

論 文

[2013] 鉄筋の発錆による付着劣化機構

正会員○米田直也（北海道開発コンサルタント）

正会員 丸山久一（長岡技術科学大学）

清水敬二（長岡技術科学大学）

柳 益夫（長岡技術科学大学大学院）

1. はじめに

塩害によるRC構造物の損傷が顕在化して以来、発錆のメカニズム的なことから補修工法に至るまで様々な研究がなされてきている。その中で、耐荷性状に関しては、内部鉄筋の腐食量と表面ひびわれ幅の関係[1],[2]、表面ひびわれ幅と曲げ耐力低下の関係[3]を明らかにしてきた。さらに、曲げ耐力低下の原因を調べる目的で、鉄筋腐食による鉄筋とコンクリートの付着機構を実験的に検討した[4]。しかし、付着抵抗機構において割裂作用が支配的な条件下においては、まだ未解決な部分が残されている。

そこで、本研究においては、鉄筋腐食によってひび割れが発生した後にコンクリートの割裂で付着耐力を失う場合について実験的及び解析的検討を行なった。また、疲労荷重に対する抵抗性を評価するために疲労引き抜き試験も行なった。

2. 実験方法

2. 1 供試体形状及び使用材料

供試体の形状は図-1に示す通りである。かぶりは5cmとし内部鉄筋(SD30、D13)は、付着長を中央5cm、その両端に5cmずつの非付着区間を設けた。非付着区間は、グリースを塗布したゴムチューブを用い、鉄筋とコンクリートとの付着を断った。付着区間においては、節の数と配置を十分に配慮し、節数は5個に統一した。

コンクリートの示方配合を表-1に示す。骨材は、細骨材として川砂(比重2.55)を、粗骨材として川砂利(比重2.60、最大寸法15mm)を使用した。またコンクリート中に鉄筋腐食作用の促進のため、練り混ぜ水として海水相当(NaCl 1.3%水溶液)の食塩水を用い、鉄筋の腐食を促進させる方法としては電食試験を用いた。実験パラメーターとしては、鉄筋の腐食によってかぶり面に生ずる鉄筋に沿う初期縦ひび割れ幅とした。

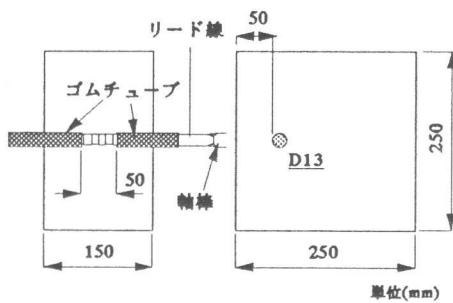


図-1 供試体形状

表-1 示方配合

水セメント比W/C (%)	細骨材率s/a (%)	単位量 (Kg/m ³)					NaCl
		水W	セメントC	細骨材S	粗骨材G	混和剤	
63	43	165	260	793	1053	0.65	5.148

2. 2 試験方法

供試体の諸元を表-2に示す。試験装置は、図-2に示すように、反力面での摩擦による拘束を減するために、反力面と供試体との間に、両面にグリースを塗布したテフロンを挿入した。計測は、引き抜き荷重に対する鉄筋の自由端の変位とかぶり面での縦ひびわれ幅の増分量について行なった。なお、測定には、非接触で精度の良いレーザー変位計を用いた。データの読み込みは、自由端の変位がおおむね0.025mmに一度の割合で行い、荷重を止めることなく連続的に行なった。

2. 3 試験結果と考察

1) 破壊形状

今回の供試体における破壊モードはすべて付着割裂破壊であった。ただ、鉄筋とコンクリートとの付着状況は初期縦ひびわれ幅の大小で異なり、初期縦ひびわれ幅が小さい場合においては、節前面のコンクリートが押し潰された跡が若干見られた。一方、初期縦ひびわれ幅が大きい場合には、節前面のコンクリートが押し潰された跡は全く見られず、鉄筋の節がコンクリートを押し開いて滑っていた。

2) 初期縦ひびわれ幅の影響

静的引き抜き試験の結果を表-2に、付着応力-自由端変位曲線を図-3に、付着応力-自由端変位曲線-初期縦ひびわれ幅変動量曲線の代表的な例を図-4に示す。

これらの図より、前年度の研究でも指摘されていたように〔4〕、最大耐力以降にはじめて初期縦ひびわれ幅が増加している。このことは、鉄筋の引き抜き抵抗がコンクリートの割裂耐力に関係があることを示している。そこで、最大耐力と初期縦ひびわれ幅の関係を示すと図-5のようになる。この図より、初期縦ひびわれ幅が0から0.2mmの範囲で最大付着耐力が急激に低下している。

