

論文 格子モデルによるくさび挿入コンクリート試験体の引張破壊解析

石黒 覚^{*1}

要旨: 格子モデルを適用した数値解析法により一軸引張試験体とくさび挿入試験体の引張破壊解析を行った。骨材、モルタルおよび界面の材料特性、格子モデルにおける梁要素の剛性および破壊基準などが引張破壊特性に及ぼす影響をこれらコンクリート試験体の解析結果より明らかにした。また、破壊力学実験に用いたくさび挿入試験体の引張破壊性状ならびに荷重-開口変位の挙動を解析し、格子モデルの適用性を検証した。

キーワード: 格子モデル、引張破壊、コンクリート試験体、有限要素法

1. まえがき

コンクリートの不均質性（骨材、モルタル、骨材とモルタルの界面）を考慮して破壊挙動を解析するためのモデルとして格子モデルが提案されている。この解析モデルは、特定すべき解析パラメータの数が少なく、単純なモデルであること、また、破壊進行領域で起こっている現象を検討する上で有用な情報が得られることなどの特徴を有している。格子モデルをコンクリートの破壊解析に適用した研究には、Schlangenらによる一連の研究[1, 3, 4, 5]およびBolanderらによる研究[2]がある。これらの研究では、一軸引張試験体、アンカーボルト引抜試験体あるいはCT試験体の破壊解析を通じて格子モデルの有用性が示されている。

格子モデルは単純なモデルである反面、解析パラメータの設定が計算結果に大きく影響するため、その適用に際しては解析パラメータの設定に配慮する必要がある。本研究では既往の文献に示された解析パラメータを基本値として、それらの値を変化させて一軸引張試験体とくさび挿入試験体の解析を行い、1) 骨材、モルタルおよび界面の材料特性、2) 格子モデルにおける梁要素の剛性および破壊基準などの設定値が破壊特性に及ぼす影響について検討および考察を行った。

2. 格子モデルによる数値解析法の概要

2. 1 格子メッシュ

解析断面を図-1に示すような弹性梁要素から構成される正三角形格子メッシュにより分割する。梁要素は幅B、高さHの断面を持ち、各節点は3つの自由度を有する。

2. 2 骨材分布モデル

骨材を直径の異なる円で表わし、正規乱数を発生させて寸法の大きい骨材から順次その分布位置を決定し、また、骨材と骨材の間隔 (DA, DB : 骨材の径) は、 $1.1 \times (DA+DB)/2$ を満足するように二次元断面内に分散配置させる。

2. 3 骨材、モルタルおよび界面の材料特性

解析断面の格子メッシュと骨材分布モデル図を重ね合わせ、骨材、モルタルおよび界面領域に対応する梁要素を区別する。すなわち、図-2において格子節点 i, j が共に円内にある要素は骨材、節点の一方が円内で他方が円外のとき界面、また、節点 i, j が共に円外にある要素をモルタルとする。骨材、モルタルおよび界面に区別された各梁要素に対して、材料特性（破壊強度および弾性係数）を設定することにより、コンクリートの不均質性をモデル化する。

