

[124] 境界要素法を用いたコンクリート部材の付着解析

正会員	梶	龍 哉	(横浜国立大学工学部)
正会員	○ 橋 本	幹 司	(横浜国立大学大学院)
正会員	池 田	尚 治	(横浜国立大学工学部)
正会員	山野辺	慎 一	(鹿島建設技術研究所)

1. 序 論

鉄筋コンクリート部材、あるいは鉄骨鉄筋コンクリート部材が繰り返し荷重を受ける場合、鋼材とコンクリートの間の付着は、部材の力学的挙動を支配する主要因の一つである。すなわち、鋼材とコンクリートの間の付着の劣化とともに、部材の剛性や耐力が低下する。したがって、付着性状の把握は、コンクリート構造物の設計において、極めて重要であり、従来より実験的研究が多く発表されている。また、それらの付着に関する実験結果に基づき、一般的なコンクリート構造物の力学的挙動を付着を考慮して解析的に求めることも広く行なわれている。解析手法としては、汎用性の大きい有限要素法 (FEM) に基づく手法が多く用いられており、異形鉄筋の付着解析等に成果を上げている¹⁾。FEMの長所は、付着特性の非線形性、コンクリートのひびわれや鋼材の材料特性を容易に解析に組み込むことが可能な点である。一方、弾性問題のように、解析対象が線形の場合は、境界要素法 (BEM) が自由度数や精度の面でFEMより優れている^{2), 3)}。

付着に関する現象では、コンクリートのひびわれを含む非線形性の卓越する領域は鋼材の種類に応じた付着面におけるせん断伝達の程度に依存するが、非線形性の大きい領域が付着面周辺に限定される場合が多い。そのような場合の解析には、非線形性が卓越する領域にはFEMを、また、非線形性を無視し得る領域ではBEMを用いることにより、両手法の長所を利用することが可能である。本研究は、鋼板とコンクリートの付着現象を、上記のFEMとBEMの結合解法を用いて二次元問題として解析した結果を、FEMを単独で用いた結果と比較検討し、結合解法をコンクリート構造へ適用する際の可能性と問題点を考慮するものである。

2. 境界要素と有限要素を用いた応力解析方法

本研究で用いるFEMとBEMの結合解法は、以下にまとめられるような、境界要素領域を有限要素領域に変換する方法である。弾性問題に関する境界要素領域は、一般に次のような式で表わされる⁴⁾。

$$\underline{H} \underline{U} = \underline{G} \underline{P} \quad \dots (1)$$

ここに、 \underline{U} 、 \underline{P} は、各々、変位と表面力を表わし、 \underline{H} 、 \underline{G} は変位に関する基本解から計算される係数マトリックスである。本研究では、二次元半無限領域における変位の基本解⁵⁾を用いて \underline{H} 、 \underline{G} を計算している。式(1)を変形することにより、次のような有限要素領域に関する式と同じ形の式を導くことができる。

$$\underline{K} \underline{U} = \underline{F} \quad ; \quad \underline{K} = \underline{M} \underline{G}^{-1} \underline{H} \quad ; \quad \underline{F} = \underline{M} \underline{P} \quad \dots (2)$$

ここに、 \underline{F} は節点力を表わし、 \underline{M} は表面力を節点力に変換する分布マトリックスである。係数マトリックス \underline{K} は、一般に対称ではない。式(1)を式(2)の形に変換することの長所は、境界要素を、非線形応力解析に用いられる既存の種々の有限要素と組み合わせることにより、コンクリート構造物のような非線形かつ不均質な対象にも容易に適用することができることである。反面、係数マトリックス \underline{K} の非対称性や計算の煩雑さという問題点がある。分布マトリックス \underline{M} は、有限要素領域と境界要素領域の境界面S上における次のようなつりあい式から求められる⁴⁾。

$$\int_S \underline{u}^{(F)T} \underline{p}^{(F)} dS = \int_S \underline{u}^{(B)T} \underline{p}^{(B)} dS \quad \dots (3)$$

ここに、 \underline{u} 、 \underline{p} は、各々、境界面S上における変位と表面力であり、添字F,Bは、各々、有限要素と境界要素を表わす。本研究では、線形の有限要素と境界要素を用いているため、 $\underline{u}^{(B)}$ 、 $\underline{u}^{(F)}$ 、 $\underline{p}^{(B)}$ はS上で線形に変化し、 $\underline{p}^{(F)}$ は区間的に一定となる分布を仮定し、式(3)を各要素境界の右半分と左半分に適

用して、次のような一要素に関する分布マトリックス \tilde{M}^e を求め、用いている。

$$\tilde{M}^e = \frac{R}{12} \begin{bmatrix} 5 & 0 & 1 & 0 \\ & 5 & 0 & 1 \\ & & 5 & 0 \\ \text{SYM.} & & & 5 \end{bmatrix} \quad \dots \quad (4)$$

