梁曲げ破壊試験による樹脂系断面増強材と金属材料を組合せた補強効果の 検証

VERIFICATION OF REINFORCEMENT BY COMBINING RESIN-REINFORCED MATERIAL AND METAL MATERIAL

佐藤 誠*・飯田 和輝**・小野 篤史*** Makoto SATO, Kazuki IIDA and Atsushi ONO

The new renovation method for corroded reinforced concrete, which uses additional metal and newly developed material is recommended. In this process, the additional metal is replaced with the rebar. The newly developed material is resin-reinforced material made from incinerated sewage sludge ash. The resin-reinforced material protects additional metal from corrosion. Furthermore, resin-reinforced material firmly integrates additional metal and existing concrete. In this study, the reinforcing effect of the new method was verified by three-point bending test on beam.

Keywords : reinforced concrete, corrosion, resin-reinforced material, reinforcing effect, threepoint bending test on beam

1. はじめに

腐食性環境下、特に硫化水素が発生しやすい環境下に置 かれる鉄筋コンクリート下水道構造物は、コンクリートの腐食お よび剥離が発生し、鉄筋露出まで進行すると鉄筋腐食により鉄 筋断面積が減損することで、設計時点で設定された部材耐力 が確保されなくなる。また、大気中の炭酸ガスの侵入による中 性化が、コンクリート内部の鉄筋に至るまで進行し、鉄筋断面 積が減少することで耐荷性能が大きく損なわれる。このような 状況にある下水道施設を長期にわたって健全な状態で保全し て行くためには、構造物が置かれる環境に合わせた耐力の増 強を行う必要がある。

本研究は、腐食により鉄筋コンクリート部材のコンクリート部 の腐食、剥離にともなう鉄筋露出および鉄筋断面積が減損し た場合を想定し、減損した鉄筋の代わりに新たに設置する金 属材料と、その金属材料を固定しつつ耐腐食性を有し、コン クリートや金属材料を腐食作用から保護する材料を提案した。 本研究は、断面減損を生じた鉄筋に代わる金属材料としてワ イヤロープ、溶接金網を提案した。また、腐食からコンクリー トを保護する材料は、資源のリサイクル化に寄与する汚泥焼却 灰を混合した樹脂系断面増強材とした。耐力が低下した部材 に対する補強の評価は、梁供試体を用いた曲げ破壊試験を 用いて評価した。

- * コンサルティング事業統括本部 流域水管理事業本部 水環境事業部
 ** コンサルティング事業統括本部 流域水管理事業本部 河川水資源事業部
- *** コンサルティング事業統括本部 流域水管理事業本部 水環境事業部 上下水道部

2. 梁曲げ破壊試験の概要

(1) 材料と供試体

梁曲げ破壊試験で用いた材料の弾性係数および仕様は、 表-1の通りである。補強効果の検討に用いる供試体は、配 置する金属材料の種類を変えた表-2に示す4種類(「供試 体-B」、「供試体-C」、「供試体-D」、「供試体-E」) であ る。ここで、金属材料の補強効果の評価は、表面に樹脂系 断面増強材のみを塗布した供試体 (「供試体-A」) で、金属 材料の補強効果を定量的に比較するための基準として鉄筋量 の異なる D6 と D10 の異形鉄筋 (SD295) を配置した供試 体「RC-D6」、「RC-D10」を用いて定量的に評価した。実 験で使用した供試体の本数は表-2に示す通り、「供試体-A」、「RC-D6」と「RC-D10」を除いて2本(N=2)である。 製作した供試体の形状は、鉄筋断面積の減損を生じていない 部材に金属材料を付加してその材料の有無による補強効果を 比較する供試体(「供試体-B」、「供試体-C」、「供試体-E」) と鉄筋断面積を局所的に減損させて金属材料を付加させ金属 材料の補強効果を評価することを目的とする供試体「供試体-D」で供試体形状が異なる。前者を図-1に、後者を図-2 に示す。

なお、供試体の長さは1,200mm、載荷有効スパンを1,000 mmとした。コンクリートと樹脂系断面増強材の厚さは、表-3 に示す通りである。また図-3に示す通り、各供試体に配置 する金属材料の載荷面からの有効高は、約120mmとした。