* 1 大阪府立大学講師 農学部農業工学科、農博（正会員）

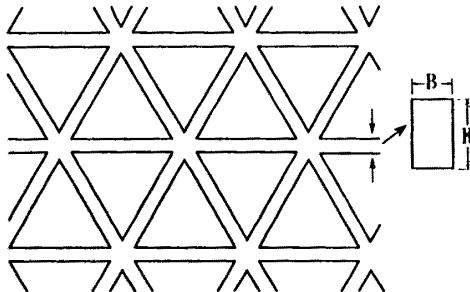


図-1 正三角形格子モデル

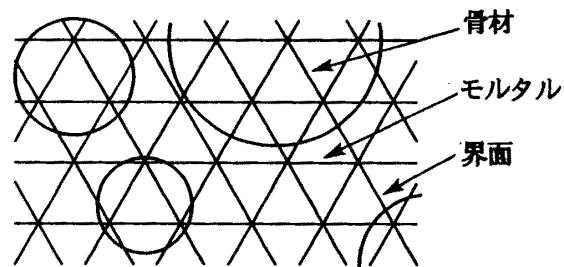


図-2 骨材、モルタルおよび界面に対応する梁要素

2. 4 破壊基準および数値解析法

有限要素法による弾性解析結果より、各梁要素の有効応力 σ を算定し、同時に有効応力 σ と破壊強度 σ_f との応力比 $C = \sigma / \sigma_f$ を計算する。現荷重段階において応力比 C の最も大きい梁要素が破壊するとみなし、 $C=1.0$ となる荷重値を計算する。次の荷重段階では、破壊した梁要素を取り除いた格子モデルにより同様に弾性解析を行い、新たに破壊する梁要素と荷重値を決定する。このように各荷重段階において1個の梁要素を破壊させながら弾性解析を繰り返し、破壊に至る非線形挙動を解析する。なお、梁要素の有効応力 σ は次式(1)により算定する。

$$\sigma = \beta (F/A + \alpha (M_i, M_j)_{\max}/W) \quad (1)$$

ここで、 M_i, M_j : 節点 i および j における曲げモーメント、 F : 軸力、 A : 梁要素の断面積、 W : 梁要素の断面係数、 α : 梁要素の曲げが破壊に及ぼす影響を制御する係数、 β : 梁要素の有効応力を構成材料の応力レベルに換算する係数。

3. コンクリート試験体の引張破壊解析

3. 1 解析モデル

一軸引張試験体における骨材分布モデルおよびメッシュ分割図をそれぞれ図-3 (a) および (b) に示す。同様に、くさび挿入試験体における骨材分布モデルおよびメッシュ分割図をそれぞれ図-4 (a) および (b) に示す。解析断面のメッシュ分割に際しては、格子モデルの領域を正三角形格子メッシュ（梁要素の一辺の長さは2.5mm）により、その他の領域を平面応力要素により分割する。

二次元断面における骨材分布モデルに関しては、次のように作成した。先ず、コンクリートの配合表より、単位体積中に占める粗骨材体積の割合を求める。二次元解析断面において円形骨材がこの割合で分散配置していると仮定する。次に、円形骨材の種類（ここでは、径が5, 7, 9, 11mmの4種類）を仮定し、各寸法の骨材が全粗骨材中に占める割合に基づいて、骨材個数を決定する。この方法により計算した円形骨材の個数は、それぞれ、一軸引張試験体においては5mm(54個), 7mm(28個), 9mm(23個), 11mm(16個)、くさび挿入試験体においては5mm(49個), 7mm(25個), 9mm(21個), 11mm(14個)である。

表-1 解析に用いた材料係数

弹性係数 E (GPa) 骨材(E_A) モルタル(E_M) 界面(E_B)	破壊強度 σ_f (MPa)			α		
	(σ_A)	(σ_M)	(σ_B)	(α_A)	(α_M)	(α_B)
70 25 25	10	5	1.25	0.33	0.33	0.005

3. 2 解析係数

骨材、モルタルおよび界面の破壊強度 (σ_A , σ_M , σ_B) および弾性係数 (E_A , E_M , E_B)、有効応力の算定式中の係数 (α_A , α_M , α_B) に関して、それらの基本値を既往の文献より表-1のように仮定する。これらの解析係数の値を基本として、着目する係数の値を変化させてコンクリート試験体の解析を行い、各種係数が解析結果に及ぼす影響を調べる。また、梁要素の剛性が解析結果に及ぼす影響を調べるために、断面の幅を一定 ($B = 1$) として断面の高さ H を変化させて解析した。係数 β には、0.3 ~ 0.4を基本的な値として仮定する。

