔵、およびそれら地下タンクの保守等に対しては、周辺地盤における熱伝導解析が重要な問題となる。一般に複雑な地盤形状や多層地盤等の影響を考慮するためには、有限要素法(FEM)によるのが現状のようである。周知のように、FEMは材料非線形などの材料特性を容易に取り込めるという長所を有しており、プログラミングもほぼ完成されたものが多く、極めて汎用的な数値解析手法ではあるが、領域法であるため、無限領域を取り扱う場合には大きな離散化領域を必要とし、計算機使用上経済的とはいえない面もある。一方、境界要素法(BEM)は無限領域を効果的に評価できる長所を有しているが、FEM ほどの汎用性に乏しい側面がある。以上のことから、与えられた問題の形状、材料特性、境界条件等により両手法の長所を活かす、BE-FE 結合手法は計算効率の高いことが十分期待できる。本文は熱応力解析に対するBE-FE 結合解析手法の基礎として、まず定常状態の計算精度、計算効率を数値的に考察したものである。

2. 解析手順の概略 本法における結合手法の主旨は、1) 境界形状が複雑な領域、あるいは材料特性が不均一な領域はFEで離散化、2) 材料特性が均一でかつ、境界形状が単純、あるいは無限、半無限等の領域はBEで離散化する、というものである。このため、BEはFEの一種とする等価有限要素の概念で定式化を行っている。この定式化によれば、通常のFEM プログラムが、ほとんど無修正に近い状態で使用できる利点がある。FEとBEとの相対する境界での結合手法の詳細[1]は省略するが、概略すれば以下の通りである。図-1において、境界要素領域(Ω_B)では式(1)、(2)が成立する。 Φ , $\underline{q}$ は温度、温度勾配を、 $\underline{u}$, $\underline{t}$ は変位、表面力ベクトルである。また、 $\underline{Q}$, $\underline{F}$ はFE領域と結合するための節点流束値、節点力ベクトルである。 M は節点値に変換するための分布係数マトリックスである。共有境界 Γ_I では、式(3)、(4)が成立するので、熱伝導、熱応力のいずれの解析においても、これらを考慮して、通常のFEにおける全体系マトリックスに重ね合せて解けばよい。なお、熱応力解析において、 Ω_B では通常内部セルに分割して熱応力を評価するが、本文では境界要素の長所を生かすために、境界上のみで評価できるガラーキンテンソルを用いている[2, 3]。

$$H \Phi = G \underline{q}, \quad M G^{-1} H \Phi = \underline{Q} \quad (\text{for Heat Conductivity}) \dots \dots (1)$$

$$H \underline{u} = G \underline{t}, \quad M G^{-1} H \underline{u} = \underline{F} \quad (\text{for Thermoelasticity}) \dots \dots (2)$$

$$\Phi_F = \Phi_B, \quad \underline{q}_F = \underline{q}_B \quad (\text{for Heat Conductivity}) \dots \dots (3)$$

$$\underline{u}_F = \underline{u}_B, \quad \underline{t}_F - \underline{t}_B = \underline{0} \quad (\text{for Thermoelasticity}) \dots \dots (4)$$

3. 数値計算例 図-2に示すような半無限地盤上のダムを解析対象として考察する。図-2は通常の有限要素による分割図である。ダム部は幾分細かく、地盤は粗く分割してあり、要素数はそれぞれ161, 123要素の計284要素で離散化している。図-3はBE-FE による離散化状態を示したものである。ダム部分は図-2におけるFE分割と同じであるが、地盤部分は境界要素で離散化しているので、内部領域での分割を必要としない。図-4は本法とFEM によるものとの計算精度を比較したものであり、ダム部のAB断面について、左側に温度分布を、右側にはこれらより計算される変位(x方向)を示してある。同図より、温度分布、熱応力計算値ともほぼ同程度の値を示しており、本法の計算精度のよいことがわかる。この計算例における計算ディテールを表-1に示すが、これより、本法はFEM に比べて節点数、要素数とも約30%の軽減となり、計算機効率の良いことがわかる。なお、CPU 時間は熱伝導解析では同程度、熱応力解析では約20%程度の低

減となる。FEM に比べ計算効率の良いことがわかったので、本法により、表-2 に示すようなダム部の y 方向の熱伝導率 (α_y) が種々異なる場合 (図-1 参照) の熱伝導、熱応力計算を試みた。図-5 はダム部 A B 断面における温度分布を Case 1~Case 4 の場合について示したものである。○印は計算値である。Case 3 はダム低層部に断熱層に相当する低い熱伝導率を与えたものであり、ダム部の温度分布が他の Case に比べて高いことがわかる。ダム部、地盤中の温度分布が計算されると、これより熱応力が計算できる。図-6 は A B 断面における y 方向の変位図である。なお、いずれの場合も FEM との比較計算を行っているが、良い精度で一致したことを確認している。