材料		弾性係数(N/mm²)	
	W/C=60%、スランプ 11.75 cm、	無筋:22,000	
	$\sigma_{28} = 34. \ 1 \text{N/mm}^2$	有筋:23,500	
	主剤:エポキシ樹脂		
樹脂系断面増強材	充填剤:粒度調整灰、珪砂、	5,900	
	ヒュームドシリカ、その他		
ワイヤロープ	ϕ 4、JIS G 3525	200,000	
J1 (1 - J	構成:6×7+1FC	200, 000	
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	線径φ3.2mm、JIS G 3551	200,000	
冶按亚സ	30mm メッシュ (30mm×30mm)	200,000	

表-1	曲げ破壊試験で用いた材料の仕様および弾	性係数
-----	---------------------	-----

表-2 供試体に配置した金属材料の種類(())内は断面積)

供試体名	金属材料	金属材料の断面積	供試体製作本数	
供試体-A	(無筋)	—	1本	
供試体-B	<i>ϕ</i> 4のワイヤロープ	4本(50.26mm²)	2本	
供試体-C	∅3.2の溶接金網	8本(64.33mm²)	2本	
供試体-D ^{*1}	SD295A D10	2本重ね(142.66mm ²)	2本	
/# =≠ /★ ⊑%2	SD295 D6	2本(63.40mm ²)	2 🛧	
供武体一[∅3.2の溶接金網	8本(64.33mm²)	2 本	
RC-D6 ^{**3}	SD295A D6	2本(63.40mm ²)	1本	
RC-D10 ^{**3}	SD295A D10	2本(142.66mm ²)	1本	

※1 供試体-Dは有筋梁 (SD295A D10×2)の欠損部分に新たな鉄筋 (SD295A D10×2本)を重ねて継いだものに、断面増 強材を塗布。

※2 供試体-Eでは有筋梁(SD295AD6×2)に溶接金網 φ 3.2と断面増強材を塗布。

※3 有筋梁であるRC-D6 (SD295A D6×2:鉄筋断面積63.40mm²)、RC-D10 (SD295A D10×2:鉄筋断面積142.66mm²) は鉄筋コンクリート梁供試体の挙動および破壊荷重値を確認するため試験を行った。



図-1 載荷位置(供試体-A、B、C、E、RC-D6、RC-D10)



図-2 載荷位置(供試体-D)

	高さ(
供試体名	コンクリート	樹脂系断面 補強材	幅(mm)
供試体-A、B 供試体-C、E	115	10	235
供試体一D	100	30	235
RC-D6	150	—	235
RC-D10	150	_	235

A-5 供試件の1 法	表-	3	供試体の寸法
-------------	----	---	--------



図-3 梁供試体断面概要図

(2) 梁曲げ破壊試験方法

金属材料を用いた補強効果の検証は、梁曲げ破壊試験に より行った (図-4参照)。なお試験は、JIS A1106:2018 に準拠した。試験では、荷重の増加に合わせて供試体の変 位を変位計で計測した。変位は図-5と図-6に示す供試体 の載荷位置と支点位置で計測した。荷重載荷では樹脂系断 面増強材の収縮や仕上げの凹凸による偏荷重の影響を防ぐた め、載荷ローラと供試体の間に幅30mm、長さ300mm、厚 さ15mmの鋼板を設置した。また、「供試体-D」は、コンク リート打設面が載荷側となるため、供試体表面の不陸による荷 重の偏りの影響を防ぐために、鋼板と供試体の間、支持ロー ラと供試体の間にそれぞれ硬質ゴム板を設置した。載荷は、 最大載荷能力 2,000kN の載荷試験機を用い、載荷速度は 2kN/分とした。試験では漸増する変位と荷重値を計測して データロガーに記録した。梁曲げ破壊試験では、ひび割れ発 生荷重を樹脂系断面増強材(RC-D6、RC-D10はコンクリー ト)にひび割れが確認された荷重とし、さらに供試体が破壊に 至るまでの最大の荷重値を破壊荷重とした。なお、載荷は、 供試体のコンクリート、樹脂系断面増強材がどちらも破断し供 試体が破壊されるまで実施した。





CL



側面(A面)

1200

図-6 梁供試体形状および、 変位計配置位置(供試体-D)