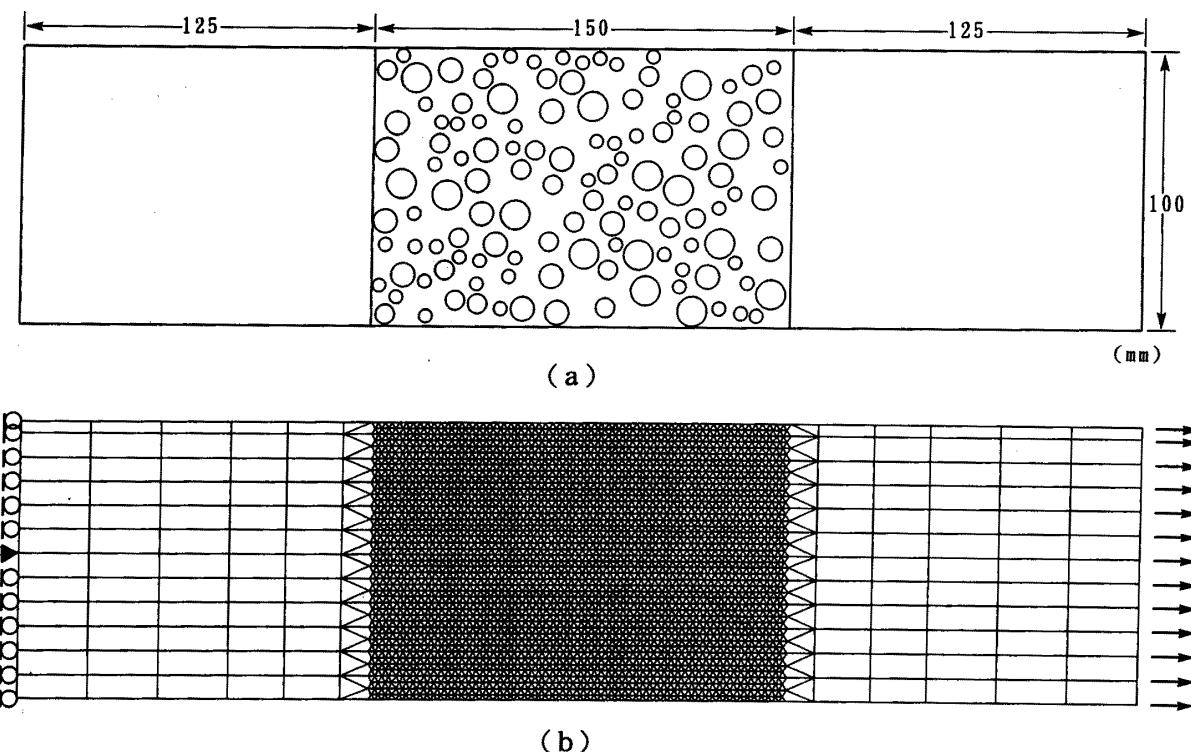


図-3 一軸引張試験体の解析モデル (a) 骨材分布モデル、(b) メッシュ分割図

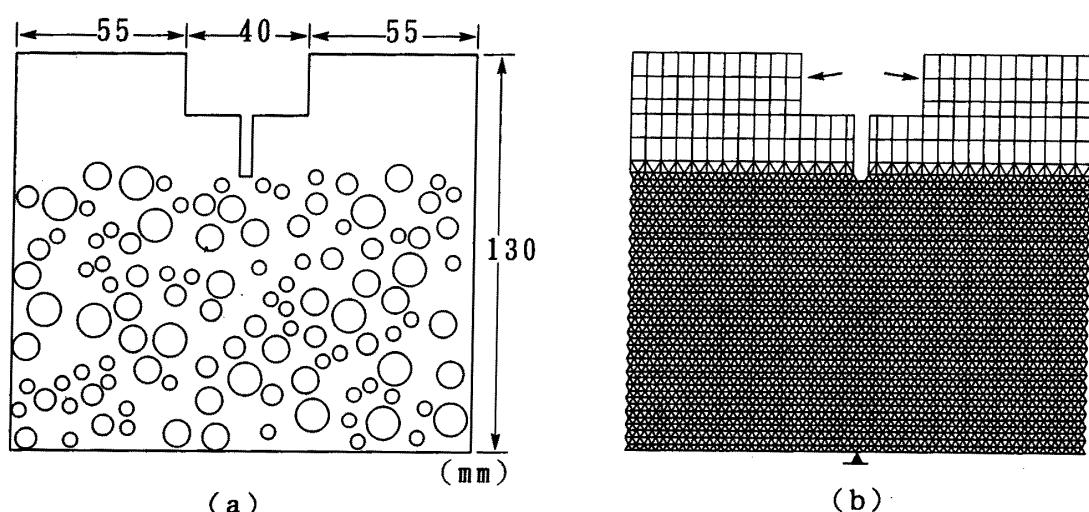


図-4 くさび挿入試験体の解析モデル (a) 骨材分布モデル、(b) メッシュ分割図

3. 3 解析結果および考察

(1) 弹性係数および引張強度

図-5は、格子モデルの一軸引張剛性 E_L と梁要素の断面高さHの関係を表している。格子モデルの一軸引張剛性は、格子モデルの断面（中央150mmの区間）における平均ひずみと引張応力の関係より決定した。梁要素の断面高さの増大に伴って曲げおよび軸力に対する剛性が大きくなり、格子モデルの引張剛性も大きくなる。一般的なコンクリートの弾性係数に対しては、梁要素の断面高さHが1.5~2.0mmに対応していると考えられる。

