

論文 樋門構造物の鋼材腐食がひび割れ幅および耐力に与える影響

高橋 祐樹^{*1}・武田 三弘^{*2}

要旨：樋門構造物における鋼材腐食は耐力低下等の危険があるため、腐食調査において迅速な判断や評価が必要となる。しかしながら現状の腐食調査では、コストのかかるはつり試験が主であり、この手法で常時調査を行うことは現実的ではない。また外観による鉄筋腐食度に相当する定量的な腐食量について明示されていない。本研究では鋼材の腐食ひび割れ幅から腐食量を簡易的に推定し、併せて鉄筋腐食度に相当する定量的な腐食量や耐荷性能との関係を明らかにするべく実験を行った。実験の結果、腐食ひび割れ幅と腐食率の関係には、鉄筋径や錆汁の有無が影響を及ぼすことが分かり、鉄筋腐食度と腐食率、付着応力、耐力の関係について実験的に求めた。

キーワード：鋼材腐食、電食、腐食率、ひび割れ幅、付着応力、曲げ耐力

1. はじめに

現在、国土交通省東北地方整備局管内で管理されているコンクリート製樋門・樋管構造物は約 1300 施設あり、そのうち、2023 年度には 50%もの施設が 50 年以上経過を迎え、今後 10 年間で 70%にも増加する状況になりつつある。また、変状の進行や機能低下または機能喪失が認められる施設が全体の 9 割を占めていると報告されている。これらの経年に伴い老朽化を迎えている構造物に対して、国土交通省では「河道及び河川管理施設の長寿命化計画策定の手引き(平成 30 年 3 月)」が策定され、管内において施設の状況を把握するための定期点検が開始された。その点検による主な劣化状況は、ひび割れからの漏水を起点とした錆汁またはエフロレッセンスの発生によるものが大半で、次いで凍害やアルカリシリカ反応が比較的多く報告されている¹⁾。特に、錆汁の発生はコンクリート内部の鋼材が腐食していることを意味し、鋼材の腐食が進行すれば、鋼材の健全な断面は減少するため、構造物の耐荷性能が低下し、要求される構造性能を満たすことができなくなることが考えられる。そのため、コンクリート内部の鋼材の腐食状況を確認するための鋼材腐食調査は、今後の維持管理業務における緊急度を判断し、補修や改修業務の順位付けをするためにも、重要な調査になっている。

しかしながら、現在の鋼材腐食調査は、腐食が進行していると思われる箇所のかぶりコンクリートから鋼材をはつりだし、腐食状況を目視によって確認する方法が主であるが、このような方法で常時調査を行うことは費用が大きくなるため現実的ではない。したがって、鋼材腐食調査の改善のために、コンクリート表面に発生する鋼材腐食による変状やひび割れ状況から、コンクリート内部の鋼材腐食状況を簡易的に推測することで、今後の点検業務において、調査費用を抑え、より迅速な判断と対応

が可能になると考えられた。さらに、はつり出した鋼材の腐食度を確認する方法として、土木学会「2018 年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]」²⁾においては、鋼材腐食の調査では鋼材腐食の発生の有無、位置、面積、断面減少量、孔食の有無等について測定を行うことを推奨している。また簡便な検査方法として、外観による腐食状態のグレード分けの評価方法について、実際の腐食状況の写真を示し 5 段階に規定している。しかしながら、その腐食グレードに相当する定量的な鋼材腐食量については明示されていない。一方、日本コンクリート工学協会「海洋コンクリート構造物の防食指針(案)」³⁾による分類では、0, I~IV の 5 段階分類となっており、唯一 IV のグレードのみ「鉄筋の断面が当初の 2/3~1/2 位欠損している」と定量的な表記がされている。

これら外観による腐食状態のグレード分け評価を用いて、コンクリートのひび割れ発生以降における、ひび割れ幅と鋼材腐食量および耐荷性能の関係を推定することによって、樋門・樋管構造物の補修・判断に繋がるものと思われ、検査方法の確立が望まれている。

