

論文 RC 要素のゾーニングモデルの精度向上及び 3次元 FEM 解析への適用

新倉 一郎*1・安 雪暉*2

要旨:本研究は、軸方向鉄筋の断面内配置の詳細がせん断破壊に及ぼす影響と機構について考察するものである。2次元問題に対して提案された、付着機構による応力伝達有効領域の決定法(ゾーニング法)を、3次元応力状態の観点から再評価した。部材幅方向に非均質に配置した軸方向鉄筋は、たとえ断面総量が同一であっても、鉄筋個々の分散形態が異なれば、部材耐力が変化することを実験によって示した。鉄筋の3次元的配置を考慮して、2次元解析で等価な結果を得るためには、鉄筋の付着に伴う応力伝達範囲が異なることを適切にゾーニング法に取り込むことが必要であることを、実験および解析両面から示した。

キーワード:ゾーニング手法、せん断破壊、引張軟化特性パラメーター、RC、付着

1. はじめに

鉄筋近傍のコンクリートは鉄筋との付着機構によって、ひび割れ発生以後もひび割れ間に挟まれた領域で引張及びせん断力を伝達する機構を保持することができる。既往の研究¹⁾においてもひび割れ幅を算定する際に鉄筋の付着に着目している。この領域を付着特性と材料強度から事前算定しておけば、付着ひび割れを陽に考慮せずとも、寸法の大きな有限要素を用いた非線形解析で十分な精度を達成できることが示されている²⁾³⁾。奥行き方向に一樣な配筋のRC構造物に対しては(完全2次元)、既往の有効鉄筋拘束面積の概念に基づき、精度の良いゾーニング手法が提示されている。しかし、奥行き方向に一樣でない3次元配筋の部材に適用する場合には、完全3次元解析を行うか、あるいは2次元解析を行うに際して、付着領域に関して何らかの等価置換を行う必要がある。本研究は奥行き方向に不均一な配筋に対して、等価な付着伝達領域を2次元平面内に与える方法を検討したものである。

An²⁾らはRC構造物を図-1のように2領域(即ちRCとPLゾーン)に別けてそれぞれ、異なる引張応力開放率を与えている(図-2)。無筋領域では、ひび割れの要素内での局所化を考慮して、要素寸法と引張破壊エネルギーから開放率を与えている。RC領域では要素内に安定したひび割れが複数導入されることを前提として、要素寸法に独立のtension-stiffness特性を与えている。それぞれの表記は以下の式で代表させ、係数Cで両者を包含している。式の中で ϵ_t はコンクリート引張ひずみ、 ϵ_{tu} はコンクリート限界ひずみを表している。

$$\sigma_t = f_t * \left(\frac{\epsilon_{tu}}{\epsilon_t} \right)^C \quad (1)$$

RC領域は付着ひび割れが展開する領域であり、鉄筋の自由伸び変形を拘束するコンクリートと規定される。したがって、RC部材のひび割れ幅算定に用いられてきた有効面積の考え方と基本的に同じであり、AnはRCゾーンの鉄筋回りの断面積A_{RC}に対して、以下を提案している。

$$A_{RC} = A_{St} * \left(\frac{f_y}{f_t} \right) \quad (2)$$

2. ゾーニング

2.1 2次元解析の場合

*1 東京大学工学部土木工学科(正会員)

*2 東京大学大学院助教授 工学系研究科社会基盤工学専攻 工博(正会員)

A_{RC} : RCゾーンの大きさ
 f_t : コンクリートの引張強度
 A_{st} : 鉄筋断面積
 f_y : 鉄筋降伏強度

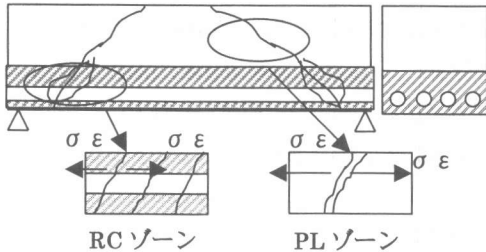


図-1 RCゾーンとPLゾーン

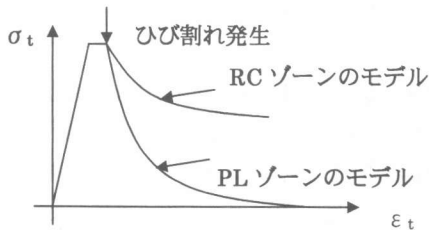


図-2 コンクリートの引張応力-ひずみ関係

2.2 3次元 FEM 解析へのゾーニング手法の導入

Hauke³⁾は図-3のような3次元空間で任意方向に進展するひび割れの引張軟化特性を、個々の鉄筋軸方向に於けるコンクリートの引張応力開放率を内挿して求める簡便法を提示している。この際には、コンクリートの引張破壊エネルギーに基づき、直交3方向の要素寸法に応じて軟化特性を決定している。

