論文 フェロセメントと発泡スチロールからなる軽量複合部材の曲げ性状

木村 亨*1・福澤 公夫*2・鈴木 勇生*3・平岡 勝也*4

要旨:フェロセメントと発泡スチロールからなる軽量複合部材の曲げ性能について,金網の配置層数および 内包発泡スチロールの配置方法・発泡倍率の影響を実験的に検討した。実験の結果,①この種部材の曲げ性 状が延性的である。②部材を仕切るリブを多くしたり,発泡スチロールを堅くしたりして,フェロセメント の収縮を拘束すると荷重たわみー曲線の比較的初期の変形が増す。③破壊曲げ強さは,底版部に配置された 金網の軸方向鋼材量を引張鉄筋とするフェロセメント断面の破壊曲げ強さとし計算できる。④フェロセメン トの引張試験結果に基づく応力—ひずみ関係を用いた非線形FEM解析により,部材の挙動を推測できる。 キーワード:フェロセメント,発泡スチロール,軽量複合部材,ひび割れ荷重,曲げ延性,FE解析

1. はじめに

鉄筋コンクリートは、密度が大きいことが欠点の一つ である。人工軽量骨材コンクリートもあるが、それでも 密度1.6~1.8g/cm³と大きい。発泡スチロールの周囲を薄 肉モルタルで覆う構造の軽量部材が開発されている¹¹。 この場合、みかけの密度を1.0g/cm³以下にできるが、モ ルタルの補強材として耐アルカリガラス短繊維が使用さ れているものの耐久性に不安が残る。そこで、ガラス短 繊維補強モルタルに変えて、ステンレス製の平織り金網 を補強材としたフェロセメントを用いることを考えた。

フェロセメントは、セメントモルタルをマトリックス とし、金網を補強材とした複合材料のことで、1850年頃 考案され、薄肉で高靭性を有する材料のため船舶の船殻 材料として使用されてきた^{2),3)}。このフェロセメントは、 以下のような特徴があり、今後、歩道橋床版や浮き桟橋 など多くの利用方法が考えられる材料である^{4),5)}。 ①破壊に至るまで大きなエネルギー吸収能力を持ち、衝

① 収録に主るよく入さなエイルイン 吸収能力を持ち,1 撃に対しても大きな抵抗力を持つ。

②耐腐食性に優れ,維持費が安い。

しかし,部材の中心部を空洞としたPC桁や,発泡ス チロールを鉄筋コンクリートで覆った構造物も実用化さ れているものの,フェロセメントを用いた軽量複合部材 の研究例は見あたらず,構造性能,設計方法は明らかに されていないのが現状である⁶⁾。

そこで、構造要素を変化させるときの曲げ試験を行った。さらに、薄肉フェロセメントの引張試験結果に基づく応力---ひずみ関係を用いた非線形FEM解析により、部材の挙動を推定した。

2. 実験方法

2.1 要因と水準

図-1に試験体の一例(10-5-R-50-1)を示す。本試 験体は,幅1750mm,長さ300mm,高さ150mmの直方体 であり,モルタル厚さは10mm,軸方向に仕切るリブ(中 間リブ①という)5本,断面を仕切るリブ(中間リブ② という)有り,発泡スチロールの発泡倍率50倍,金網の 線径0.9mm,ピッチ6.35mm(目開き5.45mm)を1層配置 した場合の梁で,見かけの密度は0.54g/cm³である。

実験の要因は、内包する発泡スチロールの配置・発泡 倍率および金網の配置層数(試験体底版に配置,2層ま ではU型に配置,それを超える金網は底部のみに配置), モルタル厚さ、中間リブ①の本数、中間リブ②の有無で ある。表-1に試験体一覧を示す。試験材齢は、28日と した。



*1 茨城大学工学部 都市システム工学科 技術員 (正会員)
*2 茨城大学工学部 都市システム工学科 教授 工博 (正会員)
*3 東急建設(株) 鉄道建設事業部 土木部
*4 (株) 日本コンテック