本研究では樋門・樋管コンクリート構造物におけるコンクリートの鋼材の腐食ひび割れ幅から腐食量を簡易的に推定し、併せて鋼材腐食度に相当する定量的な腐食量や耐荷性能との関係を明らかにすることを目的として、以下の 3 つの実験を行った。1 つ目に、樋門構造物の壁面を模した複数の鉄筋が配筋された供試体に対し、電食試験による腐食促進実験を実施し、ひび割れ幅毎の腐食率の関係、鋼材の腐食状況の確認を行った。2 つ目に、引抜き供試体に対する腐食促進実験および引抜き試験を実施し、付着応力とすべり量との関係の確認を行った。3 つ目に、樋門構造物の一部を想定した梁型供試体に対する腐食促進実験および載荷実験を実施し、荷重とたわみとの関係の確認を行った。

*1 東北学院大学大学院 工学研究科環境建設工学専攻 (学生会員)

*2 東北学院大学 工学部環境建設工学科教授 博士(工学) (正会員)

2. 実験概要

2.1 供試体概要

実験で使用した鉄筋の物性値を表-1 に示す。

(1) 腐食促進実験 (実験 1)

鋼材の腐食率とひび割れ幅との関係を求める為、6 体の供試体を作製した。供試体の種類を表-2、寸法および配筋を図-1 に示す。実験では、JIS A 5308 レディーミクストコンクリート（普通 30-12-20-N）を使用し、主鉄筋として両端部 100mm をエポキシ樹脂で被覆した異形鉄筋(D13 または D19)4 本を、通電用の電極端子を鉄筋端部に接続し、かぶり 75mm で、250mm 間隔で配置した。また、配力筋としてエポキシ樹脂で被覆した異形鉄筋 D13 を 2 本、300mm の間隔を設けて主鉄筋と鉛直方向に配置した。

(2) 引抜き実験 (実験 2)

鋼材の腐食率毎の付着強度とすべり量との関係を求める為、12 体の供試体を作製した。供試体の種類を表-3、寸法および配筋を図-2 に示す。実験では、JIS A 5308 レディーミクストコンクリート（普通 30-12-20-N）を使用した。実際の樋門構造物を想定し、供試体に主鉄筋(D19)1 本を所定の区間のみエポキシ樹脂で被覆し、かぶり 75mm の位置に配筋し、自由端側の鉄筋は 5mm 程度突出させた。また配力筋(D13)2 本をエポキシ樹脂で被覆した後、125mm 間隔で主鉄筋と鉛直方向に配置した。なお、載荷端側の鉄筋との付着をあらかじめ断つため、5mm 程度の溝を設けた。

(3) 大型梁載荷実験 (実験 3)

鋼材の腐食率と耐力との関係を求める為、4 体の梁型供試体を作製した。供試体の種類を表-4、寸法および配筋を図-3 に示す。実験では、JIS A 5308 レディーミクストコンクリート（普通 24-12-20-N）を使用した。梁型供試体に異形鉄筋を、主鉄筋として D19(水平方向)2 本、配力筋として D13(鉛直方向)8 本、組み立て筋として D10(水平方向)2 本を配筋した。なお、主鉄筋の両端部 100mm と配力筋および組み立て筋は、エポキシ樹脂で被覆し、防錆処理を行った。また、通電用の電極端子を鉄筋端部に接続するため、主鉄筋のみ両端部を 10mm 程度突出させた。

2.2 鋼材腐食促進方法

鋼材腐食促進方法として電食試験を用いた。供試体底面にチタンメッシュを敷き、3%塩化ナトリウム水溶液に一

表-2 供試体の種類および条件(実験 1)

No.	呼び名	鉄筋番号	目標ひび割れ幅 (mm)
1	D13	1-1	0.05
		1-2	0.05
		1-3	0.2
		1-4	0.2
2		2-1	0.1
		2-2	0.6
		2-3	0.4
		2-4	0.9
3		3-1	0.7
		3-2	0.15
		3-3	0.5
		3-4	0.3
4	D19	4-1	0.05
		4-2	0.05
		4-3	0.2
		4-4	0.2
5		5-1	0.5
		5-2	0.3
		5-3	0.15
		5-4	0.1
6		6-1	0.4
		6-2	0.6
		6-3	0.25
		6-4	0.17

