

論 文

[1096] 鉄筋が腐食した一方方向RCスラブの曲げ耐力

正会員○島 弘（徳島大学工学部）

正会員 堤 知明（東京電力技術研究所）

正会員 入江正明（日建設計土木設計事務所）

鈴木正敏（日建設計土木設計事務所）

1. まえがき

本研究は、鉄筋腐食と構造物としての耐荷力の評価方法の提案を行うための基礎実験である。すなわち、鉄筋腐食の程度と構造物の耐荷力との関係を把握することを目的とする。

鉄筋が腐食した場合には、健全な構造物に対して、①鉄筋リブの欠損および鉄筋に沿ったひびわれの発生による付着強度の低下、②鉄筋断面の減少による鉄筋引張強度の低下、が考えられる。鉄筋の引張強度の低下が構造物の耐荷力を小さくすることは明かである。しかし、付着強度の低下の併発によって健全な構造物とは異なった破壊形式になる可能性がある。そこで、本研究では、鉄筋の腐食によって、構造物の耐荷力がどのように低下するのかを実験的に調査・検討する。そのために、それぞれの試験体を作製し、電食により鉄筋を腐食させた後に破壊試験を行った。

2. 既往の研究と問題点

「腐食した鉄筋の付着強度に関する研究」および「鉄筋が腐食したRC構造物の耐荷力に関する研究」は、今までにいくらか報告されている¹⁾。しかし、これらの研究の問題点としては、主として、①腐食の程度が小さい（ほとんどが縦ひびわれが発生するまで）、②構造試験体として、はりに1本あるいは2本の鉄筋を使用したものが多く、現実構造物とは拘束条件が異なり、現実のものに適用し難い、の2点がある。本研究では、実現象をできるだけ忠実に模擬できるように、①腐食の程度を現実のものと同じになるように大きくする、②構造試験体の拘束条件が現実のものに近くなるように、試験を「スラブ」で行う、ことを考慮した。

3. 実験

3.1 実験条件

実験要因は腐食程度（腐食グレード²⁾）であり、腐食程度の異なる4体の供試体を用いて試験を行った。供試体は、鉄筋腐食させない供試体No.1および腐食させる供試体No.2, No.3, No.4を用いた。各供試体の腐食グレードを表-1に示す。

表-1 実験条件

供試体	No.1	No.2	No.3	No.4
腐食グレード	1	3	4	5

3.2 供試体

(1) 形状および寸法

供試体は単鉄筋スラブである。スラブ厚さは15cmであり、使用鉄筋をD13とし、かぶりを1.3cmとした。供試体No.1～3では、一方間に鉄筋を配し、供試体No.4では、直角2方向配筋とした。供試体の寸法および断面を図-1に示す。

曲げ耐力とせん断耐力の比が1.2となるように、鉄筋比を0.85%，せん断スパン比(a/d)

を4.6とした。定着長は、コンクリート標準示方書による基本定着長（鉄筋の降伏強度を定着できる長さ）の30cmおよび支承から有効高さだけ離れた位置における鉄筋の応力から計算した値の14cmに対して、その間の20cmとした。

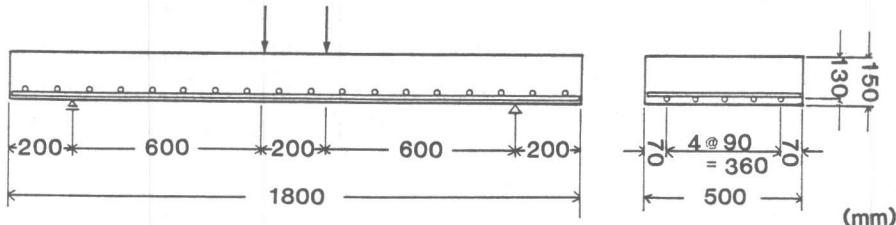


図-1 供試体の寸法および断面（横方向鉄筋は供試体No.4にのみ配置）

(2) 使用材料

鉄筋は、D13で、強度は降伏強度および引張強さがそれぞれ $f_y = 3560 \text{ kgf/cm}^2$ および $f_u = 5177 \text{ kgf/cm}^2$ である。鉄筋の黒皮は、クエン酸2アンモニウムを用いて除去して用いた。

