

論文 縮小鉄筋を用いた梁縮小模型の曲げ挙動

渡嘉敷 勝^{*1}・浅野 勇^{*2}・森 充広^{*3}・西原 正彦^{*4}

要旨: 1/24 スケールの縮小鉄筋を用いた梁縮小模型の基礎的な力学的挙動について、RC 梁の原型試験体と 1/7 および 1/10 縮小試験体の曲げ試験における荷重-変位関係およびひび割れ発生状況を比較検討した。その結果、曲げ引張型破壊試験において、縮小試験体は弾性領域から降伏までの荷重-変位関係が原型試験体と良く一致すること、1.2%程度の低鉄筋比においては降伏以降も最大荷重までは挙動が一致することが判明した。一方、2.1%程度の高鉄筋比では、降伏後の挙動は荷重、変位ともに原型試験体よりも大きくなり、原型試験体の挙動と大きく相違することが明らかとなった。

キーワード: 縮小鉄筋, 縮小模型, RC 梁, 曲げ試験, 相似則

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下、RC）構造物の破壊現象の解明や理論の検証のために模型実験が行われている。しかし、一般の RC 構造物の模型実験は規模が大きく、実験施設の制約や実験費用の増大などから、模型の縮小化が重要な課題の一つとなっている。縮小模型製作の問題として、縮小鉄筋の入手が困難であることが挙げられる。実鉄筋の入手は容易であるが、縮小鉄筋は自作する必要があり研究事例も少ない。その中で、先行的な研究として、試作した D3 鉄筋を用いた梁実験¹⁾や同じく試作した D2, D3 鉄筋等を用いた振動実験^{2),3)}、主筋φ4 と高靱性繊維補強セメント複合材料を用いた縮小模型による振動実験⁴⁾などがある。また、最近、市販された 1/24 スケールの縮小鉄筋を用いた実験⁵⁾も実施されている。

農業分野においても RC 構造物の賦存量は多く、図-1 に示すような水路から、操作台までの高さが 10 m を越える可動堰などがある。水路の最小部材厚は単鉄筋では 130 mm となっており、使用鉄筋も D10~D32 程度が使用される。また、引張鉄筋比も 0.6~1%程度と比較的低鉄筋比な RC 構造物である。今後、農業水利 RC 構造物の

耐力等の性能照査のための模型実験の重要度が増す中、模型実験の一部を小縮尺の縮小模型で代用できれば、実験効率を向上させることができる。

本研究では、農業水利 RC 構造物の鉄筋比を考慮して縮小鉄筋を用いた梁縮小模型による曲げ試験を行い、実寸試験体における荷重-変位関係およびひび割れ発生状況を比較し、縮小模型の力学的挙動を明らかにする。

2. 実験方法

2.1 試験体

本研究で用いた試験体の形状および鉄筋配置を図-2 に、また、試験体の諸元を表-1 に示す。試験体は 3 種の縮尺で設計した。F 試験体は縮尺 1/1 の基準とする原型試験体であり、引張鉄筋比が 0.59%, 1.19% および 2.11% の 3 種である。S および T 試験体は F 試験体と幾何学的に相似な縮小試験体であり、S 試験体は縮尺 1/7、また、T 試験体は縮尺 1/10 である。縮尺は、縮小鉄筋を用いた縮小試験体の引張鉄筋比が原型試験体の引張鉄筋比とほぼ同程度となるように選定した。なお、試験体は曲げ引張破壊となるように設計し、等曲げ区間以外は帯鉄筋によりせん断補強した。