15-5-NR-50-4

15

5

なし

50

4

21.6

2.2 試験体の作製方法と使用材料

試験体の作製順序は、次のとおりである。①所要の金 網を型枠中に配置する。②モルタルを投入し、試験体最 下面を形成する。③その後、発泡スチロールを置き、浮 き上がらないように固定する。④この状態でモルタルを 流し込み、試験体の側面やリブを形成する。⑤若干の時 間をおき、さらにモルタルを投入し、試験体上面を成型 する。

表-2に使用材料を示す。金網を配置した状態でモル タルを流し込んで成形する必要があり、狭い部分の注入 が可能な市販の無機系グラウトを使用した。配合比は質 量比でグラウト:水を1:0.14とした。金網はJIS G 3555

(織金網)によるメッシュ(1インチ間にある目の数) 4の線径0.9mm, ピッチ6.35mm(目開き5.45mm)のス テンレス平織金網を使用した。また,発泡スチロールは, 発泡倍率50倍と発泡倍率70倍のものを使用した。

2.3 モルタルの物性試験

軽量複合部材に用いるモルタルの圧縮強度および引張 強度を測定するために ϕ 50×100mmの円柱供試体を作 製し,JIS A 1108に準じ圧縮試験を,JIS A 1113に準じ 引張試験を行った。また、モルタルの曲げ強度を測定す るために40×40×160mmの角柱供試体を作製し,JIS R 5201に規定されている曲げ強さ試験を行った。その結果、 圧縮強度が74.2N/mm²,引張強度が3.95 N/mm²,曲げ強 度が9.25 N/mm²,弾性係数が28.3k N/mm²となった。

2.4 フェロセメントの引張試験・曲げ試験

フェロセメントの引張および曲げ試験には,520×40 ×10mmの丹冊状の供試体を使用した。フェロセメント の引張試験方法およびフェロセメントの曲げ試験方法に いては,既報⁷¹を参照して頂きたい。

表-3にフェロセメントの引張試験および曲げ試験結 果を示す。図-2にフェロセメントの引張を受けるとき の応力-ひずみ曲線を示す。降伏後の変形が大きいこと が示されている。弾性係数は、フェロセメントの引張試 験におけるワイヤストレインゲージを用いて得られる応 カ-ひずみ曲線の引張強度の3分の1点と原点を結ぶ直線 の傾きとした。

2.5 発泡スチロールの応力-ひずみ関係

図-3に発泡スチロールを圧縮するときの応力-ひず み曲線を示す。図中にはFEM解析で用いる応力-ひず み曲線も併せて示した。

2.6 軽量複合部材の曲げ試験方法

図-4に試験体の曲げ試験方法およびゲージの取付け 位置を示す。曲げ試験は3点曲げ試験とし、ワイヤスト レインゲージ (ゲージレングス60mm),変位計により ひずみおよび変位を測定した。

表-2 使用材料

2	材料	概略
10 10	グラウト N社製、無機系グラウト)	配合(質量比): グラウト(微砂を含む):水=1:0.14
	ステンレス製平織り金網 メッシュ4, 線径 ቀ0.9	0.2%耐力:380N/mm ² 引張強さ:747N/mm ²
	発泡スチロール	発泡倍率 50倍,70倍

表-3 フェロセメントの引張強度と曲げ強度

補強材層数	降伏強度	引張強度	曲げ強度	弾性係数
1層	3.50	5.41	18.90	34900
2層	5.25	11.46	32.40	35200
3層	8.67	19.75	43.10	30800
4層	9.75	25.33	53.78	34500