表-3 供試体の種類および条件(実験 2)

No.	呼び名	試験条件
1-1	D19	劣化なし(基準)
1-2		
1-3		
2-1		
2-2		腐食率2%相当
2-3		
3-1		
3-2		
3-3		腐食率5%相当
4-1		
4-2		
4-3		

表-4 供試体の種類および条件(実験 3)

No.	呼び名	鉄筋番号	試験条件
1	D19	1	劣化なし(基準)
		2	
3		腐食率2%相当	
4			
5		腐食率5%相当	
6			
4		7	腐食率10%相当
		8	

表-1 鉄筋物性値

鉄筋		降伏強度	引張強度
呼び名	鋼種	(N/mm ²)	(N/mm ²)
D13	SD345	359.12	538.28
D19	SD345	390.58	576.27

部浸漬し、鉄筋を陽極側、チタンメッシュを陰極側に接続し 0.05A～0.5A の直流電流を所定の目標値まで通電した。本実験では、いずれの電流量でも、電流密度が 200μA/cm² を超える結果となり、酸素発生によるひび割れが生じる可能性も考えられたが、時間的制約のため、

同一条件の供試体の電流量が同値になるよう調整しながら実験を行なった。測定項目は電食試験終了までの積算電流量($A \times hr$)、ひび割れ幅、錆汁溶出の有無とした。供試体かぶり面および側面に発生した腐食ひび割れ幅の測定にはクラックスケールを用いて、100mm 間隔に測定を行い、その平均値を使用した。

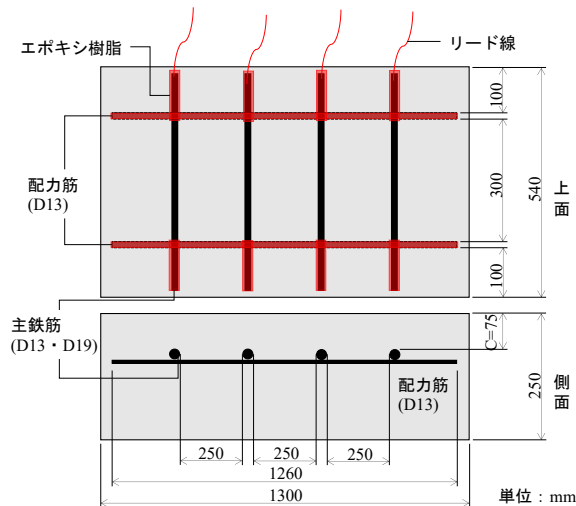


図-1 供試体概要 (実験 1)

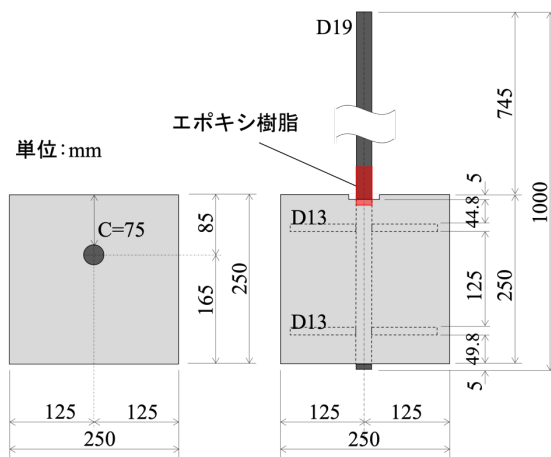


図-2 供試体概要 (実験 2)