F 試験体は各 1 体を製作し、S および T 試験体は各 6 体を製作して試験した。

2.2 材料

(1) コンクリートおよびモルタル

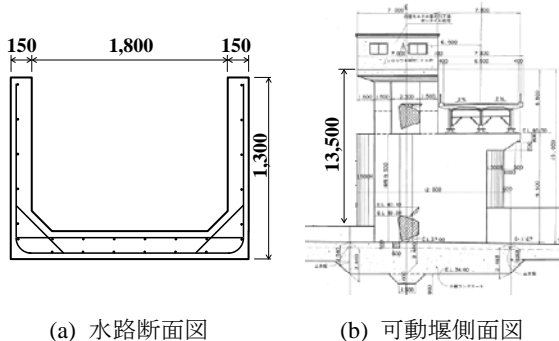


図-1 農業水利 RC 構造物の例

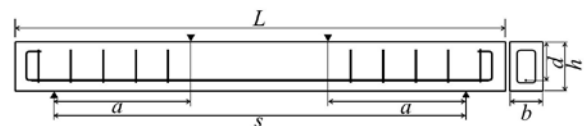


図-2 試験体の形状および鉄筋配置

*1 (独) 農研機構 農村工学研究所 施設工学研究領域 主任研究員 博士 (農学) (正会員)
 *2 (独) 農研機構 農村工学研究所 施設工学研究領域 上席研究員 博士 (農学) (正会員)
 *3 (独) 農研機構 農村工学研究所 施設工学研究領域 主任研究員 博士 (農学) (正会員)
 *4 (独) 農研機構 農村工学研究所 施設工学研究領域 主任研究員 (正会員)

表-1 試験体の諸元

試験体	縮尺	試験体寸法 (mm)					L	引張鉄筋		帯鉄筋		d _{max} (mm)
		b	h	d	a	s		本数-径	p _t	径-間隔(mm)	p _w	
F1	1/1	100	150	120	420	1260	1500	1-D10	0.59	D10-100	1.43	20
F2								2-D10	1.19			
F3								2-D13	2.11			
S1	1/7	14	21	17	60	180	214	1-mD32	0.65	mD32-14	1.57	2.5
S2								2-mD32	1.29			
S3								2-mD41	2.35			
T1	1/10	10	15	12	42	126	150	1-mD22	0.63	mD22-10	1.52	2.5
T2								2-mD22	1.26			
T3								2-mD32	2.57			

b: 断面幅, h: 断面高, d: 有効高, a: せん断スパン, s: スパン長, L: 試験体長, p_t: 引張鉄筋比 (%), p_w: 帯鉄筋比 (%), d_{max}: 最大骨材寸法

F試験体に使用したコンクリート配合を表-2に, SおよびT試験体に使用したモルタル配合を表-3に示す。コンクリートは, セメントに早強ポルトランドセメント, 粗骨材に砕石, 細骨材に鬼怒川砂, 混和剤として AE 減水剤 (マスターポゾリス 15S) および AE 剤 (マスターエア 202) を各々セメント質量の 0.6% および 0.003% 用いた。モルタルは, セメントに早強ポルトランドセメント, 細骨材に鬼怒川砂の 2.5 mm ふるい通過分を使用した。また, 混和剤として AE 減水剤 (マスターポゾリス No. 8) をセメント質量の 0.25% 用いた。

(2) 鉄筋

F試験体では, 異形棒鋼 D10 および D13 (SD295A) を使用し, S および T 試験体では, 縮小鉄筋を使用した。縮小鉄筋は, 実際の鉄筋を 1/24 スケールで模擬した鉄筋である。鉄筋表面にはリブと節が再現されている (写真-1) ものの完全な幾何学的相似ではない。現在, D13, D16, D22, D32, D41, D51 に相当する縮小鉄筋が市販されている。本研究で用いた D22, D32, D41 相当の 3 種類の縮小鉄筋の仕様を表-4 に示す。なお, 以下では実鉄筋と縮小鉄筋とを区別するため, 縮小鉄筋を mD22, mD32, mD41 と各々表記する。

縮小鉄筋の応力-ひずみ関係を調べるために, mD22, mD32, mD41 の各 10 試験体を用いた引張試験を行った。長さ 200 mm の試験体の両端 30 mm をチャックで固定し,

変位速度 0.5 mm/min で引張した。試験体中央部の 100 mm を標点距離とし, ひずみを計算した。また, 求められた応力-ひずみ関係の弾性領域より弾性係数を算出した。