図-4 梁曲げ破壊試験試験装置と試験の状況

载荷试验時下信

3. 試験結果

梁曲げ破壊試験の各供試体の破壊に至るまでの荷重と変位 の状況および破壊状況を図-7~図-23に示す。また、梁 曲げ試験で得られたひび割れ発生荷重と破壊荷重をまとめて 表-4に示す。

供試 体名	ひび割れ 発生荷重値 (kN)		破壊荷重値 (kN)		備考 (靭性、破壊荷重値 の RC との比較)	
	1本目	2 本目	1本目	2 本目		
供試体 A	19.6		19.6		 ・靭性 無し ・破壊荷重 高い 	
供試体 B	18.9	19.6	24.5	23.8	 ・靭性 無し ・破壊荷重 高い 	
供試体 C	27.3	29.4	27.3	29.4	 ・靭性 無し ・破壊荷重 高い 	
供試体 D	28.7	29.4	39.2	39. 2	 ・靭性 無し ・破壊荷重 高い 	
供試体 一E	34.3	33.6	39.9	40.6	・靭性 無し ・破壊荷重 高い	
RC-D6	16.1		21.0		(靭性 有り)	
RC- D10	15.4		35.7		(靭性 有り)	

表一4 試験結果まとめ

(1) RC-D6 および RC-D10

各供試体 (供試体-A ~供試体-E) の比較として製作した、 内部に鉄筋が配置された「RC-D6」(D6 × 2本 鉄筋断面 積 63.40 mm²) と「RC-D10」(D10 × 2本 鉄筋断面積 142.66 mm²) は、載荷荷重の増加とともに供試体にひび割れ が発生し、荷重-変位曲線が緩やかとなり鉄筋が降伏すること で破壊に至る挙動を示すことが確認された。「RC-D6」は、 16.1 kN まで載荷した時点でコンクリートにひび割れが発生し、 その後 10 ~ 20 mm 変位した時点で最大の荷重値 (21.0 kN) を示し、23 mm 程度で鉄筋 D6 が破断し、供試体が破壊され た。「RC-D10」は、15.4 kN まで載荷した時点でコンクリー トにひび割れが発生し、その後 35 ~ 40 mm 変位した時点に おいても、鉄筋 D10 の破断は確認されなかったが、コンクリー トのひび割れの進展よりこの時点を最大の荷重値 (35.7 kN) とした。

(2) 供試体 -A

「供試体-A」の荷重と変位のグラフを図-7に、破壊後の 状況を図-8に示す。供試体の内部に引張補強部材として 金属材料を配置していない「供試体-A」の破壊荷重は、D6 (SD295)を2本配置した「RC-D6」と同程度を示したが靭 性(粘り)が低く、供試体の中央付近でひび割れの発生する のと同時に破壊に至ることが確認された。また、破壊時の破断 面より、コンクリートと樹脂系断面増強材は破壊まで剥離するこ となく、一体性が確保されていることを確認された。「供試体-A」の試験結果より、引張力に対して抵抗が小さい無筋コンク リートのように、ひび割れ発生と同時に破断するが、樹脂系断 面増強材が高い耐力を得られる材料であることが確認された。







図-8 供試体-A 破壊状況(破断面)

(3)供試体-B

「供試体-B」の荷重と変位のグラフを図-9に、破壊後の 状況を図-10、図-11に示す。ワイヤロープを金属材料と して樹脂系断面増強材内に配置した「供試体-B」(ワイヤロー プ φ 4 × 4 本 断面積 50.26 mm²) は、荷重が約 19 kN 程 度載荷された時に樹脂系断面増強材にひび割れが発生し荷 重が低下するが、供試体中央付近に発生したひび割れの進 展と、ワイヤロープへの引張力の分担(伝達)増加により荷 重耐力が向上することで樹脂系断面増強材と金属材料の補強 効果が確認された。また、配置した金属材料の断面積は、「供 試体−B」に対して「RC−D6」が約 1.2 倍であるが、破壊荷 重値については「供試体-B」が約1.2倍高い値を示した。 さらには、破壊後の供試体の破断面より、コンクリートと樹脂系 断面増強材は破壊まで剥離することなく、一体性が確保される ことを確認した。「供試体-B」の試験結果より、樹脂系断面 増強材の内部に金属材料を配置することで、樹脂系断面増強 材との組合せにより引張抵抗材料として、同程度の鉄筋断面 積が配置された鉄筋コンクリート部材よりも高い耐力を示すこと が確認された。