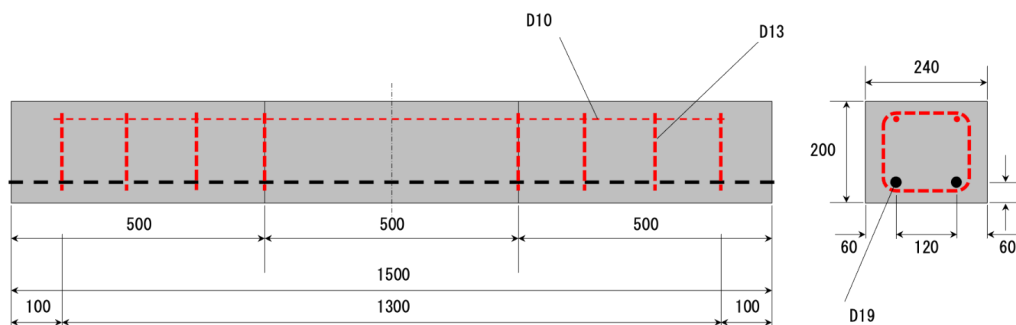


図-3 供試体概要 (実験 3)

2.3 引抜き試験

引抜き試験では、JIS B 7721 に規定する方法で校正されたものを使用した。供試体の自由端側が上となるようにした状態で万能試験機に設置し、ダイヤルゲージを取り付けた。鉄筋に対して引張方向に荷重をかけ、付着応力とすべり量の変化について測定を行った。

2.4 大型梁載荷試験

載荷試験では、載荷点(供試体両端から 500mm) 下面側と供試体中央部下面側の計 3 箇所にダイヤルゲージを取り付けた状態で、静的 4 点曲げ載荷試験を行った。試験の際には、荷重に対するたわみの測定を行うとともに、荷重が 30kN、60kN、90kN、120kN および降伏後において側面に生じたひび割れのトレースを行った。

2.5 鋼材の腐食率の測定

各試験終了後に、供試体から主鉄筋をはつり出し、土木学会「2018 年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]」²⁾に記載している腐食グレードとの外観上の比較を行った後、錆び取り効果があり、作業性および安全性を考慮した 30%のチオグリコール酸アンモニウム溶液(中性)に 24 時間浸漬および金ブラシで除錆した。その後、実測による質量減少率(以下、腐食率)を測定した。

3. 実験結果

3.1 腐食促進実験結果

図-4 は実験 1 に使用したかぶり 75mm の供試体 6 体に対するひび割れ幅と腐食率の関係を示したものである。この結果から、両者ともにひび割れ幅と腐食率の関係は右上がりの傾向が確認できたが、異形鉄筋 D13 と D19 によって鋼材の腐食率に違いが見られ、鉄筋径が小さいほど、同じひび割れ幅において、コンクリート中の鋼材の腐食率は大きくなる傾向となった。これは、本実験の電流密度の最小値が D13 では $417\mu A/cm^2$ 、D19 では $278\mu A/cm^2$ となることから腐食率が大きくなったものと思われる。また、両者の相関関係は、異形鉄筋 D13 が相関係数 $R=0.92$ 、D19 は相関係数 $R=0.60$ となり、D13 がより良好な関係が見られた。これは、異形鉄筋 D13 の腐

食率の結果がより広く分布しているためであり、D19の結果はひび割れ幅および腐食率の範囲が狭く、まとまった腐食率の分布となった影響であると考えられる。今後は、腐食率を大きくした条件のデータを蓄積していくことで、腐食ひび割れ幅の測定結果から鋼材腐食率の簡易的な推定が可能になるものと推察される。また、この関係図のばらつきの原因の一つに、錆汁の発生状況が関係しているものと考えられる。「錆汁なし」のプロット数が少ないため明確には言えないが、錆汁が確認出来た箇所の腐食率に対するひび割れ幅が大きくなる傾向が見られている。これは、錆汁の溶出がない場合は、鋼材とコンクリートとの界面のみで生じる腐食膨張によって、ひび割れ幅が徐々に伸展していくと考えられるが、錆汁の溶出がある場合、ひび割れ発生後、ひび割れ面に水酸化鉄が溶出し、ひび割れ内部で空気と接触することで酸化鉄として膨張し、ひび割れ幅を押し広げた可能性が考えられた。また、供試体寸法、配筋、使用したコンクリート、通電方法、全て同じ条件で実験したことから、考えられる原因としてブリーディングによる鉄筋下面の空洞の有無により腐食環境に違いが見られたものと考えられたが、確認は取れていない。