ここに、Rは要素の長さを表わす。

鋼材とコンクリートの界面における力学的特性を表わすためには、次式で示されるような一般化されたリンク要素を用いる(図-1参照)²⁾。

$$\begin{Bmatrix} f_n \\ f_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{nt} \\ k_{tn} & k_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_n \\ u_t \end{Bmatrix} \quad \dots \quad (5)$$

ここに、u, fは、各々、界面における変位と節点力を、また、添字 n, t は界面の法線方向と接線方向を表わす。係数マトリックス \tilde{k} は材料特性により決定される量であり、界面における応力伝達の状態を変形状態に応じて定めることができる。以下に示す解析例においては、簡単のため、非対角項は $k_{nt} = k_{tn} = 0$ とする。解析上考慮する界面の状態は、弾塑性的すべり状態と剥離の状態である。

構造系全体に関する式は、有限要素領域に関する剛性方程式に、境界要素領域に対する式(2)を重ね合わせることにより得られる。材料非線形性を考慮するため、荷重増分法を用い、各荷重ステップでは反復計算を解が収束するまで行なう。

3. 鋼材とコンクリートの間の付着解析例

付着解析の対象として、コンクリート・ブロック中の鋼板を押し抜く場合を考える(図-2参照)⁶⁾。

界面におけるせん断応力とすべりの関係は、実験結果に基づき、図-3に示されるようなバイリニア・モデルを用いる。鋼板とコンクリートの間の付着強度は 7 kgf/cm^2 とし、界面における法線方向または接線方向の応力が付着強度に達すると、リンク要素の剛性 k_{nn} および k_{tt} が、各々独立に、第一剛性から第二剛性へ変わると仮定する。解析で用いられたリンク要素の剛性の値は、表-1に示すとおりである。鋼材の材料特性は線形とする。また、コンクリートの材料特性としては、圧縮領域では Endochronic 理論による構成方程式で表わされ、引張領域では Tension Stiffening 効果も考慮できる非線形構成モデル⁷⁾と、初期材料特性による線形構成モデルの二種類を用いた(表-1参照)。非線形構成モデルでは、圧縮領域および引張領域の両方でひずみ軟化、あるいはそれと等価な現象を表わすことができるので、軟化領域における解の安定性を保つためには、荷重を強制変位増分で与え、変位を拘束する必要がある。引張領域では、主引張応力が引張強度に達したときにひびわれが発生すると仮定する。ひびわれは、主引張応力の方向により、最大三方向に発生することが可能である。ひびわれ発生後は、Tension Stiffening の程度により、ひびわれ面に直角方向の引張応力を徐々に解放することが可能なモデルである。圧縮-引張領域では、コンクリートの引張強度は、一軸引張強度と同じ値であると仮定する。また、圧縮強度も、一軸圧縮強度と同じ値を仮定する。一般に、コンクリートの圧縮強度は、ひびわれ発生後には低下することが実験的に確認されているが、本解析は、単調載荷を対象としているので、簡単のため、強度の低減は考慮しないものとする。線形構成モデルの材料定数は、非線形構成モデルの初期値と同じ値である。

解析に用いた要素分割は、図-4に示される。結合解法の要素分割は、リンク要素と鋼材周辺、および供試体底部のみを有限要素で表わし、他の領域のコンクリート部分には、境界要素を用いている。鋼材周辺および供試体底部は領域の形状が細長いため、境界要素を用いると、所定の解析精度を得るためには、領域分割法⁴⁾を用いて細分割することが必要になり、自由度数の面で境界要素を用いる効果がないためである。また、二次元半無限体に関する変位の基本解に基づく線形境界要素を用いているため、境界要素領域の自由表面の一部は、要素分割を必要としない。これは、自由度数、入力データ数の面に

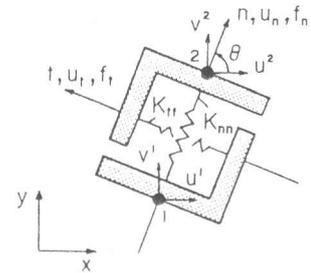


図-1 リンク要素

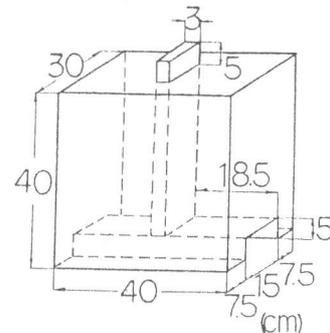


図-2 供試体諸元

おける利点と考えられる。図-4では、点線で示された部分がこれに相当する。有限要素のみを用いた要素分割も示されているが、領域内部における要素の節点が、結合解法における場合には不要になることがわかる。境界要素領域のコンクリートの材料特性としては、線形構成モデルを使用している。図-2の供試体に関する図からも明らかのように、鋼板の幅方向の外側にもコンクリートが存在するため、その部分のコンクリートの厚さを考慮した剛性のコンクリートの要素が、鋼板の要素と重ね合わされている。

