個別要素法によるＲＣ床版の押し抜きせん断耐力

Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Slab by DEM Method

高海克彦*、濱田純夫**
Katsuhiko TAKAMI　and　Sumio HAMADA

*工博　山口大学助教授　工学部社会建設工学科（〒755-8611　山口県宇部市常盤台 2557）
**Ph.D　山口大学教授　工学部社会建設工学科（〒755-8611　山口県宇部市常盤台 2557）

The distinct element method is applied to the analysis for the punching shear strength of reinforced concrete slab. The reinforced concrete slab is modeled the summation of tow types of element. One is concrete circle element and the other is concrete element including an equivalent steel plate with the reinforcing bar. To apply this method to the RC slab supported at four-edge line, the slab is modeled as a trapezoidal beam on the elastic foundation. The modulus elasticity of the foundation is determined by the plate theory. Calculation was carried out and results were compared with the experimental data. The result suggests the effectiveness of this method for the research of punching shear behavior of the RC slab..

key words ; punching shear strength, reinforced　concrete slab,　the distinct element method

１．まえがき

輪荷重を直接受ける道路橋床版は，交通量の増大および車両の大型化の影響を大きく受け，過酷な状況に曝されている。ＲＣ床版の損傷メカニズムの究明や設計のための耐力算定式の提案がこれまで多く成されてきたが，その機構の複雑さからほとんどが実験結果から帰納的に提示されたものである。

ＲＣ床版の解析的研究ではＦＥＭを用いた解析が主に行われ，積層版要素および各種材料パラメーターを用いることにより，床版のたわみ，応力および終局耐力に関してほぼ妥当な解析結果が得られるに至っている[1)~3)]。しかし輪荷重のように小さい載荷面積で載荷されるＲＣ床版の主たる破壊モードは押し抜きせん断であることが明らかにされており，これをＦＥＭで追跡するためには，積層板の平面保持という基本的仮定を外さなければならない。こうすると要する有限要素の要素数は莫大なものとなり，解くべき連立方程式も大きく，実用化には未だ改良の余地がある。

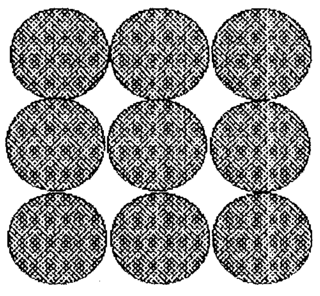
本研究では，ＲＣ床版のひび割れ進展，せん断破壊モードの追跡のため，個別要素法の適用を試みた。個別要素法は，個々の要素の運動方程式を順次解く手法であり，計算アルゴリズムが極めて簡単であり，有限要素法のような莫大な記憶領域を必要としない。

個別要素法は，非連続体の破壊解析のために Cundall によって開発された手法であり，近年コンクリート構造物の破壊とくに衝撃問題の解法に威力を発揮している[4)~7)]。

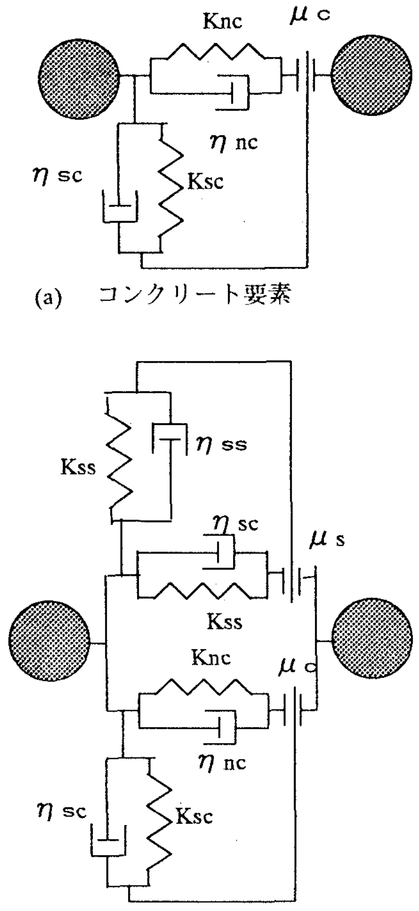
２．解析理論

２．１個別要素法[6)]