本実験結果からひび割れが生じている場合、錆汁の有無に違いが見られた。また、ひび割れが生じていなくても内部の鋼材が腐食していることもあった。そのため、前者の場合は、錆汁の有無を考慮して評価を行う必要があり、後者の場合は、事例のデータの蓄積も必要と考えている。さらに、実際の現場で生じている鋼材腐食と腐食促進実験による鋼材腐食との腐食量や腐食生成物等の腐食状況の違いを指摘する論文⁴⁾もあることから、この点も含め検討する必要があるものと考えている。

3.2 引抜実験結果

図-5は、健全な供試体と各腐食率の劣化供試体に対する付着応力とすべり量の関係を示したものである。本実験における最大付着強度はいずれの供試体もコンクリートの割裂破壊であった。図中の黄色ラインは異形鉄筋D19の降伏荷重を示している。この結果から、健全供試体の場合は付着応力の増加に伴いすべり量も増加していき、破壊まで直線的な関係が見られた。これは鉄筋が降伏する荷重を受けた後も、鉄筋とコンクリートの付着が良好であるため、靱性のある破壊形態となった。しかしながら、鋼材が腐食している場合、腐食率が大きい供試体ほど最大付着応力は小さくなる傾向が確認できた。また、腐食が1.2%および2.4%まで進行した条件においては、異形鉄筋D19の降伏荷重付近までは錆の生成により付着がより良好となったため、すべり量は健全供試体よりも小さくなる傾向がみられたが、鉄筋の降伏目前ですべり量が急激に増加し、脆性的な破壊形態となった。さ