境界条件は、図-4に示されるように、供試体底部においては、変位が完全に拘束され、鋼板中心線では、対称性より、水平方向の変位が拘束される。荷重として鉛直方向強制変位増分は、鋼板上端に均等に与えられる。

荷重とすべり変位に関する解析結果は、図-5に示される。有限要素法のみを用いた結果と結合解法による結果は、よく一致しており、また、実験値とも良好な一致を示している。鋼材とコンクリートの付着特性を、本解析で用いたパイリニア・モデルよりも正確にモデル化することにより、さらに解析精度を向上させることができると思われる。

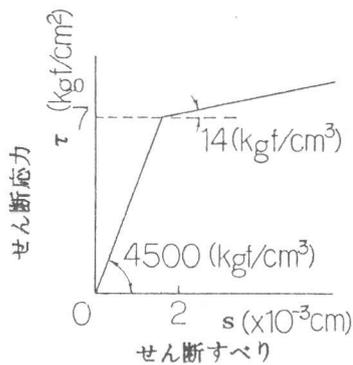


図-3 付着面の材料特性

表-1 材料特性

コンクリート		
弾性係数	2.4×10^5 (kgf/cm ²)	
ポアソン比	0.18	
圧縮強度	288 (kgf/cm ²)	
引張強度	28.8 (kgf/cm ²)	
鋼材		
弾性係数	2.1×10^6 (kgf/cm ²)	
ポアソン比	0.3	
リンク要素		
	第1剛性	第2剛性
せん断方向	4500 (kgf/cm ²)	14 (kgf/cm ²)
垂直方向	2.4×10^{11} (kgf/cm ²)	0 (kgf/cm ²)
付着強度	7 (kgf/cm ²)	

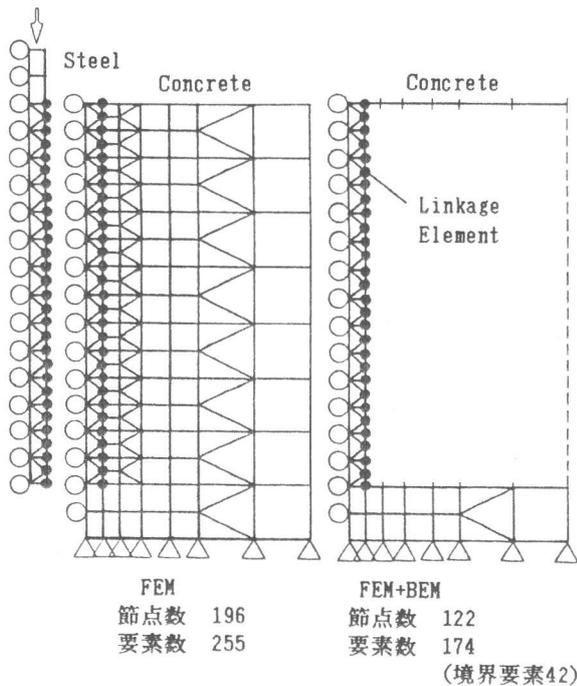


図-4 要素分割と境界条件

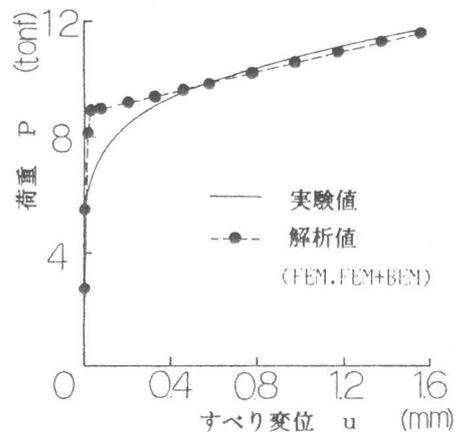


図-5 荷重-変位関係

また、領域内の主応力分布は、図-6に示される。図より明らかなように、応力は鋼材周辺部で大きな値を示し、鋼材から離れた点では極めて小さい値となっている。したがって、荷重-すべり変位特性の非線形性は、ほとんどが界面における付着すべり、あるいは、コンクリートの剝離によって生じていると考えられる。したがって、本解析例は、結合解法が最も有効な例であるということが出来る。計算効率の面でも、結合解法に要した演算時間は、有限要素法を単独で用いた場合の40~50%であった。コンクリート内の引張応力は、本解析例では、コンクリートと鋼材の界面における応力解放と剛性の変化により緩和され、そのため、コンクリート内部にはひびわれが進展しない結果となった。界面のせん断伝達の影響が本解析例よりも大きい場合、例えば、異形鉄筋やスタッド・ジベル付きの鋼板の場合には、ひびわれがコンクリート内部に進展することが考えられ、また、その場合には、圧縮による非線形性も顕著となるため、コンクリートの領域も部分的に有限要素領域で置き換えることが必要になるとと思われる。付着面における状態が載荷状態に応じて変化する様子は図-7に示される。すべり、または剝離の領域の変化から、付着すべりの内部機構の傾向を把握することができる。