コンクリートは巨視的に見ると，均一の連続体と仮定でき，図―１のように剛体円要素の集まりとし，それらの要素間はバネとダッシュポットにより力が伝達されるものとする。ここでは，要素の座標や力のつりあいを容易に与えることができるような規則的な配列とした。コンクリートを離散的な円要素にモデル化するため，連続体内部に空間が生じてしまうが，互いに力を及ぼし合う円要素は，接触している場合（接触結合）と一空間を挟んだ場合（非接触結合）の２つを考える。即ち連続体を保持させるために，結合バネの考え方を導入し，モデル化後の空間を有する斜め要素同士についても要素の結合条件を設定した。したがって，要素の結合条件は次式を満足するとき結合しているとみなす。



図－１　規則配置個別円要素



(a)　コンクリート要素

(b)鉄筋を含むコンクリート要素

図－2　要素構成

$$R_{ij} \leq \beta(r_i + r_j)$$

ただし，Rij：要素 i と要素 j との距離，ri, rj：それぞれ要素 i と要素 j の半径，β：結合パラメーター。ここではβ＝1.14142 とし，斜め要素の結合を考慮した。

2．2バネ定数および粘性減衰係数の決定法[6)]

コンクリート要素同士は，図－2(a) のように法線方向のバネk_{nc}とダッシュポットη_{nc}を，接線方向にもバネk_{sc}とダッシュポットη_{sc}を設ける。また，接線方向にはクーロンのすべり条件を満足するスライダーμ_cを設けた。

鉄筋を含むコンクリート要素同士の結合は，コンクリートをモデル化したバネとダッシュポットの他に，鉄筋部分のバネk_{ns}とダッシュポットη_{ss}を設けた。

鉄筋を含むコンクリート要素とそうでないコンクリート要素はコンクリート要素同士の結合法（図-2(a)）を示すものとした。

各要素どうしを繋ぐバネ定数は，次のようにして決定した。結合する要素間の接触幅をlとすると，有効接触面積は次式で求められる。

$$A_{ij} = ld = 2r\alpha \cdot d$$

ただし，d：要素の幅（奥行き），r：要素半径，α：有効接触面積パラメター。ここではαは接触結合要素ではα＝tan(60℃)，非接触結合要素ではα＝tan(30℃)とした。

鉄筋を含む要素同士では，接触有効面積は鉄筋の接触有効面積A_{ijs}とコンクリートの接触有効面積A_{ijc}とからなるものとする。鉄筋の有効接触面積は単位奥行き当たりの換算断面積とする。したがって，コンクリートの有効接触面積は要素同士の接触有効面積から鉄筋のそれを差引いたものとなる。この鉄筋とコンクリートの接触有効面積を用いると，法線方向と接線方向のバネ力が次のように表される。

コンクリート

$$f_{nc} = E_c \varepsilon_c A_{ijc} = \frac{E_c A_{ijc}}{R_{ij}} u_n$$

$$f_{sc} = G_c \gamma A_{ijc} = \frac{G_c A_{ijc}}{R_{ij}} u_n$$

鉄筋

$$f_{ns} = E_s \varepsilon A_{ijs} = \frac{E_s A_{ijs}}{R_{ij}} u_n$$

$$f_{ss} = G_s \gamma A_{ijs} = \frac{G_s A_{ijs}}{R_{ij}} u_n$$

ここに，E_c，E_sはコンクリートおよび鉄筋の弾性係数，G_c，G_sはコンクリートおよび鉄筋のせん断弾性係数，ε，γは要素間の直ひずみとせん断ひずみ，u_n，u_sは要素間の法線方向および接線方向の相対変位，R_{ij}は要素間の初期距離である。