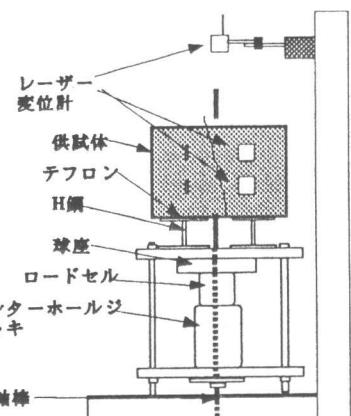


図-2 試験装置

表-2 試験結果

供試体	初期縦ひびわれ幅 W _{c1} (mm)	コンクリート強度 (kgf/cm ²)	最大付着応力 (MPa)
S1-1	0	252	21.029
S1-2	0	252	22.635
S2	0.0*	318	19.257
S3-1	0.05	318	16.688
S3-2	0.05	318	13.105
S4-1	0.3	276	8.174
S4-2	0.3	347	7.107
S4-3	0.3	370	7.333
S4-4	0.3	370	6.280
S5-1	0.5	351	3.502
S5-2	0.5	351	3.716
S5-3	0.5	347	3.175
S6-1	0.6	288	4.815
S6-2	0.65	288	1.536
S7-1	0.7	322	1.862
S7-2	0.7	322	3.864
S7-3	0.8	322	2.188
S8	1	310	1.430