コンクリートは、骨材の最大寸法25mmの硬質砂岩砕石を用いて、水セメント比57%とし、目標スランプ値が8cmのものとした。供試体No.2～4における鉄筋の腐食を促進させるために、コンクリートの中に、土木学会コンクリート標準示方書³⁾の標準の許容値の約4倍(C1⁻: 2.6kg/m³)の塩分を混入させた。各供試体のコンクリート圧縮強度を表-2に示す。

3.3 実験方法

(1) 供試体の作製：スペーサによる腐食に対する弱点をなくすために⁴⁾、スペーサを用いないで鉄筋を固定した。鉄筋の向きは、縦ふしがない面をかぶり方向にした。供試体の養生は、供試体No.2～4は、約4週間室内で湿布養生を行った後、電食を開始した。供試体No.3は、曲げ試験日まで2週間、室内で湿布養生を行った。

(2) 電食：供試体を人工食塩水（濃度：NaCl 3.3重量%）に浸漬し、一定電流発生装置を用いて電食を行った。電流を鉄筋1本当り1000mA（電流密度1.39mA/cm²）とした。電食中、鉄筋に沿って発生したひびわれの幅を、鉄筋1本あたり5カ所等間隔(45cm間隔)に合計25カ所でクラックスケールを用いて測定した。電食終了時には、さらにその測定点間でひびわれ幅を測った（鉄筋1本あたり合計9カ所）。

(3) 曲げ載荷試験：単純ばかり形式の2等分点載荷で行った。支承は、一方が回転移動支承で、他方が回転支承である。支承面で鉄筋の付着すべりが拘束されるのを防ぐために、支承面と供試体との間に鉄筋間の位置に鉄板を挿入して、鉄筋位置に反力が作用しないようにした。

(4) 鉄筋の腐食量および引張強さの測定：曲げ試験後に鉄筋を供試体からはり出し、腐食グレードを判断した。鉄筋をクエン酸2アンモニウム水溶液に約24時間浸漬して腐食生成物を除去した後、腐食量および引張強さを、①それぞれの鉄筋1本（計5本）の重量を測定、②ひびわれ幅測定部分の腐食量を調べるために、あらかじめ、ひびわれ幅測定位に刻印、③1本の鉄筋を4本（供試体No.4では5本）に切断して、引張試験にて降伏強度および引張強さを測定、④ひびわれ幅を測定した位置（1本あたり7カ所、計35カ所）の鉄筋を一定長さ（20ふし分、16.5cm）に切断し、その腐食量を測定、の順序で測定した。

表-2 コンクリートの圧縮強度

供試体	No.1	No.2	No.3	No.4
$f'_c (\text{kgf/cm}^2)$	160	255	324	257

4. 結果および考察

4.1 ひびわれ性状

(1) 供試体No.2：電食終了時におけるひびわれの様子を図-2に示す。鉄筋に沿って鉛直（上下）方向にひびわれが発生した。このひびわれは、かなりの高さまで達している。また、鉄筋から隣の鉄筋に向かう水平（横）方向のひびわれが発生し、一部では隣のひびわれの連結もみられた。

(2) 供試体No.3：供試体No.2と同様のひびわれが発生し、その長さは供試体No.2に比べて長かった。

(3) 供試体No.4：2方向に鉄筋を配置したために、鉛直方向のひびわれは少なかった。内側の鉄筋では、一部でひびわれが見られただけである。逆に、鉄筋間の水平方向のひびわれは全てが連結した。また、この供試体のみに、側方にひびわれが発生した。

4.2 積算電流量とひびわれ幅との関係

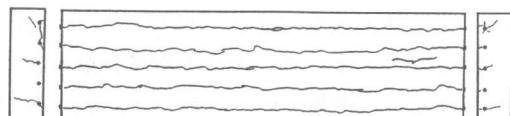
ひびわれ幅は積算電流量の増加と共に大きくなつた。また、積算電流量が増えるにつれて、ひびわれ幅のばらつき、すなわち鉄筋間のばらつきおよび1本の鉄筋における位置によるばらつきが大きくなつた。鉄筋間のばらつきに関しては、供試体の端に位置する2本の鉄筋のひびわれ幅が、他の鉄筋位置でのひびわれ幅より大きい結果となつてゐる。この理由は、供試体端部では横方向の拘束が少ないためであると思われる。供試体No.4では、この横方向の拘束を現実のものに近くなるように2方向に配筋したのであるが、端部と内部における横方向鉄筋による拘束力の違いがひびわれ幅に大きく影響し、端の2本の鉄筋のひびわれ幅が大きくなる結果となつた。