図-6(a)および(b)は、それぞれ一軸引張試験体およびくさび挿入試験体における梁要素の断面高さHと引張強度の関係を表している。曲げ引張強度（曲げと引張荷重を受ける断面として算定）および一軸引張強度は、解析による最大荷重値より算定した。これらの解析結果より、一般的なコンクリートの引張強度に対しては、係数 β が0.3~0.5、梁要素の断面高さHが1.5~2.0mmに対応していると考えられる。ただし、弾性係数、破壊強度および係数 α としては表-1の値を用いた。

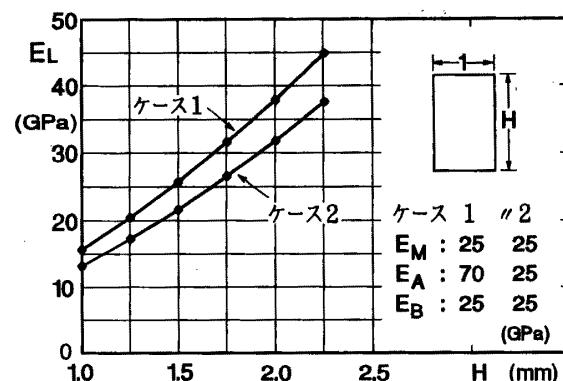


図-5 格子モデルにおける一軸引張剛性 E_L と梁要素の断面高さHの関係

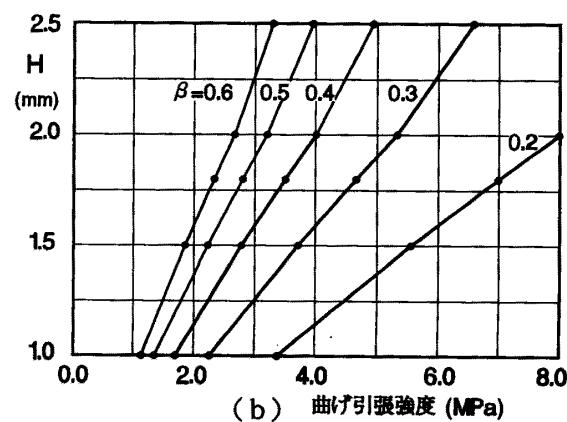
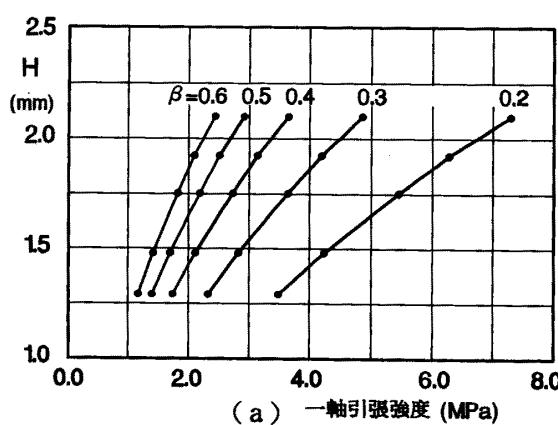