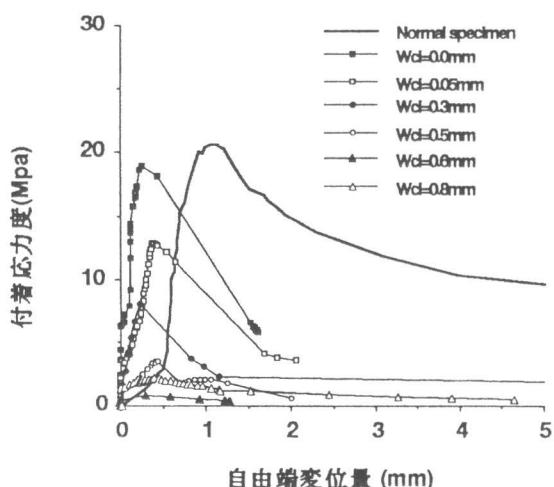


図-3 付着応力～自由端変位量曲線

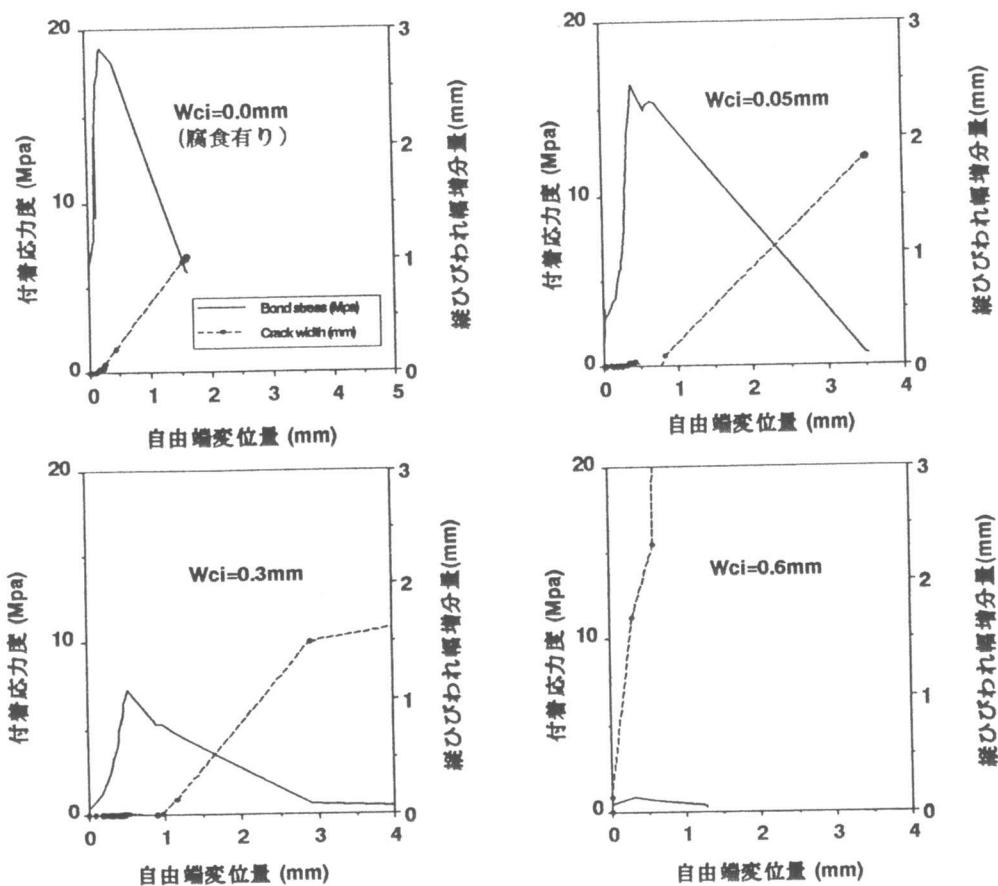


図-4 付着応力～初期縦ひびわれ幅増分量

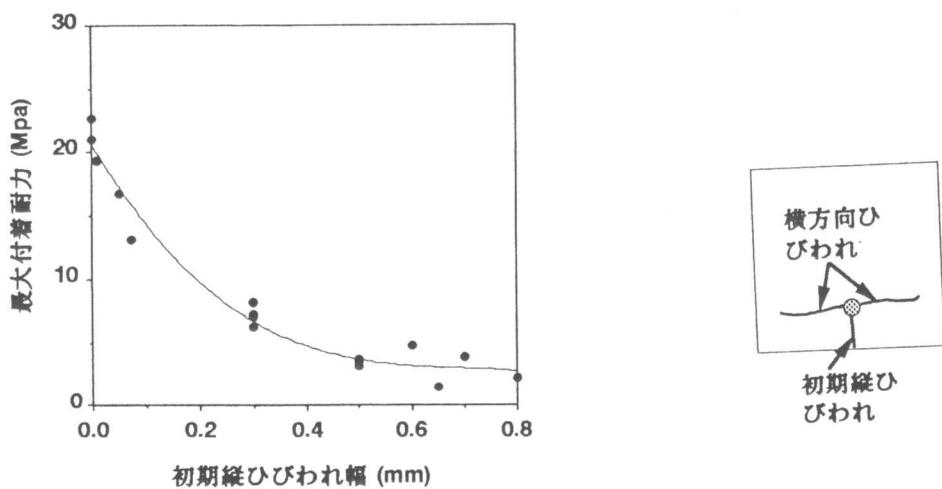


図-5 最大付着応力～初期縦ひびわれ幅曲線

図-6 腐食によるひび割れの発生例

3) 腐食膨張効果による影響

一般に、通常の引き抜き試験においては低い荷重レベルから自由端に滑りを生じるが、本実



験では、縦ひびわれが発生しているにもかかわらず、腐食膨張効果による摩擦抵抗力の増加で極く初期の荷重時における滑りは生じていない（図-3）。しかし、この腐食膨張効果は、荷重の増加とともに失われ、鉄筋の自由端の滑りによる変位の増加が認められる。

4) 横方向ひびわれによる影響

鉄筋の腐食膨張によって、かぶり方向に発生する初期の縦ひびわれとともに、横方向にもひびわれが発生する（図-6）。この横方向のひびわれが、コンクリートの割裂耐力に大きく影響する。図-7は、かぶり面での初期縦ひびわれ幅がほぼ同じで、横方向のひびわれ長さが違う2つの供試体の比較である。横方向のひびわれ先端が供試体端面にあるものは、そうでないものと比較して最大耐力が半分に落ちている。ただし、両者とも初期縦ひびわれ幅が0.71mmと大きく、図-5でも認められるように全体としての付着耐力は小さい。

5) 最大耐力時滑り量

付着応力-滑り曲線において、初期の縦ひびわれ幅が小さいものほど、最大耐力時の滑り量が大きくなっている。これは破壊形状でも認められるように、初期縦ひびわれ幅が小さいものほど鉄筋の節前面のコンクリートが粉砕され、滑り量が大きくなる。一方、初期縦ひびわれ幅が大きいものはコンクリートの拘束が小さく、最大耐力に早く到達するので、最大耐力時の滑り量は小さくなる。

3.有限要素法によるモデル化

今回のように、付着抵抗において割裂作用が支配的な場合、その耐力はコンクリートの割裂耐力に大きく影響される。特に実験より、コンクリートの割裂耐力は、かぶり面のひび割れが開き始める時に失われ、同時に破壊が急激に生ずる。従って、付着耐力は、ある腐食量で生じたかぶり面でのひび割れの開き始める荷重（あるいは横方向のひび割れが進展する荷重）であると定義される。そこで、有限要素法を用いたモデル化により、この性状を把握することを試みた。