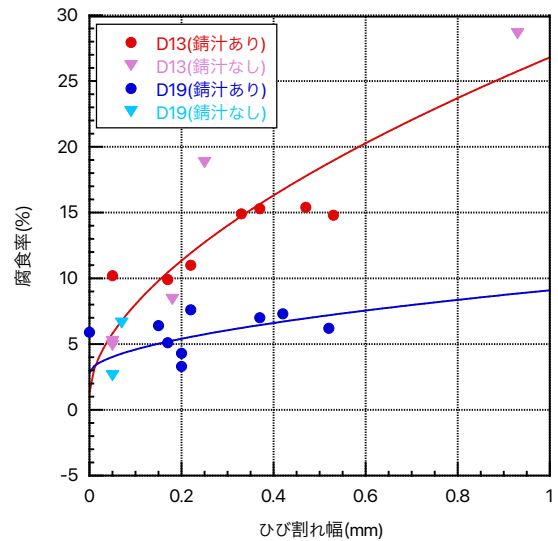


図-4 ひび割れ幅と腐食率の関係

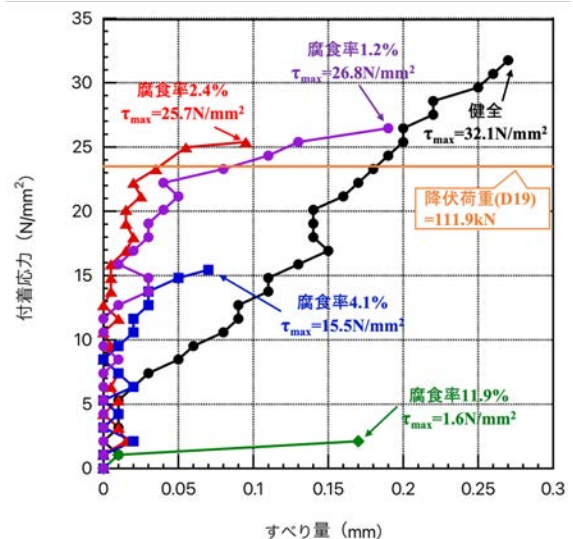


図-5 付着応力とすべり量の関係

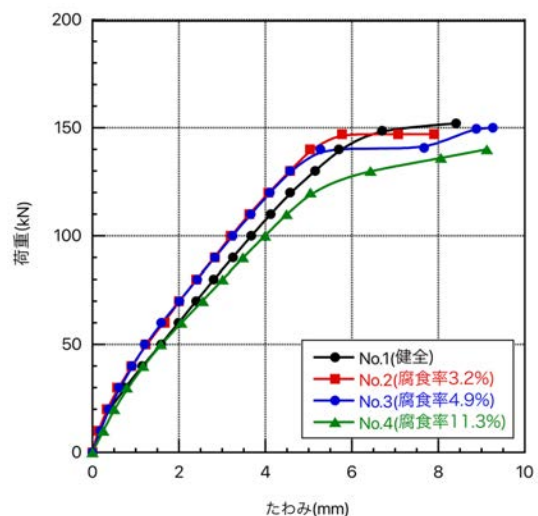


図-6 荷重とたわみの関係

らに腐食率 4.1%まで腐食が進行した条件では、健全な供試体の 1/3 程度の付着応力までは、同様にすべり量は小さい傾向であったが、それを超えるとすべり量が急激に増加し、健全な供試体の半分以下の付着応力で急激な割裂破壊が生じる結果となった。腐食率 11.9%まで腐食が進行した条件では、最大付着応力は 1.6N/mm^2 であり、引抜き試験開始後荷重をかけた直後に破壊される結果となった。これは、浮錆による鉄筋とコンクリートとの付着の低下による影響であると考えている。これらの結果から、腐食率が 1.2～2.4%程度までは、降伏荷重まで耐えられる状況ではあるが、その後の荷重の増加で急激なすべりを生じて破壊に至る傾向となり、腐食率 4%以上では、最大付着応力が健全な条件に対して半分以下となることが分かった。

3.3 大型梁載荷試験結果

図-6 は、健全供試体 1 体 (No.1) と劣化供試体 3 体 (No.2～No.4) に対する荷重とたわみの関係を示したものである。この図より、健全な供試体 No.1 は 148kN で降伏する結果となった。一方、腐食が促進された No.2 は腐食率 3.2%で降伏荷重 147kN、No.3 は腐食率 4.9%で降伏荷重 140kN となり、降伏荷重がやや小さくなる傾向が見られた。さらに、No.2 および No.3 は降伏開始前の荷重において、健全供試体よりたわみが小さくなる傾向が見られた。これは No.2、No.3 の腐食率の場合、コンクリートと鋼材の付着が良好となり、すべり量が小さくなることで降伏前のたわみが小さく、見かけの剛性が高くなるものと考えられる。最も腐食した No.4 供試体は腐食率 11.3%である。健全供試体と比較すると、同荷重において No.4 のたわみがより大きく、特に 136kN 以降は著しく増加していることがわかる。また、降伏点が明確ではなく、なだらかな曲線を描く結果となり、健全供試体の降伏荷重における同たわみで比較すると、荷重がおおよそ 8%程度低下する傾向が確認できた。

図-7 は、試験終了後の健全供試体 No.1 と供試体 No.4 (腐食率 11.3%) の展開図にひび割れをトレースしたものである。図中の黒線は電食試験後のひび割れであり、赤線は載荷試験後のひび割れを表している。この図より、