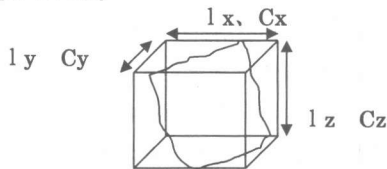


図-3 3方向の大きさとパラメーターC

この簡便法は多方向曲げせん断を受けるRC短柱と、ねじり曲げせん断を受けるRC梁等によって検証され、第一次近似として3次元解析において使用できることが示されている。また、側方筋を有するせん断破壊先行型の梁の実験からも、検証を行っている。一方、完全3次元非線形応答解析は現

時点でも時間を要し、数千ステップにわたる動的応答解析に適用するには、実用上の問題がある。したがって、3次元的に分布する鉄筋と、その周辺の付着領域を2次元面内に投影した形で模擬することが可能であれば、応用の幅は拡大する。そこで、奥行き方向の配筋の非均質性を等価に2次元解析に代表させる方法を探る目的で以下に示す実験を行い、検討した。

3. 実験概要

3.1 目的

比較的鉄筋量の少ないRC柱の場合、側方鉄筋がせん断耐力向上に一定の役割を果たすことが知られている。また、軸方向に配置された鉄筋は、トラス機構上は何れせん断に貢献しないが、せん断ひび割れを制御するとともに耐力と靱性に影響を及ぼす。これらを念頭において、本実験では引張鉄筋の他に断面中央に軸方向鉄筋を配置し、その付近を通過するせん断ひび割れの進展と、対応するせん断耐力の変化に着目した。この際、部材厚み方向には一定量の鉄筋を配置するが、配筋の詳細を変えて、3次元効果を抽出することを試みた。

3.1 載荷方法・供試体概要

図-4、5に示す寸法、配筋の4供試体を用い、曲げせん断載荷を行った。3点載荷による強制変位で制御した。材料の物性値は表-1,2の通り。

ϵ_{max} は圧縮強度時の圧縮ひずみである。

表-1 コンクリートの物性値

圧縮強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	ϵ_{max}	弾性係数 kN/mm ²
39.4	2.85	0.210	29.0

表-2 鉄筋の物性値

	降伏強度 N/mm ²	弾性係数 kN/mm ²
D10	374	191
D16	384	201

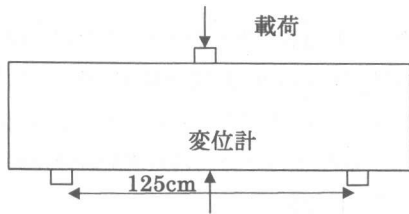


図-4 荷重方法

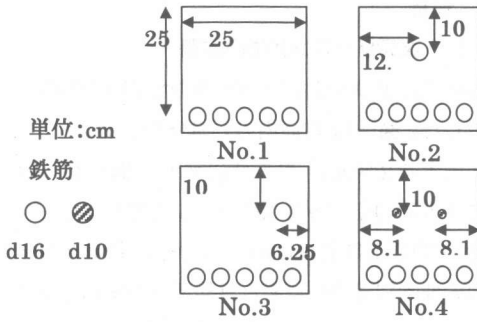


図-5 供試体断面と荷重方法

3.2 破壊状況

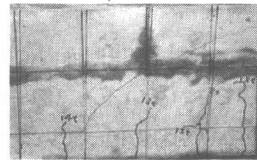
破壊した各供試体の、側面に入ったひび割れの状況を図-6以降に示す。破壊モードはすべてせん断破壊であり、主鉄筋の降伏は破壊に先行していない。断面中心部に一切、軸方向鉄筋を配置していない基準試験体(2次元配筋)は、最大耐力以後も強制変位をかけ続け、梁としての一体性を喪失する段階まで荷重を行った。

図-6から明らかな通り、せん断ひび割れは奥行き方向に一樣であることが分かる。格子モデルに

よる研究⁴⁾においても引張鉄筋付近は奥行き方向に一樣な2次元要素として計算出来ることが検証されていることも考慮すると、No.1試験体のせん断破壊挙動が十分に2次元問題として扱えることを伺わせる。



