

付着遷移領域を考慮に入れた鉄筋引抜試験の有限要素解析

香川大学 正会員 ○吉田 秀典, 宇田 圭一, 和田 光真

1. 緒言

鉄筋コンクリートは比較的早期にひび割れが発生するが、一般に、ひび割れ発生後は、鉄筋がその引張力を代替することでひび割れ開口幅の増大を制御し、急激な剛性低下を防ぐ。したがって、ひび割れ幅やひび割れ面の等価剛性を評価／勘案する解析に際しては、コンクリートと鉄筋との相互作用／応力再配分を勘案することが重要であり、両材料の付着機構がキーポイントとなる。実験的検証として壹岐ら¹⁾は、鉄筋の引抜試験を通して付着応力の分布を推定し、同時に島・周らの提案式²⁾に基づいて付着応力とすべりの関係をまとめ、提案式の修正などを提案しているが、付着破壊のメカニズムに関しては、必ずしも明確になっている訳ではない。そこで本研究では、上述した壹岐らの鉄筋引抜試験の解析を行い、実験と解析とを比較することにより、コンクリートにおける鉄筋の付着破壊機構の解明を目的とする。

2. 解析モデル

コンクリートおよび鉄筋に関する構成モデルは、図1および図2に示すような、「日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説³⁾」に準拠した構成則⁴⁾を採用した。解析では、これらを8節点立体ソリッド要素として組み込んでいる。圧縮側では von Mises の降伏条件を、また、引張側では、クラック発生などに伴う tension-softening の挙動を再現できるようにモデル化している。特に引張側では、各要素において最大引張応力を求め、その応力が引張強度に達した場合、最大主応力方向に対して垂直方向な方向にクラックが入るものとしている。この場合、クラックの入った方向に対して直角となる方向にのみ軟化が生じ、他の2方向については軟化はさせない。これより、ひび割れ発生・進展に伴うコンクリートの異方性を表現している。軟化勾配に関しては、文献⁴⁾に示されている値(20,000 N/mm²)を採用した。また、本研究では、鉄筋の周辺ではコンクリートの充填が必ずしも良好とは限らないことから、鉄筋周辺のコンクリートの強度を、普通コンクリートよりも低減させて用いた。本研究では、この領域を付着遷移領域と呼ぶ。解析では、文献¹⁾に示されている材料特性を参考に、コンクリートに関しては表1、鉄筋に関しては表2のように設定した。なお、コンクリートの引張強度は、引張強度算定式⁵⁾ $f_{tk} = 0.23 f'_c{}^{2/3}$ より算出している。

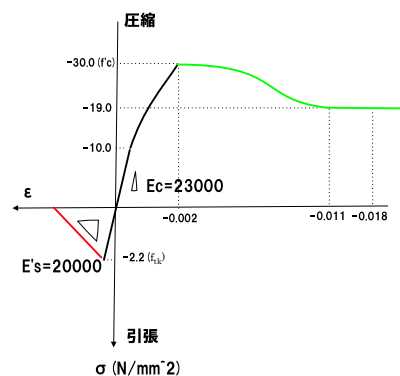


図1 コンクリートの構成モデル

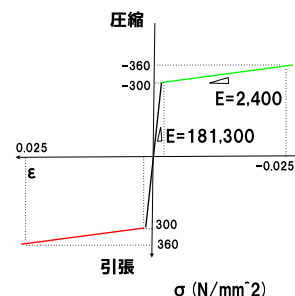


図2 鉄筋の構成モデル

3. 解析概要

文献¹⁾では、載荷方法、コンクリートの打設方向、拘束筋、および断面形状を変化させ、これらを組み合わせることで数種類の鉄筋の引抜試験を行っている。このうち、本研究では、載荷方法は片側引抜、打設方向は水平、拘束筋は無し、そして断面形状は450mm×450mm(幅593mm)のケースについて検討を加えることとする。

本研究では、前述の通り、鉄筋周りに強度の低い付着遷移領域を設定するが、その領域幅を0mm～30mmの範囲で解析を行った。実験では、コンクリート供試体において反力を取りながら、鉄筋に一軸引張力を載荷(変位制御)していることから、本解析でも変位制御による載荷で解析を行った。