2.3 試験体の製作

F試験体は鋼製型枠, また, S および T 試験体はアクリル製型枠を使用して打設した。打設翌日に脱型し, F試験体は湿潤養生, S および T 試験体は水中養生とした。また, 打設時には圧縮強度用試験体を各々製作し, F試験体と S および T 試験体と同じ条件で養生した。各試験体は, 材齢 7 日で養生を終え, 試験に供した。

2.4 曲げ試験

梁試験体の曲げ試験は, 3 等分点荷重試験とした。

変位は, F試験体では試験体下部中央に変位計を設置してたわみを測定し, S および T 試験体では試験体上部の荷重点の変位を荷重試験機により測定した。

F試験体は, 繰り返し荷重試験とし, S および T 試験体は, 各 3 体を単調荷重試験とし, 残りの 3 体を繰り返し荷重試験とした。S および T 試験体の各試験の荷重方

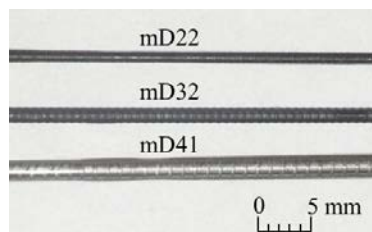


写真-1 縮小鉄筋

表-2 コンクリートの配合および圧縮強度

d _{max} (mm)	W/C (%)	配合 (kg/m ³)					σ _c (N/mm ²)
		W	C	S	G	A	
20	64	168	263	863	987	1.59	23.4

表-3 モルタルの配合および圧縮強度

d _{max} (mm)	W/C (%)	配合 (kg/m ³)					σ _c (N/mm ²)
		W	C	S	G	A	
2.5	65	340	524	1310	-	1.31	32.3

表-4 縮小鉄筋の仕様

呼び名	単位質量 (kg/m)	直径 (mm)	断面積 (mm ²)	長さ (mm)
mD22	0.0060	0.98	0.759	200
mD32	0.0121	1.40	1.541	200
mD41	0.0220	1.89	2.796	200

法を表-5および表-6に示す。

3. 結果および考察

3.1 縮小鉄筋の力学的性質

縮小鉄筋の応力-ひずみ関係を図-3に示す。また、応力-ひずみ関係から求めた縮小鉄筋の材料特性を実鉄筋とともに表-7に示す。縮小鉄筋の弾性係数は弾性範囲区間の勾配から算定した。縮小鉄筋の応力-ひずみ関係の特徴としては、a) 実鉄筋に見られる降伏点が明瞭に見られない、b) 弾性領域の挙動は10本の試験体ではほぼ一致しておりばらつきは少ない、c) mD22およびmD32の引張強度はほぼ等しい、d) 破断時のひずみはばらつきが大きい、e) 破断時のひずみは2.3~6%程度とJIS規定のSD295の16%に比べて小さい、f) mD41は引張強度のばらつきが大きく、他の試験体の2倍近くを示す試験体が1体あった、g) 降伏耐力はJIS規定のSD295と同程度であるが引張強度は下回る、などが挙げられる。上記のa)とe)の理由としては、鉄筋の製造方法の相違が考えられる。実鉄筋が熱間圧延によって製造されるのに対して、縮小鉄筋は冷間鍛造により製造される。冷間鍛造とは、常温で金型のプレスにより成型する方法で寸法精度に優れる。しかし、冷間鍛造のように冷間加工された鋼材では降伏点が明瞭に出ないことが多いとされている(例えば、6)。また、f)の結果は、mD41を使用する曲げ試験の結果がばらつく可能性を示している。

3.2 原型試験体の曲げ試験

Fシリーズ試験体の繰り返し荷重試験で得られた荷重-変位関係および梁弾性計算で求めた降伏荷重を図-4に示す。なお、試験における降伏点は弾性領域後に勾配

が変化する点とした。F1およびF3試験体については、降伏荷重の試験値と計算値がほぼ一致している。F2試験体では試験値が計算値を約11%上回っているものの、Fシリーズ試験体の降伏荷重の試験値と計算値は良く一致していると言える。