上式から，コンクリートおよび鉄筋に関して法線方向および接線方向のバネ定数は次のように表される。

コンクリート：

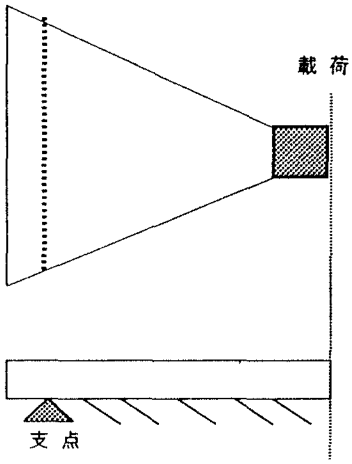
$$k_{nc} = \frac{E_c A_{ijc}}{R_{ij}}$$

$$k_{sc} = \frac{G_c A_{ijc}}{R_{ij}}$$

鉄筋

$$k_{ns} = \frac{E_s A_{ijs}}{R_{ij}}$$

$$k_{ss} = \frac{G_s A_{ijs}}{R_{ij}}$$



図－3　ＲＣ床版のモデル化

コンクリート要素同士の法線方向のバネは引張側では引張強度に達すると引っ張り破壊しクラックが生じる，それ以後力は負担しない。一方，圧縮側は圧縮強度に達し後は弾塑性とし圧壊ひずみに達すると圧壊する。接線方向のせん断バネは完全弾塑性とし，破棄条件としてコンクリートのせん断強度Cと内部摩擦角（$\phi = \tan^{-1}\mu_c$）および法線方向力 f_{nc} から成る Mohr-Coulom の破壊条件を採用した。また，鉄筋を含む要素どうしにおいては，コンクリートに関しては，法線・接線方向ともコンクリート要素どうしにおけるバネの関係をそのまま用いた。鉄筋の法線方向のバネはお圧縮引張ともバイリニアー型の応力－ひずみ関係を用い，破断ひずみに達した後，応力は解放するとした。鉄筋のせん断方向バネについても弾塑性モデルを用いた。

ダッシュポットの粘性減衰係数はその決定方法がいろいろあるが，コンクリートおよび鉄筋とも材料の減衰定数を用いて一質点系の振動問題で定義される関係式から決定した。

2．3　RC床版解析への適用

四辺単純支持されたＲＣ床版の押し抜きせん断解析に個別要素法を適用するに当たり，床版を次のようにモデル化した。解析対象を床版の半分とし，個別要素の奥行きを図－3 のように載荷版幅と支持辺間で直線変化させた変断面はりと考える。奥行き方向の長さの異なる要素同士の有効接触面積を求めるときは，両要素の平均を取った。

床版は他対辺でも単純支持されているのでそれを考慮するため変断面はりが地面でバネによって支えられているいわゆる弾性床上のはりとする。弾性床のバネ定数は，四辺単純支持の床版中央のたわみの弾性解と一致するように便宜的に定める。

2．4　解析手順

2．2，2．2で述べた個別要素およびそれを結合するバネ，ダッシュポット，およびスライダーから成るＲＣ床版モデルの運動方程式を修正オイラー法で通常の個別要素法のアルゴリズムにしたがって解く。

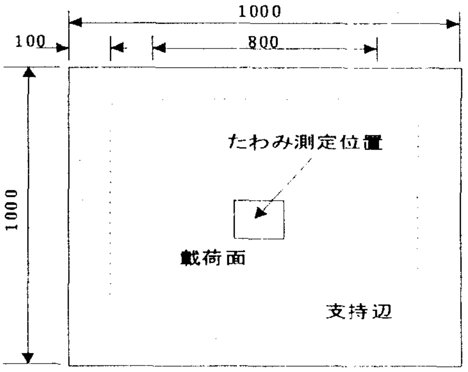
3　押し抜きせん断試験と解析モデル

3．1実験概要

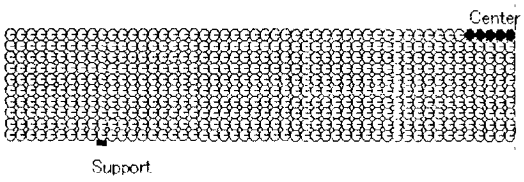
解析値との比較のため，対象とした供試体の押し抜き実験について記す。本実験に用いた供試体は図－3 に示すような版厚 10cm のＲＣ床版であり，四隅の浮き上がり防止装置は設けないで四辺単純支持されている。SD30, D10 の鉄筋を有効高さ 7.5cm で両支間に９本づつ等間隔に配置した。載荷は，供試体中央に厚さ 1mm の硬質ゴムを介し，辺長 10cm 厚さ 3cmm の正方形鋼版を置いて 3.0tf/分の速度で載荷した。

3．2解析モデル

3．1に記した RSC5 の床版を半径 5mm の個別円要素にモデル化し，その要素配列を図－5 に示す。引張鉄筋を含む要素はしたから３列目である。載荷版の半分に相当する５要素分に荷重を与える。解析における材料定数は表－１のとおりである。



図－4　実験ＲＣ床版



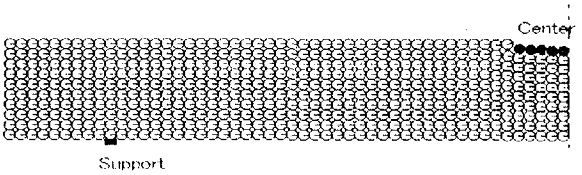
図－5　床版個別要素配列

表－1　材料諸定数

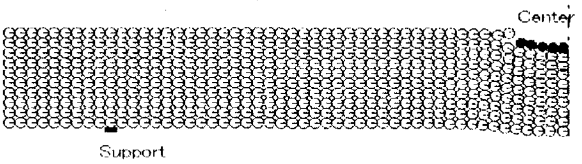
コンクリート	
弾性係数 (GPa)	32
圧縮強度(Mpa)	32.7
引張強度 (Mpa)	3
せん断強度 (Mpa)	4.6
ポアソン比	0.2
内部摩擦角 (rad)	0.612
鉄筋	
弾性係数 (Gpa)	206
降伏強度 (Mpa)	338
ポアソン比	0.3
破断ひずみ	0.2