Table 1 Computational details

Method	Node	Element	C.P.U-Time (Sec.)	
			Heat conductivity	Thermo.ela.
a) F.E.M	166	284	14.15	45.74
b) B.E-F.E	122	198	13.38	35.15
b)/a)	0.73	0.70	0.95	0.77

(HITAC M-240H Computer)

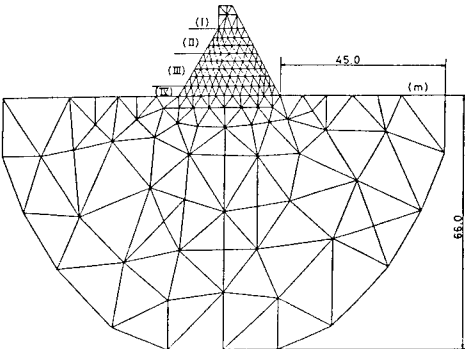


Fig.2 Discretization in FEM

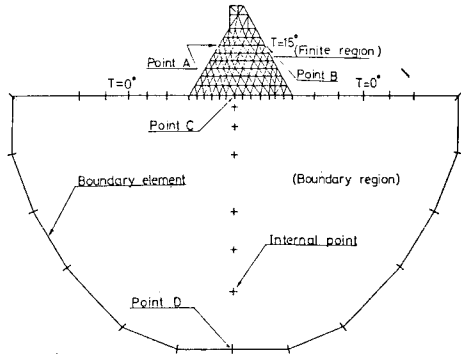


Fig.3 Discretization in Coupling Procedure

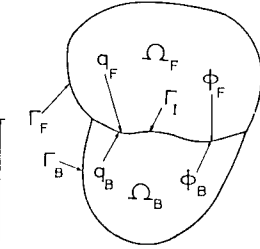


Fig.1 Definition of Symbols

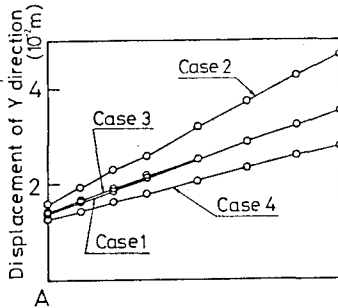


Fig.6 displacement of X Direction

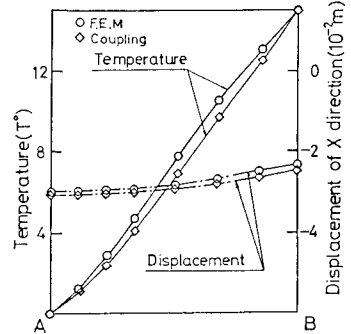


Fig.4 Comparison of Calculated Accuracy between FEM and Coupling procedure

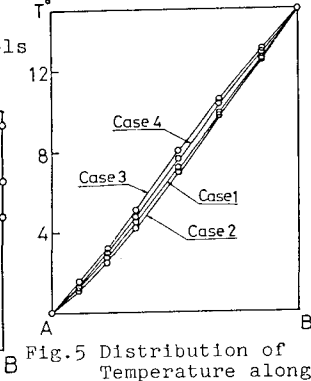


Fig.5 Distribution of Temperature along Section AB

Table 2 Coefficients of Heat Conductivity

α_i	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
I	1.0	1.0	1.0	1.0
II	1.0	2.0	1.0	1.0
III	2.0	3.0	2.0	1.0
IV	2.0	5.0	0.01	1.0
Under ground	2.0	2.0	2.0	2.0

$$\alpha_x = 6.0E-05 = \alpha_0 \quad \alpha_y = \alpha_i \cdot \alpha_0$$

4. あとがき 本文は、定常熱応力問題におけるBE-FE 結合手法に関して数値的考察を行ったものであり、本手法が単にFE解析を行なうより、計算効率の良いことがわかった。非定常熱問題では、この傾向が一段と増すことが予想され、現在検討中である。また、連続体中の不連続熱伝導面の取り扱い方等が今後の検討課題と考えられる。

参考文献 1) 飯森・海野・三井：境界-有限要素の結合手法による連続体熱応力解析，第39回土木学会年講集，I-22，1984，2) 大上・桑田・三井：境界要素法における物体力に関する一考察，第39回土木学会年講集，I-73，1984，3) 大上・三井・草間：境界-有限要素結合手法における物体力に関する一考察，第1回境界要素シンポジウム研究発表論文集，PP.73～78，1984。