3.3 縮小試験体の曲げ試験

(1) 単調荷重

縮小試験体の単調荷重試験で得られた荷重-変位関係および降伏荷重計算値を図-5に示す。各シリーズとも3体の試験体の弾性領域から降伏までの荷重-変位関係はばらつきの少ない結果が得られた。S2およびS3シリーズを除けば、降伏後の挙動のばらつきも少ない。しかしながら、原型試験体と比較すると、降伏荷重は、1/7

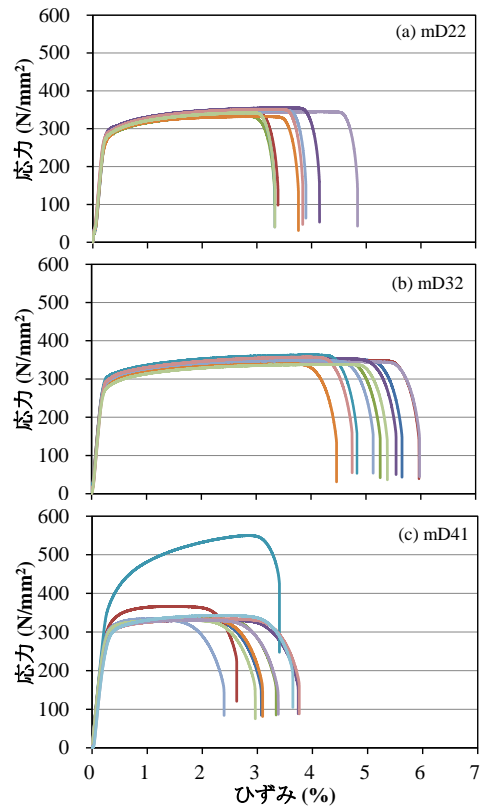


図-3 縮小鉄筋の応力-ひずみ関係

表-5 単調荷重方法

行程	荷重	制御条件	SおよびT
1	荷重	目標変位点(mm)	2
		変位速度(mm/min)	0.2
2	荷重	目標変位点(mm)	10
		変位速度(mm/min)	0.4

表-6 繰り返し荷重方法

行程	荷重	制御条件	S1	S2	S3	T1	T2	T3
1	荷重	変位点(mm)	2	2	2	1	2	2
		速度(mm/min)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
2	除荷	荷重点(kN)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
		速度(kN/min)	0.3	0.3	0.6	0.1	0.1	0.6
3	荷重	変位点(mm)	4	4	3	2	3	3
		速度(mm/min)	0.4	0.4	0.4	0.2	0.4	0.4
4	除荷	荷重点(kN)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
		速度(kN/min)	0.3	0.3	0.6	0.1	0.1	0.6
5	荷重	変位点(mm)	10	10	10	10	10	10
		速度(mm/min)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4

表-7 鉄筋の材料特性

材料	弾性係数 (GPa)	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)
D10	200*	358	498
D13	200*	349	497
mD22	165	294**	345
mD32	157	301**	349
mD41***	132	316**	337

* : 2012年制定コンクリート標準示方書

** : 0.2%耐力

*** : 図-3(c)における最大引張強度のデータを除いた平均値

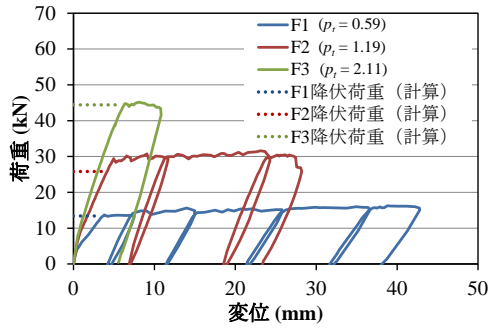


図-4 原型試験体の荷重-変位関係

スケールの S1~S3 試験体では 19.6~53.4%で平均 33.0%, 1/10 スケールの T1~T3 試験体では 1.8~24.4%で平均 15.3%も試験値の方が大きく、計算値との乖離が見られた。