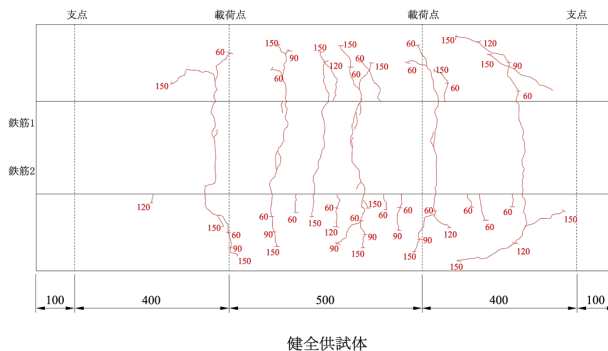


図-7 大型梁供試体ひび割れトレース図

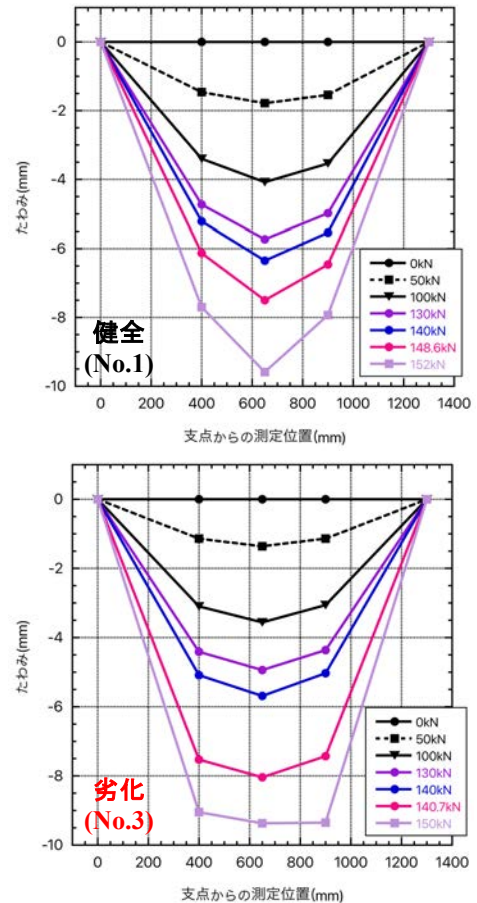
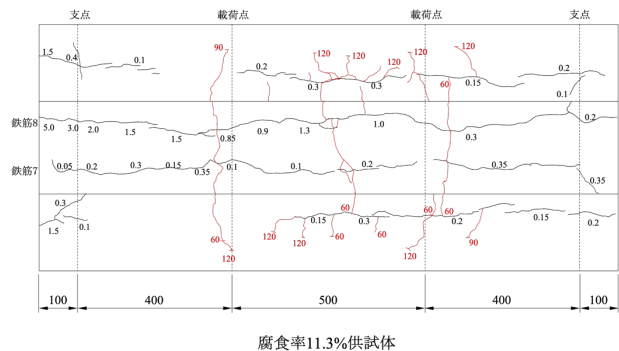


図-8 荷重毎のたわみの分布 (No. 1・No. 3)

腐食させた供試体には底面や側面に、鉄筋沿った腐食ひび割れが生じていることが確認できる。劣化が生じた場合の曲げモーメントによるひび割れの発生状況は大きく異なっていることが分かる。健全な供試体の場合、底面から側面にかけて等間隔で発生していることから、荷重に対して鉄筋とコンクリートの良好な付着により、協同して外力に抵抗していることが確認できる。一方、劣化が生じた供試体では、側面に生じたひび割れの数はいくつか確認できる。これは、浮錆により鉄筋とコンクリートの付着が低下したためと考えられる。

図-8 は、健全供試体 (No.1) と劣化供試体 (No.3) の荷重毎のたわみ分布を示したものである。No.3 (腐食率 4.9%) の供試体では、降伏荷重である 140kN 以前では、錆による



腐食率11.3%供試体

表-5 鉄筋腐食度における構造評価

鉄筋腐食度	腐食率	付着強度	耐荷性能
A またはⅠ	2.0%未満	最大付着応力はやや低下する。鉄筋降伏付近ですべり量が大きくなる。	降伏点はほぼ変わらない。 降伏前はたわみが小さくなる。
B またはⅡ	2.0%以上 5.0%未満	最大付着応力は健全時より半減する。鉄筋の降伏荷重前に脆性的に破壊される。	
C またはⅢ	5.0%以上 10.0%未満	最大付着応力は著しく低下する。 コンクリートと鋼材の付着は、鋼材の断面欠損や孔食の影響により、低下している可能性がある。部分的な断面欠損が著しい場合、鋼材降伏前に鋼材の破断の可能性も考えられる。	
D またはⅣ	10.0%以上		降伏点が明確ではなく、たわみ量は増加するため靱性が保たれず脆性的な破壊となる。 健全降伏時と比較すると腐食率10%程度で8%程度の耐力低下が見られる。