A 側面のひび割れ状況



B 側面のひび割れ状況

図-7 No.2試験体の破壊状況

No.2は荷重点を中心に片側せん断スパンに斜めひび割れが発生し(図-7A)、図-7Bのように一旦荷重が低下した後、上昇に転じ、反対側のスパンにひび割れが発生して耐力を迎えた。せん断ひび割れ幅は、断面中央にある鉄筋によって有効に拘束されている。しかし、斜めひび割れ近傍には一切、平行するひび割れは見えず、せん断ひび割れの分散は見られない。No.4試験体とは異なる破壊形態を見せている。

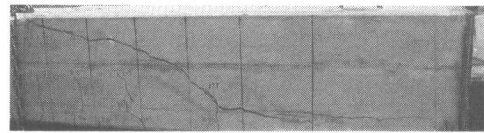


A 側面に入ったひび割れの様子

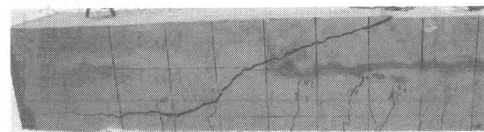


B 内部のひび割れの様子

図-6 No.1試験体の破壊状況



A 鉄筋が入っていない側の側面



B 鉄筋が入っている側の側面

図-8 No.3試験体の破壊状況

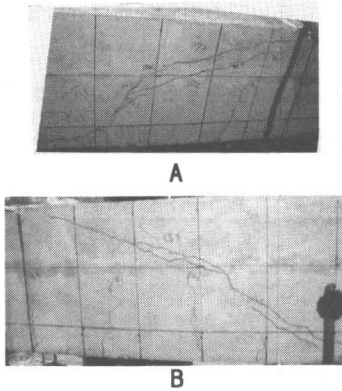


図-9 No.4 試験体の破壊状況

図-8に示す No.3 試験体は断面内に偏って軸方向鉄筋が配置してされている為 (図-8の写真 AB 参照)、生じたひび割れも偏っていることが分かる。

図-9 に示す No.4 試験体では、鉄筋が部材表面に近く配置されているため、せん断ひび割れは複数発生しているのが分かる。

3.3 耐力および荷重変位関係

No.1~4 試験体の荷重-変位(供試体中央下部変位)関係を図-10 に示す。No.1~3 は耐力およびそれに至る荷重変位関係に有為な差は見られない。一方、No.4 試験体の耐力は他と比較して 1 割、変形能に対して 4 割の向上がもたらされている。

No.2 と No.4 試験体は断面中央に有する鉄筋総面積は等しいが、付着効果と破壊に要するエネルギーには差があると考えるのが自然である。分散

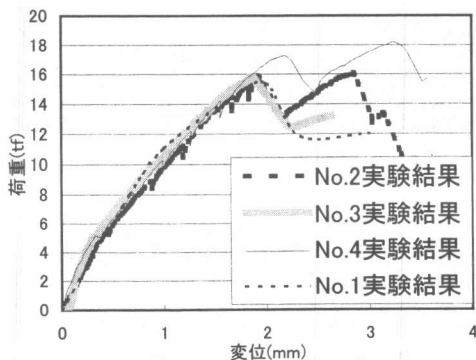


図-10 実験結果

配筋がもたらす付着効果がより広く部材に伝搬するとすれば、この効果を 2 次元解析で考慮しなければならない。いずれにおいても、従来の 2 次元解析を準用すると、奥行き方向の鉄筋配置の差異を考慮することはできない。

4. 解析

4.1 2次元ゾーニング法の拡張

解析には 2 次元動的非線形解析法(WCOMD)を使用した。図-11 に面内の要素分割を示した。Anらによる 2 次元ゾーニング法に従えば、図-12 のように 1 要素の全厚みを RC ゾーンとすることができない程度に、鉄筋量は小さい。そこで、該当する面内の要素には、RC 要素と無筋要素を重ねて 2 次元解析を行った。各々の要素幅は従来のゾーニング法に従って決定された。2 次元解析に準じたこの解析では、奥行き方向にせん断ひび割れの方向は変化しないことを暗黙に仮定している。