図-6 梁要素の断面高さHと引張強度の関係 (a) 一軸引張強度、(b) 曲げ引張強度

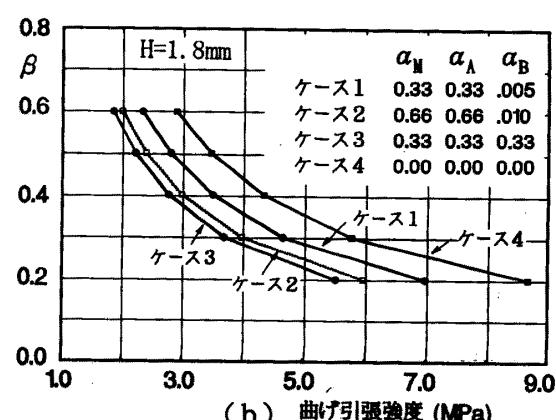
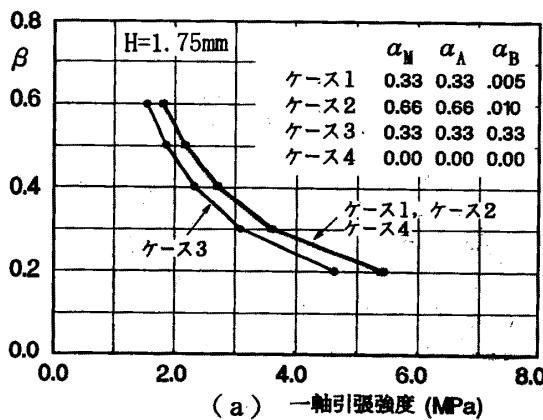


図-7 係数 α 、 β と引張強度の関係 (a) 一軸引張強度、(b) 曲げ引張強度

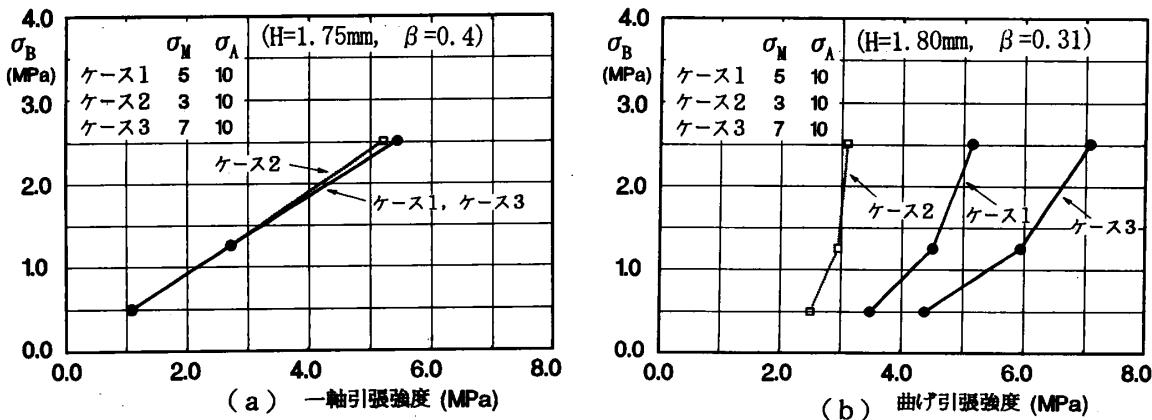
図-8 界面の破壊強度 σ_B と引張強度の関係 (a) 一軸引張強度、(b) 曲げ引張強度