付着効果でたわみは健全供試体より小さい傾向であったが、降伏後には急激にたわみが増加し、載荷点間のたわみが平らとなることから、付着が大きく低下したものと思われる。この結果より、最大荷重が低下し降伏点も不明瞭となることから、安全性の低下が懸念される。

3.4 鉄筋腐食度における構造評価

表-5 は、本実験結果における鉄筋腐食度と腐食率および構造物に及ぼす影響についてまとめたものである。なお、腐食率は、安全性を考慮し実験から求めた腐食率の値の小数点第1位を切り上げたものを使用した。鉄筋腐食度と腐食率との関係を整理したところ、A またはI相当の腐食が生じた条件では鋼材の腐食率は2.0%未満、B またはII相当の腐食が生じた条件では鋼材の腐食率は2.0%以上5.0%未満、C またはIII相当の腐食が生じた条件では鋼材の腐食率は5.0%以上10%未満、D またはIV相当の腐食が生じた条件では鋼材の腐食率は10%以上となった。この鉄筋腐食度と腐食率の関係については、既往の研究⁵⁾と概ね同程度であり、樋門構造物を想定した条件においても同様の結果であった。

このように、鉄筋腐食度に相当する腐食率を明示することで、外観による鋼材腐食診断を定量的なものとし、診断者による評価のばらつきを抑えることが期待できる。

4. まとめ

本研究では鋼材の腐食ひび割れ幅から腐食量を簡易的に推定し、併せて鉄筋腐食度に相当する定量的な腐食量や耐荷性能との関係を明らかにするべく実験を行った。本実験の範囲内で以下のことが言える。

- (1) 腐食ひび割れ幅と鋼材腐食率の関係を求めるには、同じかぶり条件において、鉄筋径毎に分類することで可能になると考えられる。さらに、より精度を高めるために錆汁の有無で区別して評価を行う必要があると思われる。
- (2) 引抜き試験において、健全供試体の場合は付着応力の増加に伴いすべり量も増加していき、破壊まで直線的な関係が見られた。他方、鋼材の腐食率が大き

くなると、健全供試体よりも付着が良好となるためすべり量は小さくなるが最大付着応力も小さくなり、ピーク後のすべり量は急激に増加し脆性的な破壊に至る傾向が確認できた。また供試体によっては孔食による影響で載荷途中で鋼材が破断するものがあり、安全性という意味では問題が多いことが分かった。

- (3) 載荷試験において、鉄筋腐食度II～IIIの場合、コンクリートと鋼材の付着が良好となることで降伏前のたわみが小さくなり、見かけの剛性が高くなるものと考えられる。一方、鉄筋腐食度IVの場合は、降伏点が明確ではなく、なだらかな曲線を描く結果となった。また、健全供試体の降伏荷重における同たわみで比較すると、荷重が8%程度低下する傾向が確認でき、ひび割れ発生状況からも付着の低下が見られたことから、安全性の低下が懸念される。

謝辞：本研究を実施するにあたり、仙台コンクリート試験センター株式会社に多大なるご協力頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 高田 浩穂, 高橋 義孝, 安倍 徹, 石川 雅美: 樋門樋管におけるコンクリート劣化の特徴について, 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, vol. 70, V-27, 2015
- 2) 土木学会: [2018 年制定]コンクリート標準示方書 [維持管理編], 2018
- 3) 日本コンクリート工学会: 海洋コンクリート構造物の防食指針(案) -改訂版-, 1990
- 4) 高谷 哲, 西澤 彩, 中村 士郎, 山本 貴士, 宮川 豊章: コンクリート中における鉄筋の腐食生成物の生成プロセスおよび電気化学的特性, 土木学会論文集 E2, Vol.71, No.3, 235-247, 2015
- 5) 鈴木 修一, 堤 知明, 吉田 郁政, 大下 英吉: 塩害を受ける RC 構造物の目視点検情報のモデル化, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, 2009