

コンクリートへの結合力モデルの適用
—解析の定式化と解析例—

○ 正会員 村上 聖¹
同 浦野登志雄²
同 三井 宜之³
同 岸谷孝一⁴ 同 平居 孝之⁵

1. はじめに

コンクリートへの結合力モデルの適用が期待され、その応用範囲も急速に拡大している。JCIの破壊力学の応用研究委員会報告¹⁾には、広範囲の応用例が示されている。本研究では、結合力モデルの非線形解析を、応力拡大係数及び変位の影響係数の重ね合わせにより定式化し、その有効性をいくつかの解析例を通じて示した。

2. 解析の定式化

結合力モデル解析は、仮想ひびわれ面での移動境界値問題として、線形弾性体に対する重ね合わせの原理により、その基礎方程式が得られる。仮想ひびわれの境界条件は、①仮想ひびわれ先端で応力連続条件が満足されること、②仮想ひびわれ面に作用する結合応力は、与えられた結合応力-COD関係を満足することである。

条件①に関し、応力拡大係数の重ね合わせにより、次式が得られる(以下、記号の説明は、図-1参照)。

$${}^p K_I \cdot P = \int_0^\omega {}^j K_I \cdot \sigma_j dx \quad \text{----- (1)}$$

ここで、仮想ひびわれを線分要素に分割し、要素上で結合応力が等分布するものとして、(1)式を離散化すると

$$\begin{aligned} &\approx \sum_j ({}^j K_I dx) \sigma_j = \sum_j {}^j \tilde{K}_I \cdot \sigma_j \\ \therefore P &= \sum_j ({}^j \tilde{K}_I / {}^p K_I) \sigma_j = \sum_j {}^j k \cdot \sigma_j \quad \text{----- (1)'} \end{aligned}$$

また、変位の重ね合わせにより、次式が得られる。

$$\phi_i = {}^p \phi_i \cdot P - \int_0^\omega {}^j \phi_i \cdot \sigma_j dx \quad \text{----- (2)}$$

$$u = {}^p u \cdot P - \int_0^\omega {}^j u \cdot \sigma_j dx \quad \text{----- (3)}$$

同様に、(2)、(3)式を離散化すると、

$$= {}^p \phi_i \cdot P - \sum_j {}^j \tilde{\phi}_i \cdot \sigma_j \quad \text{----- (2)'} \quad \text{----- (2)''}$$

$$= {}^p u \cdot P - \sum_j {}^j \tilde{u} \cdot \sigma_j \quad \text{----- (3)'} \quad \text{----- (3)''}$$

また、条件②に関し、結合応力-COD関係が区分的線形関数で与えられるものとする、

$$\phi_i = \alpha \cdot \sigma_i + \beta = \alpha \int_0^\omega \delta_{ij} \cdot \sigma_j dx + \beta \quad \text{----- (4)}$$

ここに、 α, β :区分的定数、 δ_{ij} :デルタ関数。

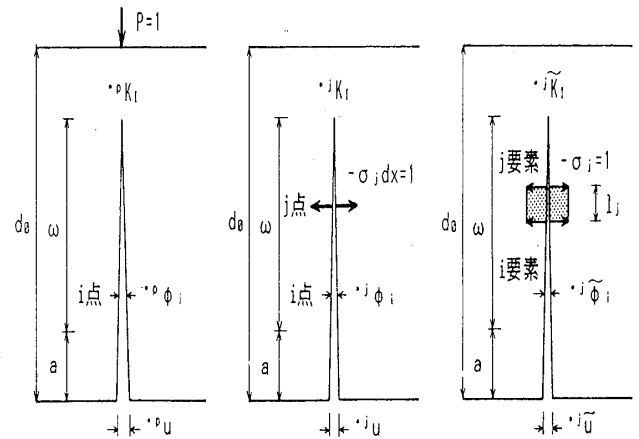
同様に、(4)式を離散化すると、

$$= \alpha \sum_j \delta_{ij} \cdot \sigma_j + \beta \quad \text{----- (4)'}$$

(1)'、(2)'、(4)'式より、

$$\sum_j ({}^p \phi_i \cdot {}^j k - {}^j \tilde{\phi}_i - \alpha \cdot \delta_{ij}) \sigma_j = \beta \quad \text{----- (5)'}$$