3. 1 有限要素モデル

解析は、鉄筋軸に対して軸対称とし、6及び8節点アイソパラメトリック要素を用いて分割した。ひびわれは、実験よりあらかじめ進展経路が分かっていることから離散ひびわれモデルとし、ひびわれ先端には、クラックリンク要素を挿入した。コンクリートの材料定数としては、圧縮強度 300 kgf/cm^2 、引張強度 30 kgf/cm^2 、コンクリートの弾性係数 $E_c = 2.67 * 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比 0.2 を

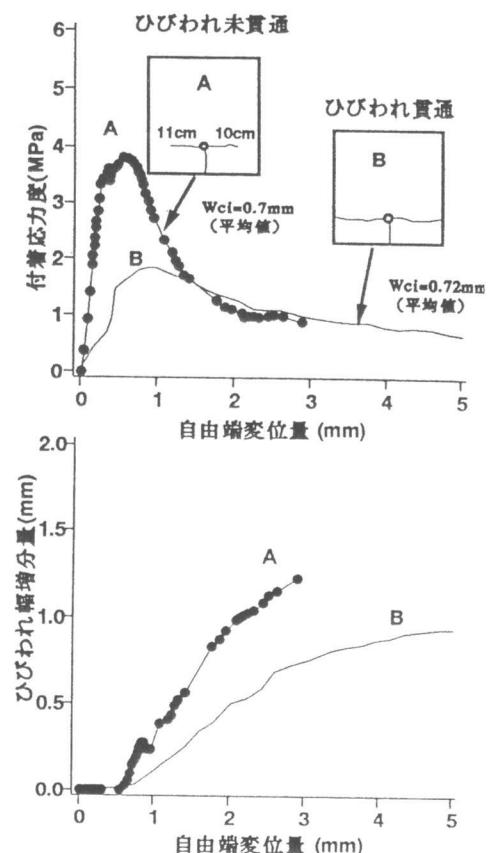


図-7 初期横方向ひび割れによる影響

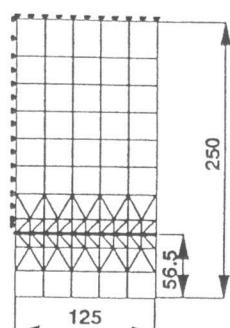


図-8 解析モデル

用いた。

想定したひびわれパターンは、実験より鉄筋軸から横方向に直線にのびたものである。荷重は、コンクリートに生ずる割裂応力を想定し、集中荷重を鉄筋位置の上下方向に載荷した。

ひびわれ先端の評価については、クラックリンク要素において、ひびわれと直交方向の主応力が引張強度に達したときがそのひびわれ長さにおける最大耐力（最大付着耐力）と考えた。

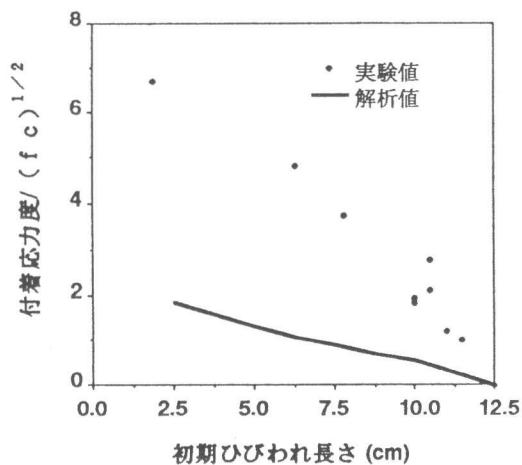


図-9 最大割裂応力～初期横方向ひびわれ長さ

3. 2 解析結果

図-9に最大割裂応力-初期横方向ひびわれ長さの関係を示す。

この図より、初期の横方向のひびわれ長さが長いものほど、最大割裂荷重は低下していく事がわかる。一方、静的引き抜き試験によって得られた実験値との比較では、解析値は実験値よりもかなり小さくなってしまった。これは、弾性解析ではひび割れ先端の応力が引張強度に達するとコンクリートの割裂抵抗力は失われるとしているため、実際のひび割れ先端においては、破壊進行領域と呼ばれる非線形領域が存在し、その破壊進行領域において応力伝達が生じており、ひび割れ先端の破壊進行領域の応力伝達機構の評価に、破壊力学的なアプローチを導入することが必要となる。

4. 疲労引き抜き試験

静的引き抜き耐力は、初期縦ひびわれ幅が0から0.2mmの範囲で急激に低下し、それよりも大きな初期縦ひびわれ幅では、ほとんど付着抵抗力を示さなくなった。このことを、さらに動的荷重の場合にも検討する目的で、図-10に示す様な載荷装置によって疲労載荷試験を行い、疲労に対する安全性の照査を行なった。