4.3 鉄筋の腐食状況

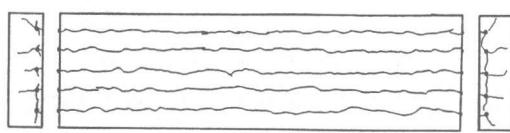
曲げ試験後における鉄筋の腐食状況を観察することによって、鉄筋表面のかぶりコンクリート側と供試体内側とを比較すると、かぶりコンクリート側が大きく腐食しているのが見られた。

4.4 積算電流量と腐食量との関係

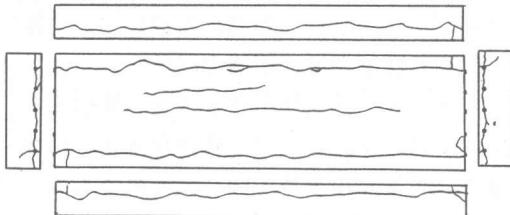
それぞれの供試体の積算電流量、腐食量およびそれらの関係を表す電食係数を表-3に示す。電食係数とは、積算電流量に対する腐食量の比で、酸化生成物特有のものである。ファラデーの法則による電食係数の理論値は、腐食生成物が FeO および Fe_2O_3 に対して、それぞれ 1.042 g/A/h および 0.698 g/A/h となる⁵⁾。実験結果は、これら両者の間にある。



(a) 供試体No.2



(b) 供試体No.3



(c) 供試体No.4

図-2 電食終了時におけるひびわれ

表-3 積算電流量と腐食量との関係

供試体	No. 2	No. 3	No. 4
総積算電流 (A·h)	925	1338	4202
総腐食量 (g)	864	1312	3830
電食係数 (g/A/h)	0.93	0.98	0.98

4.5 腐食量とひびわれ幅との関係

腐食量の指標としては、鉄筋の単位表面積当たりの腐食減量である「単位面積腐食量 (g/cm^2)」を用いる。単位面積腐食量とひびわれ幅との関係を図-3に示す。図中の凡例の括弧内の番号は、鉄筋の供試体端からの番号である。

腐食量に対するひびわれ幅は供試体によって大きく異なっている。特に、横方向鉄筋を配置した供試体No.4では、同じ腐食量に対してひびわれ幅が極めて小さくなっている。このことから、実験においては拘束条件が重要であることがわかる。鉄筋間の違いに関しては、ひびわれ幅と同様に、供試体の端の鉄筋の腐食量が大きい結果となっている。

4.6 腐食度 - 局所鉄筋強度関係

腐食度と局所鉄筋引張強さとの関係をを図-4に示す。ここでの腐食度とは、腐食量を元の鉄筋の重量で除したものである。腐食量が小さい時における局所引張強さが計算値よりも大きいものは、主として鉄筋のふし部分が腐食したためであると考えられる。局所鉄筋強度は、腐食量が大きくなるほど、腐食重量から求めた計算値よりも大きく低下している。このことは、腐食量が大きくなると腐食部分が集中して、局所的に強度が低下するためである。