単位:N/mm²



図-2 フェロセメントの引張応力-ひずみ関係





図-4 軽量複合部材の曲げ試験方法

表-4 ひび割れ荷重および破壊荷重の実測値と計算値 との比較

2	ひび割れ 荷重				破壊荷重			
試験体記号	計算値 (kN)	実測値 ① (kN)	実測値 / 計算値	実測値 ② (kN)	実測値 / 計算値	実測値 (kN)	計算値 (kN)	実測値 / 計算値
10-5-NR-50-1	4.65	3.15	0.68	5.00	1.08	10.16	8.21	1.24
15-5-NR-50-1	6.39	6.38	1.00	7.00	1.10	10.41	8.09	1.29
10-3-NR-50-1	4.65	2.60	0.56	6.00	1.29	9.59	8.21	1.17
10-5-R-50-1	4.65	3.78	0.81	5.00	1.08	8.37	8.21	1.02
10-5-NR-70-1	4.65	2.80	0.60	5.00	1.08	8.97	8.21	1.09
10-5-NR-50-2	4.65	3.87	0.83	7.50	1.61	21.25	16.41	1.29
10-5-NR-50-3	4.65	4.92	1.06	8.00	1.72	28.45	24.52	1.16
15-5-NR-50-4	6.39	8.76	1.37	12.00	1.88	34.45	32.56	1.06
注ひひ割れ荷重: 実測値のは、引張縁のゲージが大きく変化するときの荷重に基づく値								

実測値図は、肉眼により発見された荷重に基づく値

3. 実験結果と考察

3.1 試験結果一覧

表-4に軽量複合部材の曲げ試験におけるひび割れ荷 重および破壊荷重を示す。ひび割れ荷重の実測値①は, 試験体の下面に貼付したゲージによるひずみの大きく変 化する荷重あるいは引張ひずみが250×10⁻⁶となる値か ら求めた。また,ひび割れ荷重の実測値②は,肉眼によ りひび割れを確認した荷重とした。破壊荷重は,曲げ試 験における最大荷重とした。なお,表には計算値も示さ れているが,その計算方法および実測値との比較につい ては後述する。

3.2 軽量複合部材の曲げ性状

図-5に試験体10-5-NR-50-1の荷重と圧縮縁ひずみお よび引張縁ひずみの関係示す。(a)は立ち上がり部分で あり,(b)は破壊に至るまでの全体を示す。引張縁ひず みの立ち上がりの部分は、全断面を有効とする計算値と ほぼ一致している。















写真-1 ひび割れ状況(補強材1層(10-5-NR-50-1))



写真-2 ひび割れ状況(補強材2層(10-5-NR-50-2))



写真-3 ひび割れ状況 (部材厚さ15mm,補強材1層(15-5-NR-50-1))

図-6に荷重と試験体側面の軸直角方向のひずみとの 関係を示す。ひび割れ発生荷重と推測される約4kNまで は、3点ともひずみはほぼ0µに近い。試験体にひび割れ 発生後、いずれのゲージも引張ひずみとなり、約700µ にまで達するものもあるが、これは、モルタルが膨張し たというよりもひび割れ位置の上昇に伴う影響と思われ る。他の試験体についても同様の結果が得られた。

図-7に荷重-たわみ関係を示す。荷重-たわみ図は、 載荷の初期を示す「立ち上がり」と、破壊に至るまでの 「全体」の2つを示した。図には2層および3層,4層の 場合も示してあるが、1層との比較については後述する。 図中、引張縁のワイヤストレインゲージでの値から求め た点および肉眼によひび割れを確認した点を示す。また、 引張鉄筋を考慮し、全断面を有効とする荷重-たわみ関 係の計算値も示す。図より、荷重-たわみ関係は、降伏 後も変位量が大きく増加し、延性的な挙動であること、 立ち上がり部分は全断面有効とする計算値にほぼ一致す ることが分かる。写真-1にひび割れ状況を示す。この 場合、ひび割れは、約30mm間隔に生じている。また、 中央のひび割れが大きく、この部分の補強材の破断が試 験体の破壊となった。