引張鉄筋のみの No.1 試験体は、純然たる 2 次元問題であり、既往のゾーニング手法の適用範囲にある¹⁾⁾。その領域はおよそかぶりの 2 倍になる (図-13)。RC 領域では引張応力開放率を与える係数 C(式-1)を一律 0.4 とする。PL ゾーンでは、要素内に単一のひび割れのみが存在することを前提として、コンクリートの引張破壊エネルギーに関して CEB コードに従い求められるものと式-1 から求められるものが等価となるように応力開放率を決定した。本研究では分散ひび割れモデルを採用しているため、ひび割れの大きさは要素寸法となる。

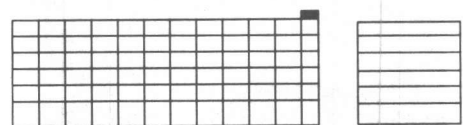


図-11 2次元の要素



図-12 擬似 3次元の要素

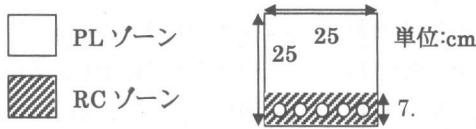


図-13 No.1のゾーニング

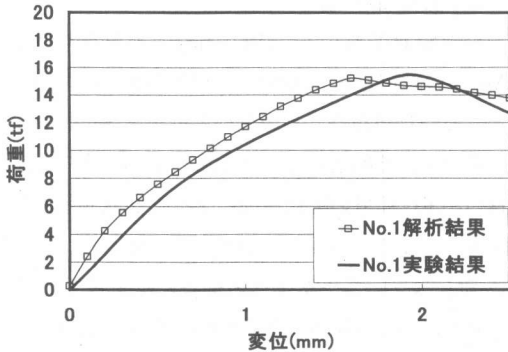


図-14 No.1 実験と解析

図-14 に解析結果と実験結果を併記する。既往の研究で示された通り、せん断耐力およびそれに至る荷重変位関係は、良好に実験挙動を模擬していると言える。

No.2 と No.4 試験体に対しても、同様のゾーニング法で要素厚さ方向の RC 領域と PL 領域を設定して解析を行った。引張鉄筋近傍に関しては、No.1 試験体で採用した領域と同一である。図-15 に実験結果と解析結果との比較を示す。解析で使用した付着の影響が及ぶ領域の設定は、図-16 に示す。鉄筋断面総量はほぼ同じでも、鉄筋径と配置の違いによって、断面内に設定される RC 領域の面積は異なる。この違いが、3次元効果を2次元に疑似して解析した結果に反映されることとなる。

No.2 試験体においては、およそ従来の方法と大差ない結果を示しているものの、耐力については1割程度、過大評価している。実験では No.1 と No.2 試験体で差が見られなかった。No.4 試験体に対しては、解析は軸方向鉄筋の効果をほぼ良好に表している。No.4 試験体では、鉄筋分散性の観点からは、より2次元に近い状況にあることは想像される。また、分散配置されていることから、部材表面部と内部での斜めひび割れ方向も、No.2 試験体と比較して均等にあるものと思われる。

一方、No.2 試験体では、斜めひび割れは部材表面

で大きく局所化されており、破壊に要するエネルギーは解析で想定したものよりも低いことが考えられる。具体的には、RC 領域が解析で設定した領域面積よりも少ないことが想定される。これらは完全3次元解析を実施することで解決可能であるが、ここでは等価置換の方法について検討を進めたい。

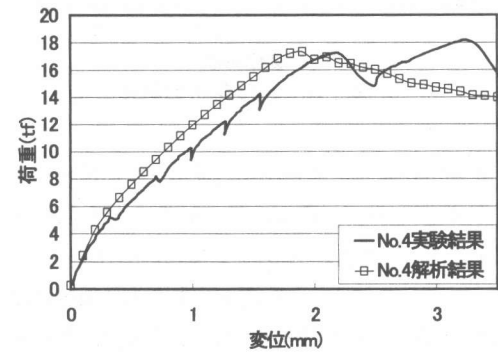
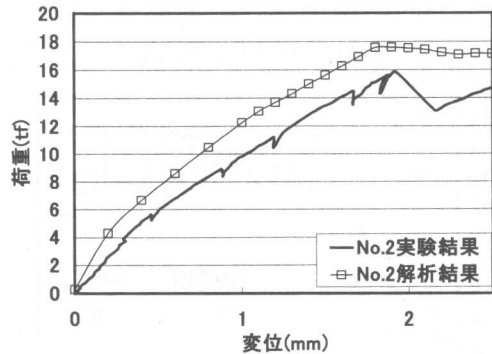