図-5 に示した縮小試験体の荷重-変位関係を原型試験体の 1/1 スケールに換算した結果を図-6 に示す。ここでは、相似則より次のように換算した(例えば、香川, 1978)。原型試験体の代表寸法を l_p 、幾何学的に相似な縮

小試験体の代表寸法を l_m とすれば、縮尺を $1/\lambda$ とした時、

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{l_m}{l_p} \quad \therefore \lambda = \frac{l_p}{l_m} \quad (1)$$

と表せる。この時、縮小試験体の荷重を P_m とすれば、縮尺 1/1 の試験体の換算荷重 P_p は、

$$P_p = \lambda^2 P_m \quad (2)$$

同様に、縮小試験体の変位 δ_m の換算変位 δ_p は、

$$\delta_p = \lambda \delta_m \quad (3)$$

と表せる。ところで、表-1 に示したように原型試験体と縮小試験体とでは鉄筋比が相違しているため、式(2)の換算荷重 P_p は修正係数 k_y を用いて、

$$P_p = \lambda^2 k_y P_m \quad (4)$$

と表せる。ここでは、 k_y を梁弾性計算において縮小試験体の鉄筋比で計算した降伏荷重を P_{ym} 、原型試験体の鉄筋比で計算した降伏荷重を P_{yp} とした時、

$$k_y = \frac{P_{yp}}{P_{ym}} \quad (5)$$

とした。

S1 および T1 試験体は弾性領域から降伏後の変位 20

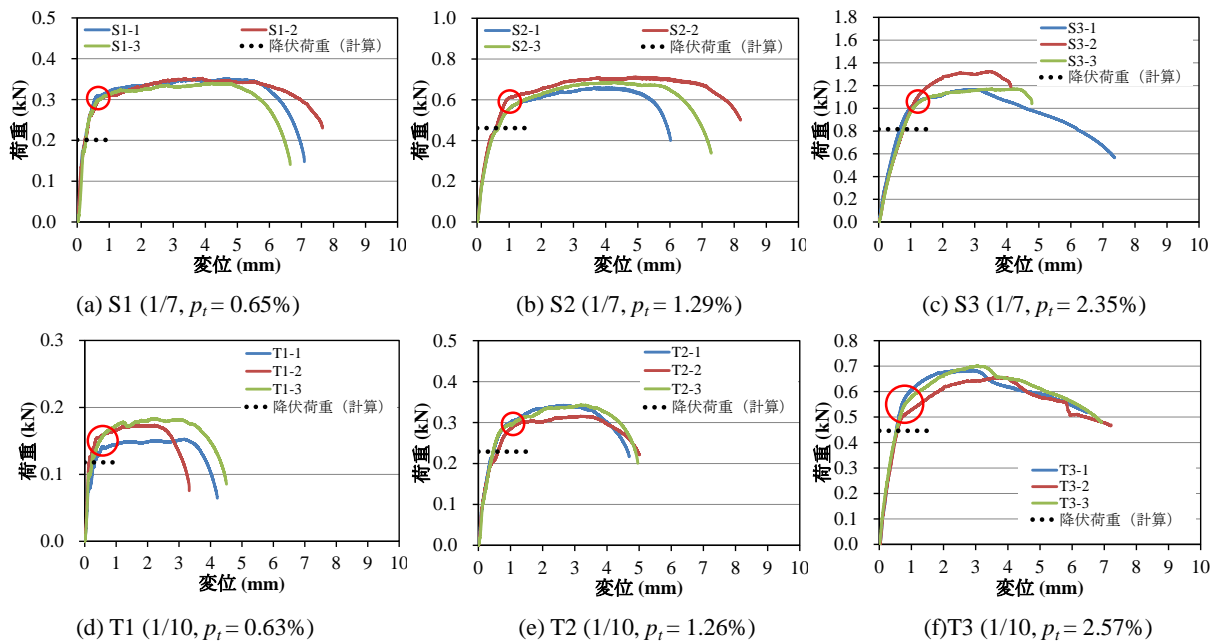


図-5 単調荷重による縮小試験体の荷重-変位関係 (赤丸は推定降伏点)