3.3 各種要因が曲げ性状に及ぼす影響

(1) 補強材の層数の影響

図-7に補強材が1層の試験体10-5-NR-50-1, 2層の試 験体10-5-NR-50-2および3層の試験体10-5-NR-50-3, 4層 の試験体10-5-NR-50-4の荷重-たわみ曲線を示す。図よ



り補強材の層数を1層から2層,3層,4層と増やすことで、 荷重-たわみ曲線における降伏荷重および破壊荷重が増 加する。**写真-2**に補強材の層数が2層の場合のひび割 れ状況を示す。ひび割れが1層の場合に比べ分散してい ることが分かる。



(2) モルタル厚さによる影響

図-8に補強材が1層でモルタル厚さが10mmの試験 体10-5-NR-50-1と15mmの試験体15-5-NR-50-1の荷重-た わみ曲線を示す。モルタル厚さが15mmの場合、モルタ ルの厚さが10mmの場合に比べて、立ち上がりの剛性が 高いものの、破壊荷重は同等であり、破壊に至るまでの 変形量が小さい。写真-3に、モルタル厚さが15mmの 場合のひび割れ状況を示す。ひび割れが集中しているこ とが分かる。このことは、モルタルの引張強度に対し、 金網の引張強度が小さく、最初にひび割れが生じた場所 の補強材に伸びが集中したためと考えられる。

(3) 中間リブ①の数による影響

図-9に中間リブ①が5本の試験体10-5-NR-50-1と3本 の試験体10-3-NR-50-1の荷重-たわみ曲線を示す。リブ が5本の場合,初期の段階では3本の場合とほぼ一致して いるが,荷重が5kN付近からリブの本数が多い方が荷重 の増加に対するたわみの増加量が大きい。予想した挙動 とは逆であり,モルタルの収縮により,部材内部の発泡 スチロールがモルタルに抵抗し引張応力が発生するため であると考えられる。

(4) 中間リブ②の有無の影響

図-10に中間リブ②が無い試験体10-5-NR-50-1と有 る試験体10-5-R-50-1の荷重-たわみ曲線を示す。図より, 中間リブ②のある方が,中間リブないものと比べ,立ち 上がり部分の変形が若干大きいことがわかる。断面の剛 性が大きくなるはずが,実測では逆の結果となった。こ れもフェロセメントの収縮の影響と考えられる。

(5) 発泡スチロールの発泡倍率の影響

図-11に発泡スチロールの発泡倍率が50倍の試験体 10-5-NR-50-1と発泡スチロールの発泡倍率が70倍の試験体 体10-5-NR-70-1の荷重-たわみ曲線を示す。図より,発 泡スチロールの発泡倍率が50倍のとき,荷重-たわみ曲 線は発泡スチロールの発泡倍率が70倍の試験体とほとん ど一致しているが,比較的初期のたわみが1~10mmの 部分で荷重に対するたわみが大きくなる部分があった。 この点についてもフェロセメントの収縮の影響と考えら れる。すなわり,発泡倍率の低い方がフェロセメントの 収縮に対する抵抗力が大きく,結果としてフェロセメン トに引張応力が生じたためと考えられる。

(6) フェロセメントの収縮

フェロセメントの収縮の影響と思われる結果のため, 引張試験に用いた同寸法の試験体を作製し,補強材が1 層と3層について,JISA1129-2に規定されているコンタ クトゲージ法により収縮ひずみを測定した。その結果を 図-12に示す。これより試験に用いたフェロセメント が収縮量が大きいことが分かる。

3.3 ひび割れ・破壊荷重の実測値と計算値の比較

ひび割れ荷重は、発泡スチロールを無視し、金網を考 慮しない断面とする断面係数に、モルタルの引張強度を 乗じた値に基づいて求めた。破壊荷重は、部材底部の補 強材(金網)を配筋していると仮定し、補強材の断面積 としては、軸方向の補強材のみを考え計算した。ひび割 れ荷重については、補強材1層の場合は、肉眼観察に基 づく値とほぼ一致した。補強材2層以上の場合では、ゲ ージの測定値に基づく値とほぼ一致した。破壊荷重につ いては、計算値と実測値がほぼ一致した。