図-7 (a) および (b) は、梁要素の有効応力算定式中の係数 α , β と引張強度の関係を表している。係数 β は、梁要素の有効応力を材料の応力レベルに換算する係数である。式(1)から分かるように、引張強度は β の値に反比例して変化するが、ひび割れ性状の解析結果は β の値に影響されない。係数 α は梁要素の曲げが破壊に及ぼす影響を制御する係数である。解析結果によれば、 α_M の変化が一軸引張強度に及ぼす影響は小さく、一方、曲げ引張強度に及ぼす影響は大きいことが分かる。この理由として、くさび挿入試験体の引張破壊性状（ひび割れの種類、分布、進展方向など）が、モルタルと界面の係数の相対的な大小関係に影響されるためと考えられる。また、界面に関する係数 α_B の影響は最も大きく、この係数の増加に伴って引張強度が低下する傾向を示している。

図-8 (a) および (b) は、界面の破壊強度 σ_B と引張強度の関係を表している。解析結果によれば、一軸引張強度は界面の破壊強度にほぼ比例して増加しており、また、モルタルの破壊強度 σ_M が一軸引張強度に及ぼす影響は小さい。これに対して曲げ引張強度は、界面とモルタルの両者の破壊強度に影響を受けている。この理由として、くさび挿入試験体の引張破壊性状（ひび割れの種類、分布、進展方向など）が、モルタルと界面の破壊強度の相対的な大小関係に影響されるためと考えられる。

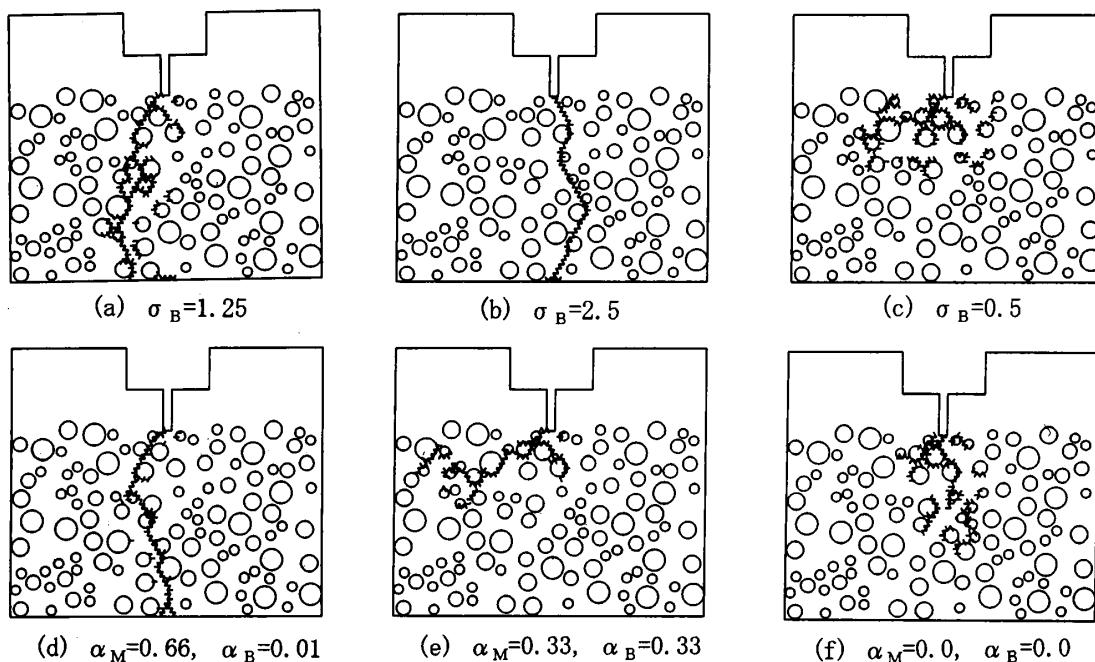


図-9 くさび挿入試験体における引張破壊性状(H=1.80mm, β=0.31, その他は表-1の値を使用)