図-12 RC-D6破壊状況(側面)



図-13 RC-D6破壊状況(破断面)

樹脂系断面増強材 樹脂素町で増確わ フィャ・

図-10 供試体-B 破壊状況(側面)



図-11 供試体-B 破壊状況(下面)

(4) 供試体-C

「供試体-C」の荷重と変位のグラフを図-14に、破壊後 の状況を図-15に示す。溶接金網を金属材料として樹脂系 断面増強材内に配置した「供試体-C」(溶接金網 φ 3.2× 8本 断面積 64.33mm²) は、D6 (SD295) の鉄筋を2本 配置(鉄筋断面積 63.40mm²)した「RC-D6」供試体のひ び割れ発生荷重値および破壊荷重値を上回り、樹脂系断面 増強材と溶接金網による補強の効果が確認された。また、「供 試体-C」の荷重-変位挙動は、断面鋼材量がほぼ等しい「RC -D6」の挙動とは異なり、荷重増加に対する部材の粘りは確 認できなかった。しかしながら、ひび割れ発生荷重値が最大 の荷重値(破壊荷重)を示していることからも、供試体内部に 配置された溶接金網が30mmの間隔で細かく配置されている こと、縦筋と横筋が溶接されて一体となったメッシュ構造である ことが、樹脂系断面増強材のひび割れの進展を抑制し、さら には供試体破壊後の破断面からもコンクリートと樹脂系断面増 強材が破壊まで剥離することなく一体性が確保されていること により、破壊荷重の増大が発現したものと考える。





図-15 供試体-C 破壊状況(破断面)

(5) 供試体-D

「供試体-D」の荷重と変位のグラフを図-16に、破壊 後の状況を図-17、図-18に示す。重ねて継いだD10 (SD295 2本)を配置した「供試体-D」(鉄筋断面積 142.66mm²)のひび割れ発生荷重と破壊荷重も、D10の鉄 筋が2本配置された「RC-D10」(鉄筋断面積142.66mm²) の値を超えることが確認された。局所的な鉄筋の減損(欠損) を想定して、欠損箇所に鉄筋(SD295 D6×2本)を重ね て継いだ「供試体-D」は、鉄筋が欠損していない「RC-D10」と比較してひび割れ発生荷重、破壊荷重ともに高い値 が確認された。「供試体-D」は、各供試体で計測されたひび 割れ発生値、破壊荷重値とも供試体の中では、最も大きなも のであった。これは、重ね継手部の鉄筋が見掛け上、欠損箇 所以外は2倍配置された状態となり、引張部材としての鉄筋 の効果が発揮されたものと考える。さらに、高い引張強度を有 する樹脂系断面増強材の、ひび割れの進展の抑制効果も手 伝い、高い破壊荷重値がもたらされたものと考えられる。なお、 破壊時に他の供試体とは異なり、樹脂系断面増強材が破損し ていることが確認されたが、これは他の供試体の金属材料の

径がおよそ3~6mm であるのに対して、「供試体-D」は約 10mm の鉄筋が配置されており、径に対して樹脂系断面増強 材の塗布厚さが鉄筋の純被りで5mmと小さいため、重ね鉄 筋端部の樹脂系断面増強材の被りの薄い部分からひび割れが 発生したものと推測される。しかしながら、コンクリートと樹脂系 断面増強材の界面には破壊まで剥離は確認されなかった。



図-16 供試体-D(RC-D10と比較)



図-17 供試体-D 破壊状況(側面)



図-18 供試体-D 破壊状況(下面 拡大)