4. FEMによる荷重-たわみ関係の推定

4.1 解析方法

本軽量複合部材はステンレス金網を用いているため補 強材の腐食を考慮しなくともよいが、荷重と変形の関係 の挙動を把握することが実用化にあたって必要になる。 そこで、非線形有限要素解析(FEM解析)を用い、曲 げ性状を検討した。図-13に試験体10-5-NR-50-1のモ デル図を示す。解析モデルは試験体の1/4を再現したも ので、三角錐10節点固体要素とした。また、試験体を1/4 にカットした2面では、面に対して垂直方向に拘束し、 支持点は高さ方向に対して拘束した。モルタル部の応力 ーひずみ関係を図-14に示す。モルタルの引張を受け たときの応力-ひずみ関係は、フェロセメントの引張試 験結果から得られた実測に基づいた。発泡スチロールの 応力-ひずみ関係を図-3に示す。

4.2 解析結果

図-15に補強材が1層の試験体10-5-NR-50-1と補強 材が2層の試験体10-5-NR-50-2の荷重-たわみ曲線と解 析値との比較を示す。立ち上がり部分はほぼ一致した。 荷重に対したわみが大きくなる部分で実測値は解析値よ り変形が大きい結果となった。これは、実測においては、 モルタルの収縮により、部材内部の発泡スチロールがモ ルタルに抵抗し内部応力が発生していたためと考えられ る。その後、両試験体とも実測値と解析値の差がなく、 部材の荷重-変位性能をよく再現できた。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

①発泡スチロールの周囲にステンレス金網を配置したフェロセメントで覆う構造の軽量複合部材は、曲げ変形に対し延性的な挙動を示す。

②試験体を仕切るリブの数が多い場合,また,発泡スチロールの発泡倍率が低い場合のように、フェロセメントの収縮に対して抵抗力が大きい場合、比較的初期の変形が大きくなる。これは、モルタルの収縮が部材内部の発泡スチロールがモルタルに拘束され抵抗し内部応力が発生するためであると考えられる。

③補強材1層の軽量複合部材の肉眼によるひび割れ強さ は、フェロセメントの断面係数に使用したモルタルの引 張強度を乗じた値と一致する。補強材が2層以上になる とワイヤストレインゲージの変化する点から求める値と ほぼ一致する。

④破壊曲げ強さは、軸方向の試験体底版に配置した補強 材を引張鉄筋とするフェロセメント断面の破壊曲げ強さ として推定できる。

⑤フェロセメントの応力ひずみ関係を,引張に対しては フェロセメントの引張試験から求めた関係を,圧縮には 圧縮試験から求めた関係として用いた非線形FEM解析 により軽量複合部材の挙動を推測できる。



参考文献

- 木村亨,他:超軽量石貼りパネルの特性,日本建 築学会大会学術講演概要集,2005.9, pp.1049-1050
- 2) 西岡思郎,他:フェロセメントについて、セメント・コンクリート,No.350,1976.4pp.44-4
- 3) 村田二郎,他:フェロセメントに関する基礎実験, セメント・コンクリート, No.374, 1978.4, pp.14-21
- 4) 北村茂,他,:フェロセメントの引張試験における ひび割れ性能及び付着強度,コンクリート工学年次 論文報告集, Vol.16, No.1, 1994, pp.513-518
- 5) 鷹谷知計,他:シリカヒュームを混入したフェロ セメントの曲げ強度と靱性,土木学会第47回年次学 術講演会,1992.9, pp.682-683
- 大西寛:鋼とコンクリートの新しい組合せ、コン クリート工学, Vol.17, No.7, 1979.7, pp.77-79
- 7) 木村亨,他:ステンレス金網を補強材とした薄肉 モルタル板の引張および曲げ性状:土木学会第63回 年次学術講演会,2009, pp.519-520