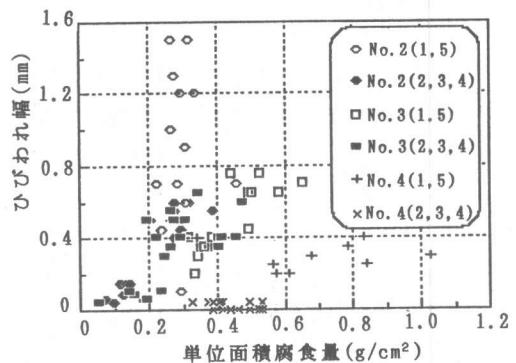


図-3 単位面積腐食量とひびわれ幅との関係

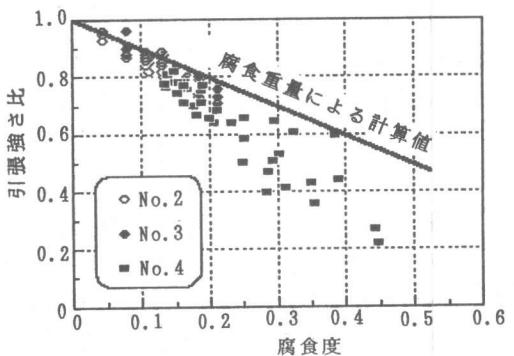


図-4 腐食度と鉄筋局所引張強さとの関係

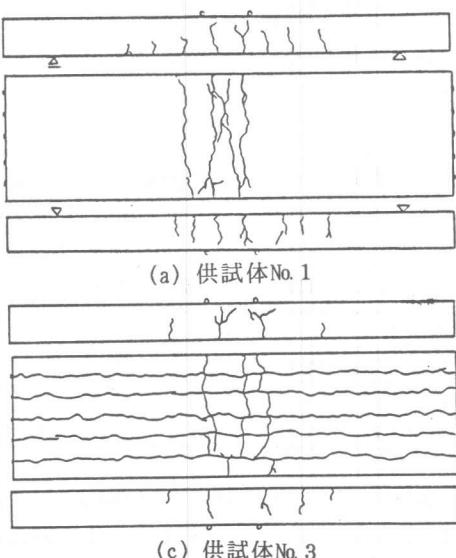


図-5 曲げ試験におけるひびわれ状況

4.7 曲げ試験におけるひびわれ性状

曲げ試験によって発生したひびわれの状況を図-5に示す。ひびわれ性状としては、鉄筋が腐食したスラブの方が健全なスラブに比べて、ひびわれ間隔が大きく、本数が少ないことがみられる。これは、鉄筋の腐食および縦ひびわれの発生によって、付着応力が小さくなることが理由であると思われる。

4.8 曲げ試験における破壊性状

各供試体の荷重-変位関係を図-6に示す。コンクリート強度の影響をなくすために、コンクリート標準示方書による理論耐力を求め、荷重をその値で除したものによって検討を行った。曲げ耐力は、腐食の程度が大きいほど小さくなっている。破壊モードについては、健全な供試体No.1における曲げ破壊に対して、鉄筋が腐食した供試体では、供試体No.3およびNo.4は同じ曲げ破壊を示したが、供試体No.2は最終的に鉄筋No.5が付着破壊を起こし、最大荷重後に荷重が急激に低下している。このことから、鉄筋が腐食した構造物では、条件によっては、付着力の低下により健全な構造物では起こらない定着破壊が生じる可能性があるといえる。

4.9 腐食量とスラブの耐荷力との関係

鉄筋が腐食したスラブの耐荷力の計算値と実験値とを比較したものを表-8に示す。計算番号1は、鉄筋腐食がないと仮定した場合であり、これらの値はスラブの耐荷力が鉄筋腐食によってどれだけ低下したかを示している。計算番号2から6は、腐食によって鉄筋の断面が欠損・減少したとして計算した場合である。鉄筋の断面減少量は、計算番号2では腐食重量から求め、計算番号3から6では鉄筋の引張試験の結果から求めた。

計算番号2の方法は、5本の鉄筋のそれぞれの断面減少量を各鉄筋の平均腐食量から求め、それらを合算して鉄筋断面積を計算したものである。図-4からわかるように、実際の降伏強度は腐食量から求めた計算値よりも小さいために、この計算方法は実際の耐荷力よりも大きい値を与えることとなる。耐荷力の実験結果もこのことと一致している。

計算番号3は、鉄筋の断面減少量を引張試験における引張強さの平均値から求めて計算したものである。耐荷力の試験結果は、全ての供試体でこの計算結果に最も近くなった。引張強さの平均値の母数は、供試体No.2およびNo.3では全ての位置における20個である。ただし、供試体No.4では、横方向鉄筋を配置した効果によって供試体中央部で腐食しにくくなり、一本の鉄筋においても供試体端部に腐食が集中したために、それぞれの鉄筋の供試体端部の2個のデータを除く計15個とした。供試体No.2は、最終的に付着破壊を起こしたが、この結果から付着破壊は荷重が耐荷力に近くなったときに生じたものと思われる。

計算番号4から6は、鉄筋の断面減少量を引張試験における降伏強度の最小値を用いて計算したものである。計算番号4は、供試体中の5本の各鉄筋において4個のデータの最小値がそれぞれのスパン中央にあると仮定して計算し、計算番号5は、スパン中央付近のデータ10個(2個×5本)の最小値が全鉄筋のスパン中央にあると仮定し、計算番号6は、全データ20個(供試体No.4では15個)の最小値のものが全鉄筋のスパン中央にあると仮定