従って、(5)'式のマトリックスの解を求めれば、結合応力が得られ、(1)'、(3)'式より、荷重と任意点での変位が求められる。ただし、(5)'式中の α, β は、各要素のCODに応じて区分的に変化する、反復による収束計算が必要になるが、その操作は至って簡単である。また、影響係数は線形弾性解析により得られ、その計算には境界要素法を利用した。



P:荷重, d₀:梁せい, a:ひびわれ長さ, ω:仮想ひびわれ長さ, σ_j:仮想ひびわれ面のj点に作用する結合応力, φ_i:仮想ひびわれ面のi点のCOD, u:任意点の変位, ^pK_I, ^pφ_i, ^pu: P=1が作用するときのそれぞれK_I, i点のCOD, 任意点の変位, ^jK_I, ^jφ_i, ^ju: j点に-σ_jdx=1が作用するときのそれぞれK_I, i点のCOD, 任意点の変位, ^jtilde{K}_I, ^jtilde{φ}_i, ^jtilde{u}: j要素に-σ_j=1が作用するときのそれぞれK_I, i要素中央点のCOD, 任意点の変位, l_j: j要素長さ

図-1 本解析手法

3. 解析結果

図-2に、文献1)の普通コンクリートの3等分点曲げに関する共通解析結果との比較を示す。材料定数 (G_r=100 N/m, f_t=2.9MPa, E=27.5GPa) と解析手法が同一の秋田、石黒、内田、橘高らの解析結果と良い一致を示している(特に、橘高による解析は、K_Iの厳密解が得られている問題に対して結合力モデル解析の厳密解を与える)。

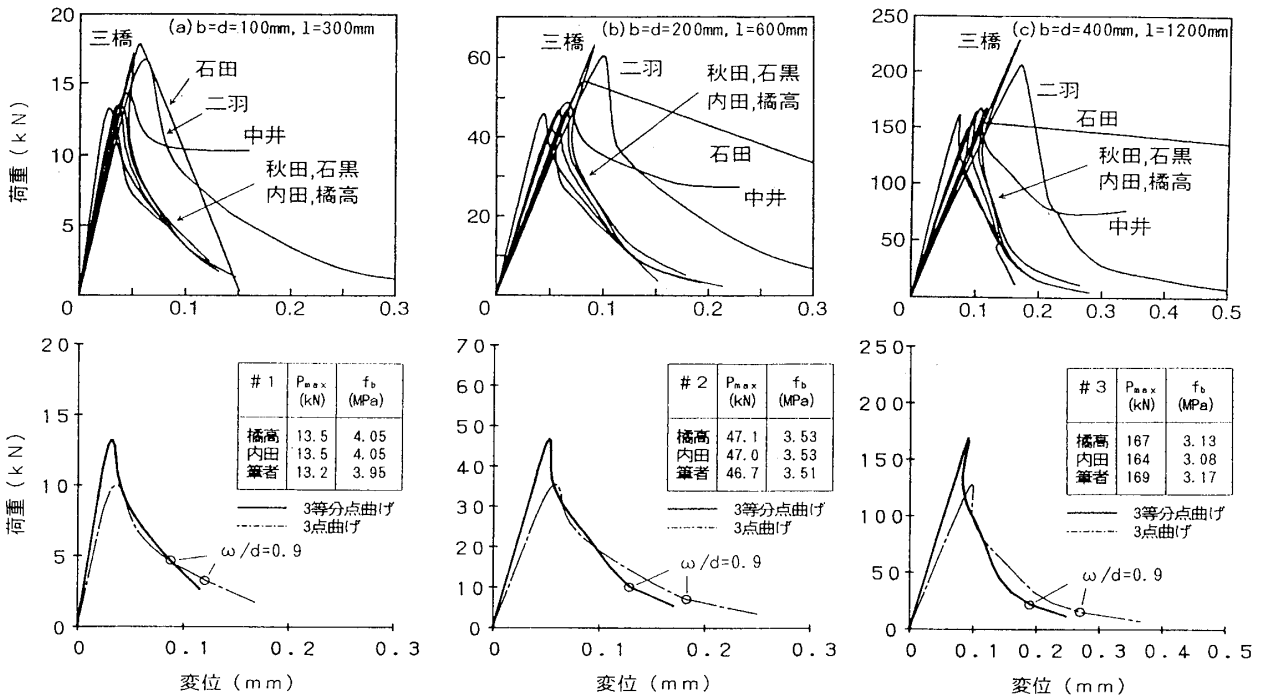


図-2 普通コンクリートの3等分点曲げに関する共通解析結果¹⁾との比較

図-3に、仮想ひびわれ先端の境界条件が異なる場合の荷重-変位曲線及び結合応力分布の解析結果の比較を示す。図より、境界条件の違いにより、荷重-変位曲線には差はみられないが、結合応力分布に差異がみられ、破壊進行領域内部の応力を解析的に検討する場合には、仮想ひびわれ先端の境界条件に十分注意する必要がある。