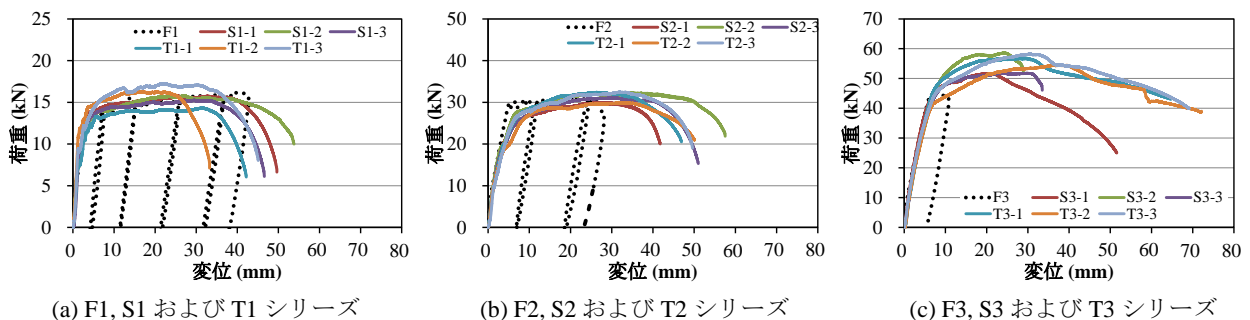


図-6 縮尺 1/1 に換算された単調荷重の荷重-変位関係

mm 程度の区間において原型試験体の荷重－変位関係と良く一致する (図-6(a))。また、S2 および T2 試験体は降伏荷重で F2 試験体を下回ることを除けば、弾性領域から降伏後の変位 30 mm 程度の区間において原型試験体の荷重－変位関係と良く一致する (図-6(b))。これらに対して、S3、T3 試験体では、弾性領域から降伏までの挙動は一致するものの降伏後の挙動は荷重、変位ともに原型試験体よりも大きく、原型試験体の挙動と大きく相違している (図-6(c))。すなわち、原型試験体における鉄筋比の増加による梁の変形の減少を再現できていない。つまり、F1、F2 のような鉄筋比が 1.2% 程度までの試験体においては縮小試験体の挙動は原型試験体の挙動をある程度再現できたが、鉄筋比が 2.1% 程度の試験体においては原型試験体より荷重、変位ともに大きくなり、挙動を再現することはできなかった。

なお、原型試験体の挙動を再現できていると考えられる低鉄筋比の試験体においても、図-5 における降伏荷重の計算値と試験値の間に乖離が見られた。縮小模型による実大構造物の挙動再現の精度を向上させるためには、

このような乖離の原因を解明し、降伏荷重の計算に反映させることが必要と考える。

(2) 繰り返し載荷

縮小試験体の繰り返し載荷試験で得られた荷重－変位関係を図-7 に、また、原型試験体の 1/1 スケールに換算した結果を図-8 に示す。原型試験体の挙動との類似性として、①除荷および再載荷過程における勾配は初期勾配と等しい、②除荷と再載荷曲線は閉じた履歴曲線を描く、③繰り返し載荷ループの終端は単調載荷曲線を包絡線とする、などが挙げられる。すなわち、縮小試験体により原型試験体の繰り返し挙動を再現可能と考えられる。

なお、図-8(c)の S3 試験体においては、荷重が大きな傾向を示している。これは、図-2 に示したように使用した縮小鉄筋 mD41 の応力-ひずみ関係のばらつきが大きいためであると考えられる。