図-15 No.2 と No.4 の実験と解析の比較

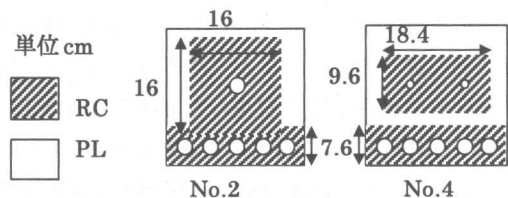


図-16 An が提案したゾーニング手法

4.2 付着領域寸法に関する感度解析

No.4 供試体では、側面にまで鉄筋の付着効果によるひび割れの分散が見られるが、鉄筋総断面積が同じ No.2 には見られない。No.2 試験体の RC ゾーンは想定よりも小さいものと考えられる。そ

こで No.2 の解析において RC ゾーンゼロから 5、7、9cm 四方の正方形へと拡大して感度解析を実施した。図-17 に領域分割、図-18 に解析の結果を示す。

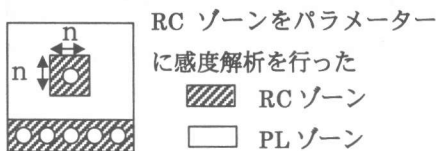


図-17 ゾーニング手法

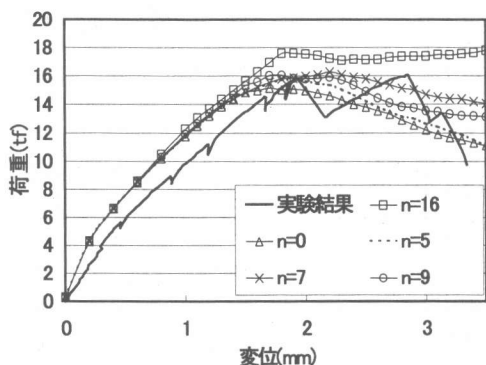


図-18 感度解析の結果

2次元解析による検証から提示された従来の方法によると、16cm 四方の正方形では、軟化領域まで考慮するとすれば、過大であることが分かる。この点に関しては A_n にも、提示された RC 領域の設定法は、鉄筋全降伏を前提とした、付着が及び得る最大領域(上限)、と規定している。一方、付着領域を一切無視した解析では過少となる。現実には、RC 領域の上限値の約半分に相当する 7~9cm 四方が等価な値であった。No.2 試験体のように、局所鉄筋配置の場合には、部材奥行き方向にも斜めせん断ひび割れの方向は変わることが示されており、これらの効果も耐力、軟化域での挙動に影響するものとも考えられる。

5. 結論

鉄筋比が小さく、かつ断面中央に位置する軸方向鉄筋に対するゾーニング手法の妥当性を検証した。実験においては、総断面積が等しい鉄筋でも配筋の仕方によって付着効果の影響に差が出るこ

うことが確認された。断面積が大きい 1 本の鉄筋を入れるより、半分の断面積の鉄筋を分散させて配筋した方が、より耐力と靱性向上が期待できることが示された。また、解析によっても、追跡可能である事象であることが確認された。

局所配置に対しては、RC 領域の上限を与える A_n らの設定方法では軟化域まで考慮すれば、過大となる恐れがあることが認められた。強く 3次元効果が現れる問題には 3次元解析で対処するのが良いが、RC 領域の等価置換によって 2次元解析で代表させることも可能であることを示した。しかし、新たなゾーニング手法の提案には至らず現在、実験および 2~3次元解析両面から検討を進めている。

参考文献

- 1) Gergely, P., and Lutz, L.A.: Maximum Crack Width in Reinforced Concrete Flexural Members, Causes, Mechanisms, and Control of Cracking, SP-20, American Concrete Institute, pp.87-117, 1968
- 2) An, X., Maekawa, K., Okamura, H. et al.: Numerical simulation of size effect in shear strength of RC beams, J. Materials Conc. Struct., Pavement, JSCE, Vol35, No.564, pp.297-316, May.1997
- 3) Hauke, B. and Maekawa, K.: Three-Dimensional Modeling of reinforced Concrete with Multi-Directional Cracking J. Materials Conc. Struct., Pavement, JSCE, Vol45, No.634, pp.349-368, Nov.1997
- 4) 伊藤 睦、二羽 淳一郎、田邊 忠顕：格子モデルによる RC 柱の繰返し強度-変形解析、コンクリート工学年次論文集、Vol.21, No.3, pp439-444, 1999