図-4に、 d/l_{ch} に対する f_b/f_t の変化の本解析結果を示す。また3等分点・3点曲げ強度の推定式を次式に示す。

$$f_b/f_t = 0.947 + 1/[0.487 + 5.024\{(\alpha/E)d\}^{0.700}] \quad \text{--- (6)}$$

$$f_b/f_t = 1.063 + 1/[0.516 + 3.893\{(\alpha/E)d\}^{0.656}] \quad \text{--- (7)}$$

ここに、 α :バリエーションにおける第1軟化勾配、六郷らの1/4モデルでは $\alpha/E=1/l_{ch}$ 、リアモデルでは $\alpha/E=1/2l_{ch}$ となる。上式は、 $d/l_{ch} \rightarrow 0$ (仮想ひびわれ先端が梁上端に達したときのDugdaleモデルに相当) のとき、3等分点・3点曲げともに $f_b/f_t=3$ 、 $d/l_{ch} \rightarrow \infty$ (線形弾性に相当) のとき、3等分点曲げでは $f_b/f_t=0.947$ 、3点曲げでは $f_b/f_t=1.063$ になること、バリエーションでは第1軟化領域の範囲で最大荷重に達し、 f_b/f_t は $(\alpha/E)d$ のみに依存し、 f_t 、 G_F 、バリエーション軟化形状には無関係であることに基づいている。また、既報²⁾に示すように、引張軟化曲線が梁寸法に依存する場合も、 f_t 、 l_{ch} の寸法効果を別途扱うことにより、上式をそのまま用いることができる。

【参考文献】

- 1) JCI, 破壊力学の応用研究委員会報告書, 1993. 10
- 2) 村上他, 学会大会学術講演梗概集, 471-472, 1993. 9

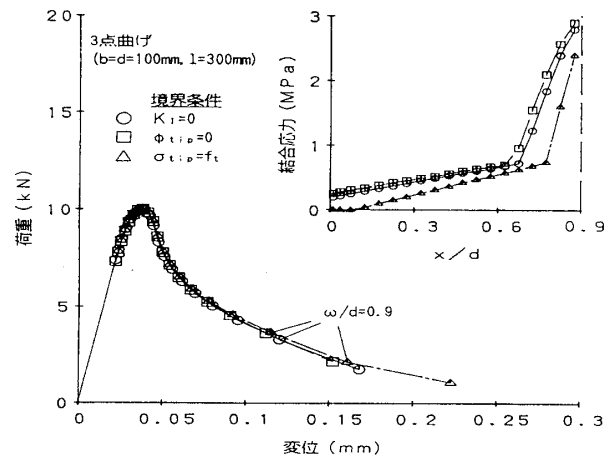


図-3 仮想ひびわれ先端の境界条件の影響

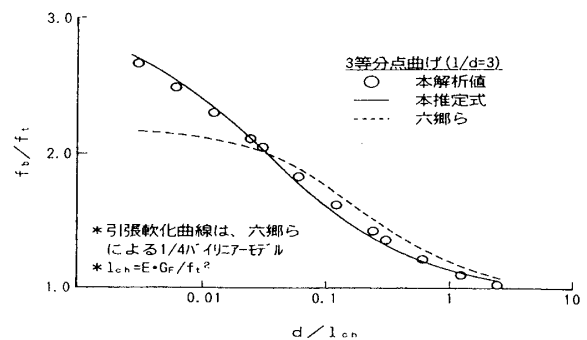


図-4 f_b/f_t と d/l_{ch} の関係

*1 熊本大学工学部建築学科 助教授・工博 Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Fac. of Engineering, Kumamoto Univ., Dr. Eng.
 *2 八代工業高専土木建築工学科 助手・工修 Research Assoc., Civil and Architectural Engineering, Yatsushiro National College of Technology, M. Eng.
 *3 熊本大学工学部建築学科 教授・工博 Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Kumamoto Univ., Dr. Eng.
 *4 日本大学理工学部建築学科 教授・工博 Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Engineering, Nihon Univ., Dr. Eng.
 *5 大分大学工学部 教授・工博 Prof., Faculty of Engineering, Oita Univ., Dr. Eng.