4. 解析結果

まず、載荷点とは逆側端部から10Dと15Dの地点における鉄筋のひずみと荷重の関係について、実験結果を図3に、遷移領域無の解析結果を図4に、遷移領域6mmの解析結果を図5に示す。図より、遷移領域無の場合、実験と解析には乖離があり、解析が現象を再現できていない。一方、付着遷移領域6mmの場合、解析はほぼ実現象を表現できている。なお、本稿では紙面の関係上、最も実験結果に近いものとなった遷移領域を6mmとした解析の結果のみを掲載する。

表1 コンクリートの材料特性

	普通コンクリート	付着遷移領域
弾性係数	23,000 N/mm ²	10,000 N/mm ²
初期降伏応力度	10.0 N/mm ²	4.00 N/mm ²
ピーク応力度	30.0 N/mm ²	12.0 N/mm ²
引張強度	2.2 N/mm ²	1.2 N/mm ²
引張軟化係数	20,000 N/mm ²	
降伏条件	Von-Mises 型, 等方硬化 (圧縮側)	

表2 鉄筋の材料特性

種類	D19
弾性係数	181,300 N/mm ²
降伏応力度	300 N/mm ²
降伏条件	Von-Mises 型, 等方硬化

キーワード：付着ひびわれ、有限要素解析、遷移領域、鉄筋ひずみー載荷荷重関係、付着応力ーすべり関係

〒761-0396 香川県高松市林町2217-20 香川大学 工学部 TEL&FAX:087-864-2157

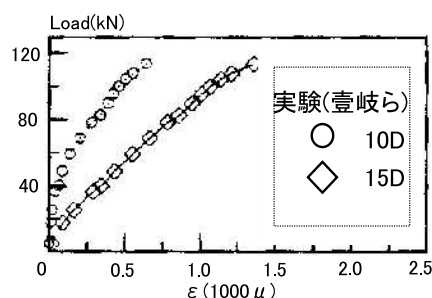


図 3 鉄筋ひずみ-載荷荷重関係 (実験)

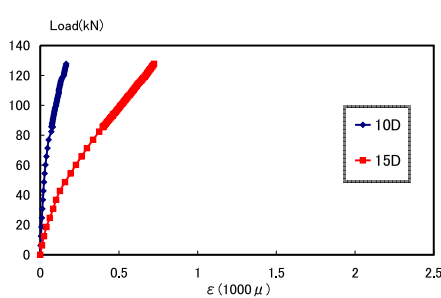


図 4 鉄筋ひずみ-載荷荷重関係 (遷移領域無)

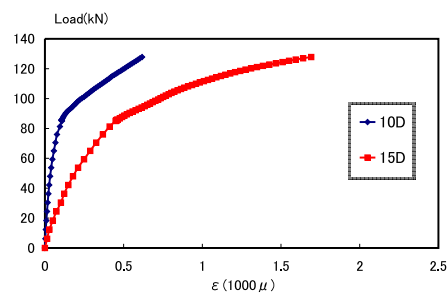


図 5 鉄筋ひずみ-載荷荷重関係 (遷移領域 6mm)

文献¹⁾においては、既往の研究²⁾を基に鉄筋のひずみ分布を求め、それより鉄筋の応力を算定し、鉄筋の付着応力の分布を求めている。本研究でも、同様の手法で載荷点とは逆側端部から 10D と 15D の地点における付着応力 τ およびすべり量 S を算出し、それらの関係について、実験結果を図 6 に、遷移領域無の解析結果を図 7 に、遷移領域 6mm の解析結果を図 8 に示す。なお、付着応力およびすべり量の算出方法については文献¹⁾²⁾を参照されたい。この結果についても、付着遷移領域 6mm の場合、解析はほぼ実現象を表現できている。一般的に、鉄筋周辺では、コンクリートの充填が密実になりにくく、また、ブリージングによって水平鉄筋下面には隙間ができやすいこともあり、鉄筋周辺では強度が劣り、かつ弾性係数が低い可能性があることから、本研究で設定した付着遷移領域の設定は妥当であると解釈する。