なお、本解析例では、二次元半無限体領域に対する基本解に基づく線形境界要素を用いたが、二次元無限領域に対する基本解に基づく線形境界要素による解も同様な結果を与えることが確認されている。

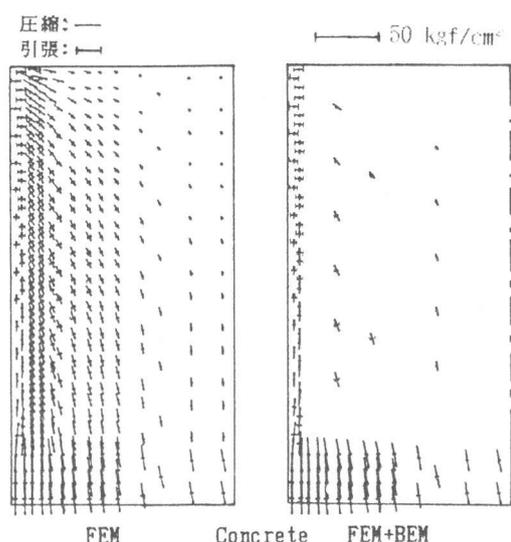


図-6 応力分布 (荷重 P=11.6 tonf)

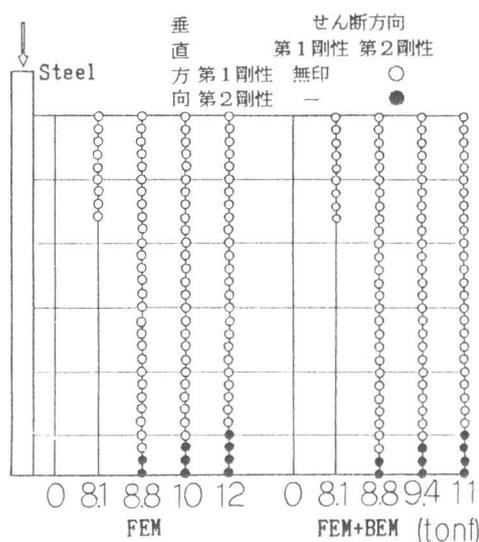


図-7 付着面の状態

4. 結論

鋼材とコンクリートとの間の付着問題を二次元問題として扱い、材料の非線形性が卓越する領域にはFEMを、また、非線形性が無視できる領域ではBEMを用いる結合解法により解析した結果を、FEMを単独で用いた結果と比較検討した。付着劣化やコンクリートの材料非線形性が付着面周辺に限定される本解析例のような場合には、結合解法による手法が計算効率の面でFEMより優れていることが確認された。結合解法に基づく手法は、本解析例のように、BEMの長所を生かす有効な手段と思われる。

本解析例では、有限な二次元領域のみを対象としたが、結合解法による手法は、種々の領域に対する基本解に基づく境界要素を既存の種々の有限要素と組み合わせることにより、より多様な応用が可能であると思われる。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会編：C. 鉄筋とコンクリートの付着，RC構造の有限要素解析に関するコロキウム論文集，JCI-C8，日本コンクリート工学協会，1984，pp.35-52.
- 2) 椿，山野辺，池田：面内力を受けるコンクリート平板の解析に関する一考察-有限要素法と境界要素法-，RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集，JCI-C5，日本コンクリート工学協会，1983，pp.29-36.
- 3) 山野辺，椿，池田：境界要素法を用いた鉄筋コンクリート部材の解析，土木学会年次学術講演会，第5部，1984，pp.385-386.
- 4) Brebbia, C.A. : The Boundary Element Method for Engineers, Pentech Press, London, 1978.
- 5) Telles, J.C.F., Brebbia, C.A. : Boundary Element Solution for Half-Plane Problems, Int.J.Solids Structures, Vol.17, No.12, 1981, pp.1149-1158.
- 6) 池田，大町，森，山口：スタッドジベルによる鋼材とコンクリートの応力の伝達について，第3回 JCI講演論文集，1981，pp.321-324.
- 7) 椿，池田：界面を含むコンクリート部材の弾塑性解析，土木学会年次学術講演会，第5部，1982，pp.79-80.