4. 1 試験方法

電食装置により供試体に所定の初期縦ひびわれ幅(0, 1, 0, 2, 0, 4mm)を生じさせた後、静的引き抜き試験で静的耐力を求めた。次に、荷重振幅として上限荷重を静的耐力の60, 40, 20%とし、最小荷重を静的耐力の10%とした部分片振り試験を実施した。また、荷重波形は正弦波とし、載荷速度は5Hzとした。

測定項目は、繰り返し載荷中の鉄筋の自由端の変位、初期縦ひびわれ幅の変動量、供試体側面のひずみである。

4. 2 試験結果及び考察

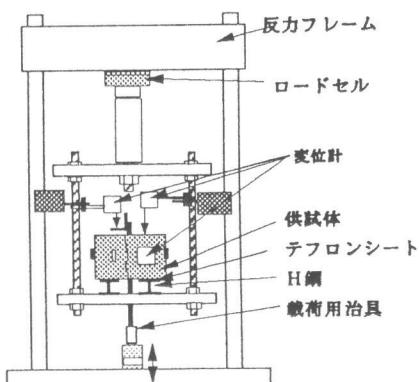


図-10 疲労試験装置

荷重振幅－破壊時の繰り返し回数曲線を図-11に示す。

これより、荷重振幅が80%では、いかなる初期縦ひびわれ幅の供試体においても少ない繰り返し回数で破壊にいたっている。また、この場合の破壊モードは、静的試験と同様に割裂であった。一方、荷重振幅が60%以下では、初期縦ひびわれ幅の大小によって破壊モードが影響され、初期縦ひびわれ幅が0.1mmの供試体では、付着劣化ではなく付着区間端での鉄筋破断であった（図-11中のA, B）。これは、鉄筋の発錆によって生成された腐食生成物による摩擦抵抗力と腐食膨張力の増加に起因していると思われる。それに比較して初期縦ひびわれ幅が0.2mm以上でコンクリートの割裂により破壊した。

次に、疲労耐力の低下度合をはかる一つの指標として、コンクリートの圧縮疲労における土木学会のコンクリート標準示方書の式の値を太線で示す。これより、初期縦ひびわれ幅が大きくなるにつれ疲労付着耐力は著しく低下する。

5.まとめ

- 鉄筋が発錆したRC部材の付着抵抗機構において、コンクリートの割裂に着目した場合、
- 1) 初期の縦ひびわれ幅に伴って発生した初期の横方向のひびわれは、その長さに応じて、コンクリートの拘束度合を低減させ、破壊は、その先端が進展するときに急激に生ずる。
 - 2) 動的な荷重においても、静的な耐荷性状と同様に、初期縦ひびわれ幅が大きくなるにつれ、耐力は低下する。

6.参考文献

- [1] 田森清美、丸山久一、小田川昌志、橋本親典：鉄筋の発錆によるコンクリートのひび割れ性状に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、第10巻 第2号、1988、pp.505～510
- [2] 高岡祐二、丸山久一、清水敬二、中田康広：鉄筋の発錆によるコンクリートのひび割れ特性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、第11巻 第1号、1989、pp.591～596
- [3] 中田康広、丸山久一、橋本親典、清水敬二：鉄筋腐食によるひび割れが梁供試体の耐荷性状に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集、第12巻 第1号、1990、pp.551～556
- [4] 佐々木淳、丸山久一、清水敬二、米田直也：鉄筋の発錆が付着性状に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集、第13巻 第2号、pp.139～144

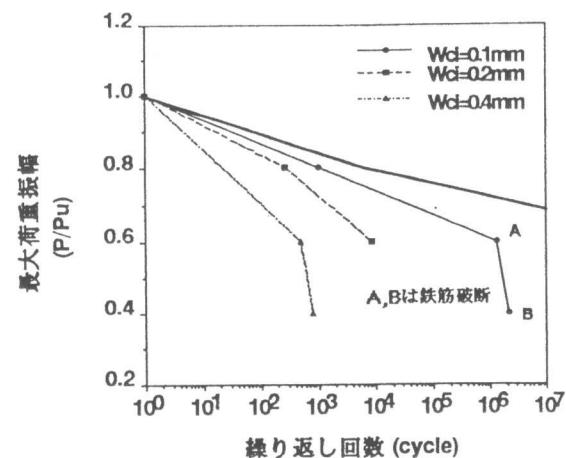


図-11 最大荷重レベル～繰り返し回数