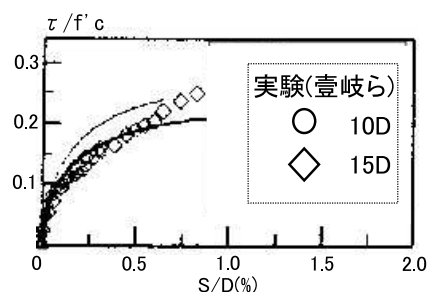


図 6 付着応力-すべり関係 (実験)

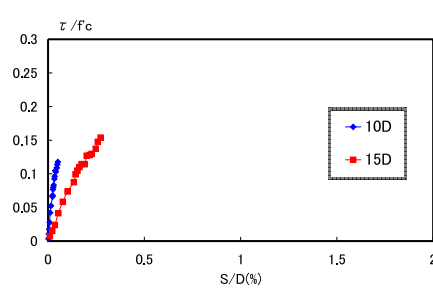


図 7 付着応力-すべり関係 (遷移領域無)

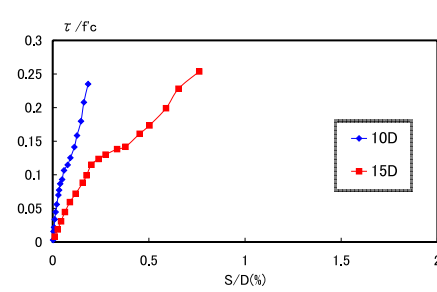


図 8 付着応力-すべり関係 (遷移領域 6mm)

最後に、鉄筋周辺におけるひび割れの発生状況について考察するために、ひび割れひずみの分布について、遷移領域無を図 9 に、そして遷移領域 6mm を図 10 に示す。どちらのケースでもひび割れは分散的に発生しているが、遷移領域 6mm の場合、遷移領域から破壊し、その間に応力が再配分されるため、その後の破壊はやや局所的な破壊モードになるという特徴を有し、遷移領域無とは異なる結果を呈している。

5. 結言

本研究では、鉄筋コンクリートにおける付着挙動は、鉄筋周辺に生じる無数のひび割れに大きく影響を受けるという観点に立ち、鉄筋コンクリートにおける付着現象のメカニズム解明を試みた。一連の解析より、鉄筋周辺に付着遷移領域を設定することで実験を精度良く再現できることが判明した。これより、こうした遷移領域の存在は、付着挙動を支配する因子の一つであると考えられる。今後、遷移領域の特性や大きさについて検討を行う必要があるものと思われる。

参考文献

- 1) 壹岐直之, 清宮理, 山田昌郎: 付着応力-すべり関係に影響を及ぼす要因の実験的研究, 土木学会論文集, No.550/V-33, pp.73-83, 1996.
- 2) 島弘, 周礼良, 岡村甫: マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係, 土木学会論文集, No.378/V-6, pp.165-174, 1987.
- 3) (社)日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1999.
- 4) 吉田秀典, 竹下智正, 堺孝司, 森西隆寛, M. Boufiza: 低張力材料の構成モデルを用いたボイドスラブの非線形解析, 応用力学論文集, vol.4, pp.325-332, 2001.
- 5) 吉川弘道: 鉄筋コンクリートの設計, 丸善株式会社, 1997.

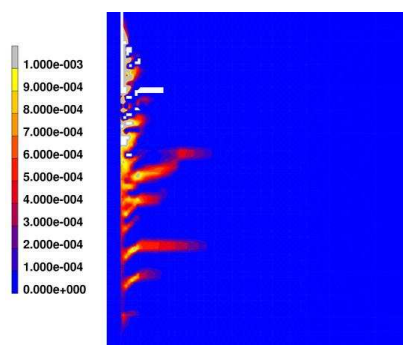


図 9 ひび割れひずみ (遷移領域無)

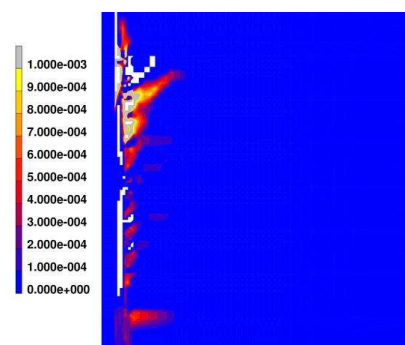


図 10 ひび割れひずみ (遷移領域 6mm)