(2) くさび挿入試験体の荷重-開口

変位および引張破壊性状

図-9(a)～(f)は、くさび挿入試験体における引張破壊性状の解析例を表している。係数 α と破壊強度 σ の違いにより、界面におけるひび割れおよびモルタルひび割れの進展状況が異なっている。表-1に示した材料係数を用いれば実験結果と対応したひび割れ性状が解析できると考えられる。

図-10は、くさび挿入試験体における荷重-開口変位の関係を表している。ここでは、破壊力学実験に用いたコンクリートの弾性係数(3100MPa)と引張強度(3.64MPa)に基づき、断面高さ H (=1.80mm)と係数 β (=0.31)を仮定し、その他の材料係数は表-1の値を用いて解析した。実験および解析による最大荷重は大体一致している。しかし、解析では最大荷重以降の荷重低下が著しく、実験に比べて破壊エネルギーが小さくなっている。これは格子モデルを用いた本数値解析法において、梁要素の破壊後の挙動を考慮していないことが一因と考えられる。

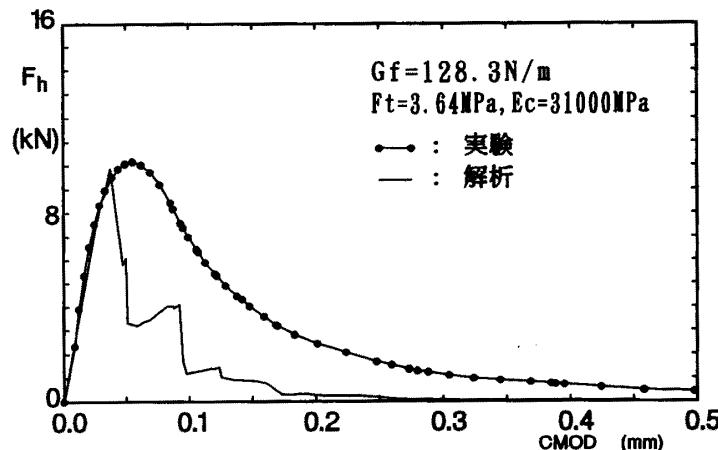


図-10 くさび挿入試験体の荷重-開口変位の関係

4.まとめ

格子モデルを適用した数値解析法により一軸引張試験体およびくさび挿入試験体の引張破壊解析を行い、コンクリートへの格子モデルの適用性を検討した。本研究の結果は以下のようにまとめられる。

- 1) 格子モデルにおける骨材、モルタルおよび界面の材料特性、梁要素の剛性および破壊基準などの解析パラメータが、コンクリート試験体の引張破壊特性に及ぼす影響を明らかにした。
- 2) 格子モデルにおける各種解析パラメータを適切に設定してくさび挿入試験体の解析を行い、実験結果と比較した。この結果両者は、引張破壊性状および最大荷重において比較的良好に一致し、荷重-開口変位の最大荷重以降の挙動において差が見られることがわかった。

参考文献

- [1] Schlangen, E. and Van Mier, J. G. M. : Lattice Model for Numerical Simulation of Concrete Fracture, Dam Fracture, Proceedings from the International Conference, Boulder Colorado, USA, pp. 515-527, Sep. 1991
- [2] J. E. Bolander and Y. Kobashi : Size Mechanisms in Numerical Concrete Fracture, Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proceedings FRAMCOS-2, Edited by Folker H. Wittmann, pp. 535-542, Jul. 1995
- [3] Schlangen, E. and Van Mier, J. G. M. : Experimental and Numerical Analysis of Micromechanisms of Fracture of Cement-Based Composites, Cement and Concrete Composites, 14, pp. 105-118, 1992
- [4] Arslan, A., Schlangen, E. and Van Mier, J. G. M. : Effect of Model Fracture Law and Porosity on Tensile Softening of Concrete, Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proceedings FRAMCOS-2, Edited by Folker H. Wittmann, pp. 45-54, Jul. 1995
- [5] Schlangen, E. : Computational Aspects of Fracture Simulations with Lattice Models, Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proceedings FRAMCOS-2, Edited by Folker H. Wittmann, pp. 913-928, Jul. 1995