(6) 供試体-E

「供試体-E」の荷重と変位のグラフを図-19に、破壊後 の状況を図-20、図-21に示す。鉄筋($D6 \times 2 \pm 2\phi$)と ϕ 3.2 の溶接金網 (ϕ 3.2×8本) を配置した「供試体-E」(断 面積 127.73mm²) は、D10 の鉄筋が 2 本配置された「RC -D10」(鉄筋断面積 142.66mm²)よりも高いひび割れ発生 荷重値、破壊荷重値が確認された。また、「供試体-E」の 荷重-変位挙動は、変位 8mm までは、 金属材料の断面積 が近い「RC-D10」の荷重-変位挙動を示したが、変位が 8mmを超えると急激に荷重耐力が減少し「RC-D6」の供試 体と類似した荷重-変位挙動にシフトした。このような現象が 生じた原因は、供試体が8mm 変位するまでは、供試体の下 部表面近くに樹脂系断面増強材で固定された溶接金網および D6 が共同で荷重を保持し、引張力が大きく発生する供試体 下面に配置された溶接金網が破断した後は、内部に配置され た鉄筋 (D6) が荷重を保持することになったためであると考え られる。すなわち、供試体の破壊後の状況より、コンクリートと 樹脂系断面増強材は剥離することなく一体性が確保されてい たことからも、樹脂系断面増強材の内部に配置された溶接金 網と、樹脂系断面増強材とコンクリートの間に配置された鉄筋 が共同で荷重に抵抗する限界で破壊荷重が発現したものであ る。さらには、内部に配置された鋼材量が「RC-D10」の約 90%であるのにも関わらず、破壊荷重は「RC-D10」を上 回っており、溶接金網、鉄筋、樹脂系断面増強材を組合せた 補強効果が確認された。

各供試体(「供試体-B」、「供試体-C」、「供試体-D」、「供 試体-E」)の破壊時の挙動は、鉄筋コンクリートである「RC -D6」や「RC-D10」と比較して靱性が確認されず、いず れの供試体の試験結果からも、鉄筋コンクリートと同様に、断 面積当たりの鉄筋量で耐力を評価すると、金属材料の断面積 が同等の鉄筋コンクリート構造物と比較して、破壊に至るまで に高い耐荷力を示し、かつその変形は鉄筋コンクリートと比較 して小さいことが確認された。これは、いずれの供試体の破壊 後の状況からも確認される通り、金属材料とコンクリートと樹脂 系断面増強材の界面に剥離は確認されず、一体性が確保さ れることで、樹脂系断面増強材内に配置された金属材料が、 樹脂系断面増強材と一体となり引張力に抵抗するためであり、 金属材料が破断する荷重までは確実に破壊耐力が向上してい ることからも確認された。



図-19 供試体-E(RC-D6, D10と比較)



図-20 供試体-E 破壊状況(側面)



図-21 供試体-E 破壊状況 (下面 拡大)



図-22 供試体 RC - D10 破壊状況 (側面)

い特徴があることが分かった。ここで、地中に埋設された下水 道施設は、破壊時の変形特性ではなく、耐荷力の向上により 評価されることにより、本材料による補強が有効であると考え られる。本材料による補強は、部材表面でのひび割れ発生を 抑制する効果により、腐食環境下にあり、硫化水素や大気中 の炭酸ガスの侵入で引き起こされるコンクリート部材の劣化や、 鉄筋断面積の減損からの保護を可能とする補強方法として有 効であり、補強後も長期にわたり健全な状態を保全することが 可能であると考えられる。なお、変形における剛性、強度特 性の考察は今後の課題である。



図-23 供試体 RC-D10 破壊状況(下面 拡大)

4. 結論

梁供試体を用いた曲げ破壊試験結果より、鉄筋コンクリート 供試体「RC-D6」と「RC-D10」よりも、樹脂系断面増強 材と金属材料を組合せて補強した各供試体(「供試体-B」、 「供試体-C」、「供試体-D」、「供試体-E」)の破壊荷重値 が大きいことを確認した。また、荷重-変位の関係および破壊 後の状況より供試体が破壊に至るまでは、コンクリートと樹脂系 断面増強材、樹脂系断面増強材と鉄筋を含む金属材料が一 体となり、作用する荷重に抵抗することが確認された。さらに は、樹脂系断面増強材と金属材料の組合せは、ひび割れ発 生後の鉄筋の引張耐力により最大荷重となる鉄筋コンクリート 構造物とは異なり、樹脂系断面増強材がひび割れ発生を抑制 し、樹脂系断面増強材内部に配置する金属材料に引張力が 効果的に伝達されることで、ひび割れ発生時に最大荷重が発 現する効果を確認した。

したがって、樹脂系断面増強材と金属材料を組合せて補強 することで、鉄筋コンクリート構造部材と同様に、構造耐力を 有する部材の構築が可能である。また、本試験で用いた樹脂 系断面増強材は耐腐食性を有する材料であるが、靱性に乏し