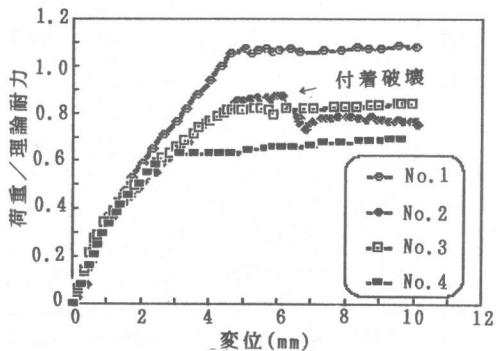


図-6 荷重-変位関係

して計算したものである。いずれの場合も、計算結果が実験結果よりも小さくなっている。さらに、集めたデータの最小値が危険部分に集中していると仮定するときには、データの収集範囲の広い方がより小さな耐荷力を見積ることになるという妥当な結果を得た。

表-4 スラブの曲げ耐力の計算

計算番号	計算条件	No.1 P=9130kg f'c=160(kgf/cm ²)			No.2 P=7830kg f'c=255(kgf/cm ²)			No.3 P=7430kg f'c=324(kgf/cm ²)			No.4 P=5670kg f'c=(257kgf/cm ²)		
		A _s (cm ²)	P _u (kg)	P/P _u	A _s (cm ²)	P _u (kg)	P/P _u	A _s (cm ²)	P _u (kg)	P/P _u	A _s (cm ²)	P _u (kg)	P/P _u
1	設計理論耐力	6.34	8526	1.07	6.34	8990	0.87	6.34	9160	0.81	6.34	9000	0.63
2	各鉄筋の腐食減量より	—	—	—	5.69	8150	0.96	5.35	7810	0.95	4.89	7080	0.80
3	各鉄筋の引張試験の平均	—	—	—	5.49	7880	0.99	5.04	7390	1.00	3.88	5690	1.00
4	各鉄筋の引張試験の最小値	—	—	—	5.33	7660	1.02	4.88	7170	1.04	3.76	5265	1.28
5	中心付近の鉄筋の最小値	—	—	—	5.07	7330	1.07	4.59	6760	1.10	2.48	3710	1.42
6	全引張試験の最小値	—	—	—	5.03	7280	1.08	4.48	6600	1.13	2.48	3710	1.42

A_s : 鉄筋断面積の計算値, P_u : 曲げ耐力の計算値, P : 曲げ耐力の実験値

5. まとめ

- 供試体端部では横方向の拘束が少ないために、供試体の端に位置する2本の鉄筋の腐食量およびひびわれ幅が、他の鉄筋位置でのものより大きくなる。
- 腐食鉄筋の降伏引張強さは、腐食量が大きくなるほど腐食重量から求めた計算値よりも大きく低下する。これは、腐食量が大きくなるほど腐食が局所に集中するためである。
- 鉄筋が腐食したスラブの曲げひびわれは、健全なスラブに比べてひびわれ間隔が大きく、本数が少ないことがみられた。これは、鉄筋の腐食によって付着応力が小さくなるためと思われる。
- 鉄筋が腐食したスラブの曲げ耐力は、腐食の程度が大きいほど小さくなっている。
- 鉄筋が腐食したスラブの破壊モードは、健全な供試体の曲げ破壊に対して、鉄筋が腐食した供試体の一方は同じ曲げ破壊を示したが、他方は付着破壊を起こした。このことから、鉄筋が腐食した構造物では、条件によっては、付着力の低下により健全な構造物では起こらない定着破壊が生じる可能性があるといえる。
- 鉄筋が腐食したスラブの耐荷力の計算方法として、鉄筋の断面減少量をその供試体中の降伏引張強さのすべてのデータの平均から求めた計算値が、実験結果に最も近くなった。

謝辞：実験の実施およびデータ整理は、徳島大学大学院生の山本恭史君が担当してくれた。ここに感謝する次第である。

参考文献

- たとえば、"Performance of Concrete in Marine Environment," SP-65, ACI, 1980.
- 樋野紀元；鉄筋腐食の現状把握、昭和59年度日本建築学会関東支部研究報告集, pp. 381-384.
- 昭和61年制定 コンクリート標準示方書〔施工編〕, 土木学会, pp. 14-15, p. 23
- 河野ら；各種鉄筋スペーサの特性に関する実験的研究、セメント技術年報, Vol. 42, pp. 579-582, 1988.
- 電触防止研究委員会編；電食防止ハンドブック, 電気学会, pp. 8-10, 1952.