また，弾性床のバネ係数として200N/mmを用いた。

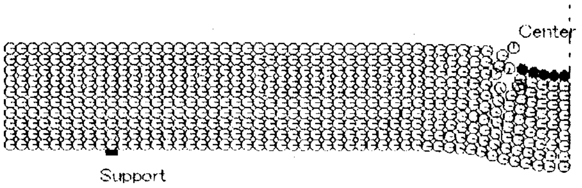
4．結果と考察



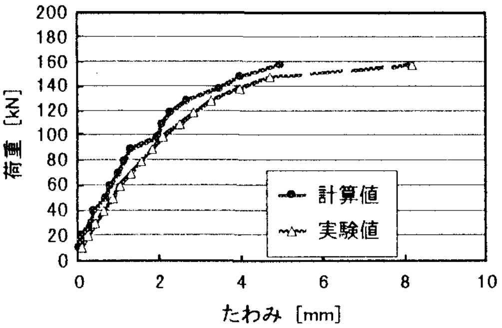
図－6　変位図　(荷重　30kN)



図－7　変位図　(荷重　88kN)

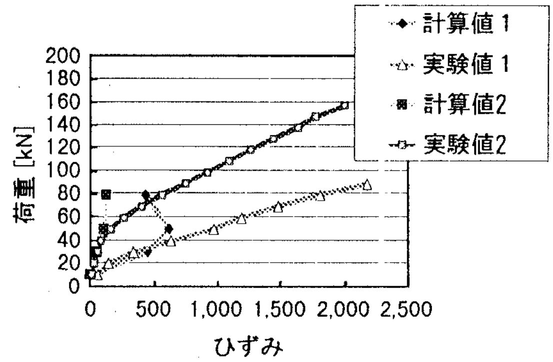


図－8　変位図　(荷重　137kN)



図－9　実験値との比較

図－6，7，8に各荷重における変位モードを記す。変位縮尺は実際の50倍でとった。また，図－9に床版中央のたわみの実験値との比較を示す。変位モードは荷重が大きくなると荷重載荷部が陥没するようになるが，それ以外の部位のたわみは出ていない。実験値との比較では比較的追跡できているようである。



図－10　ひずみの比較

図－10に荷重直下の鉄筋ひずみと中央から15cm離れた鉄筋のひずみを示す。荷重が小さいときは比較的あっているが，大きくなると実験値とは合わない。

5．まとめ

個別要素法のRC床版押し抜きせん断解析への適用を試みた。本解析は四辺単純支持のRC床版を弾性床上の変断面はりにモデル化して，2次元要素での解法をねらったものである。本論文で検証したかぎり，たわみと押し抜きモードには実験との定性的な適合は見られるとはんだんしたが，ひずみ等のより詳細な検討には至らなかった。構造モデルおよび材料モデルに関してパラメーター解析が必要であると思う。

参考文献

1）内山武司，上田正生，土橋由造：コンクリート床版の弾塑性解析，日本建築学会論文集，No.276，pp.33～41，1979

2）Vecchio,F.:Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Membranes. ACI Structural Journal, January-February, pp.26～35,1989

3）Hsu,T,T.C.: Nonlinear Analysis of Concrete Membrane Elements, ACI Structural Journal, September-Octorber, pp.552～561,1989

4）下田義文，鈴木真次，石川信隆，古川公平：個別要素法によるモルタル片持ちばりの衝撃応答解析，構造工学論文集，Vol.38A，pp.1467～1476，1992

5）森川博司，澤本桂和，子鹿紀英：個別要素法を用いたコンクリートの破壊解析，日本建築学会構造系論文集，No.473，pp.127～135，1995

6）鈴木真次，石川信隆，古川公平，水山高久，石川芳治：個別要素法による鉄筋で補強した砂防ダム袖部の衝撃応答解析，構造工学論文集，Vol.43A，pp.1555～1566，1997

7）中田吉彦，桝谷浩，梶川康夫，森島芳大：個別要素法による鉄筋コンクリートはりの衝撃挙動解析，構造工学論文集，Vol.44A，pp.1761～1771，1998