3.4 ひび割れ発生状況

各試験体のひび割れの発生状況を図-8 に示す。縮小試験体は、a) 原型試験体と比較してひび割れ本数が少な

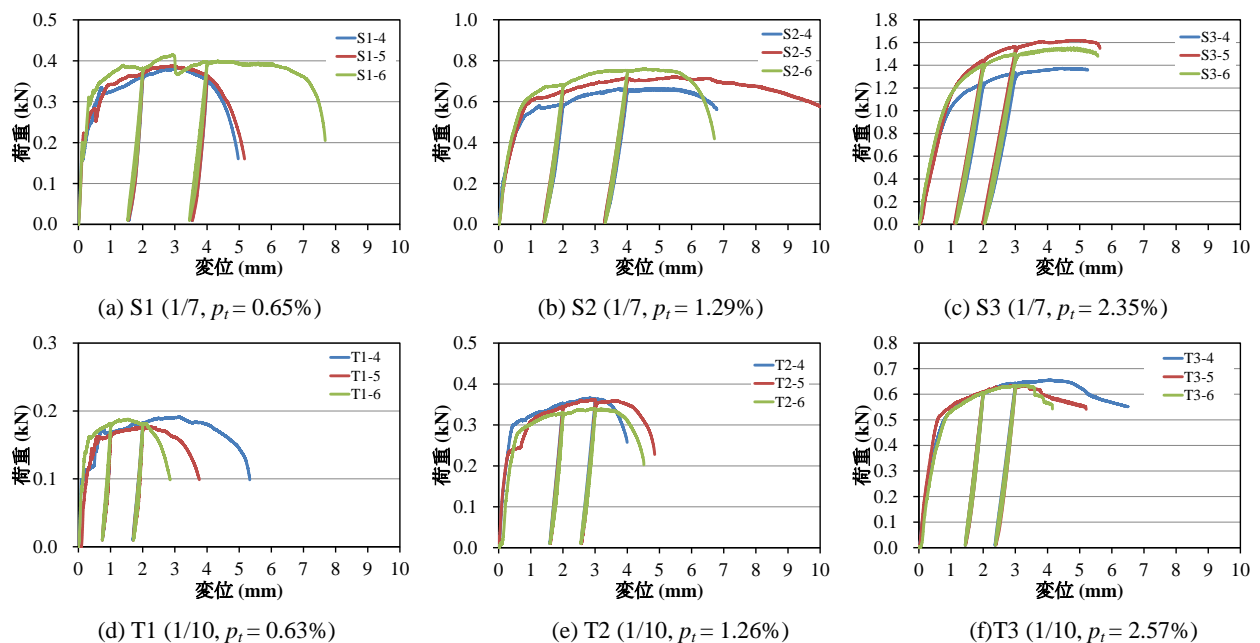


図-7 繰り返し載荷による縮小試験体の荷重－変位関係

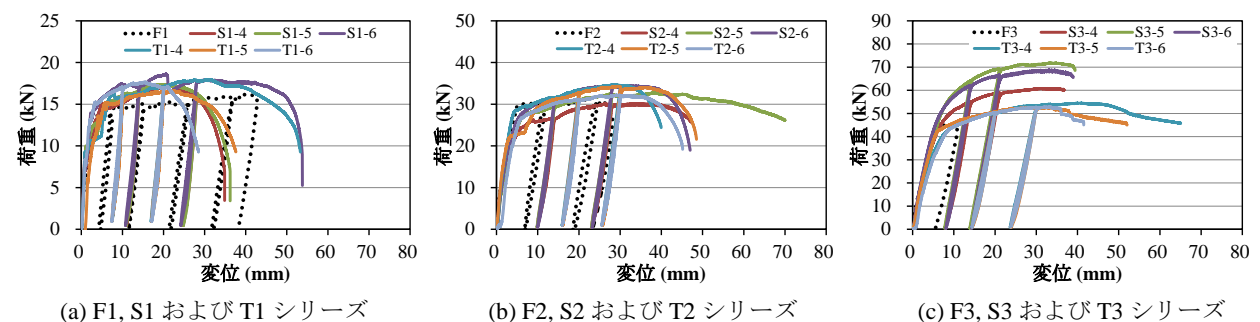


図-8 縮尺 1/1 に換算された繰り返し載荷の荷重－変位関係

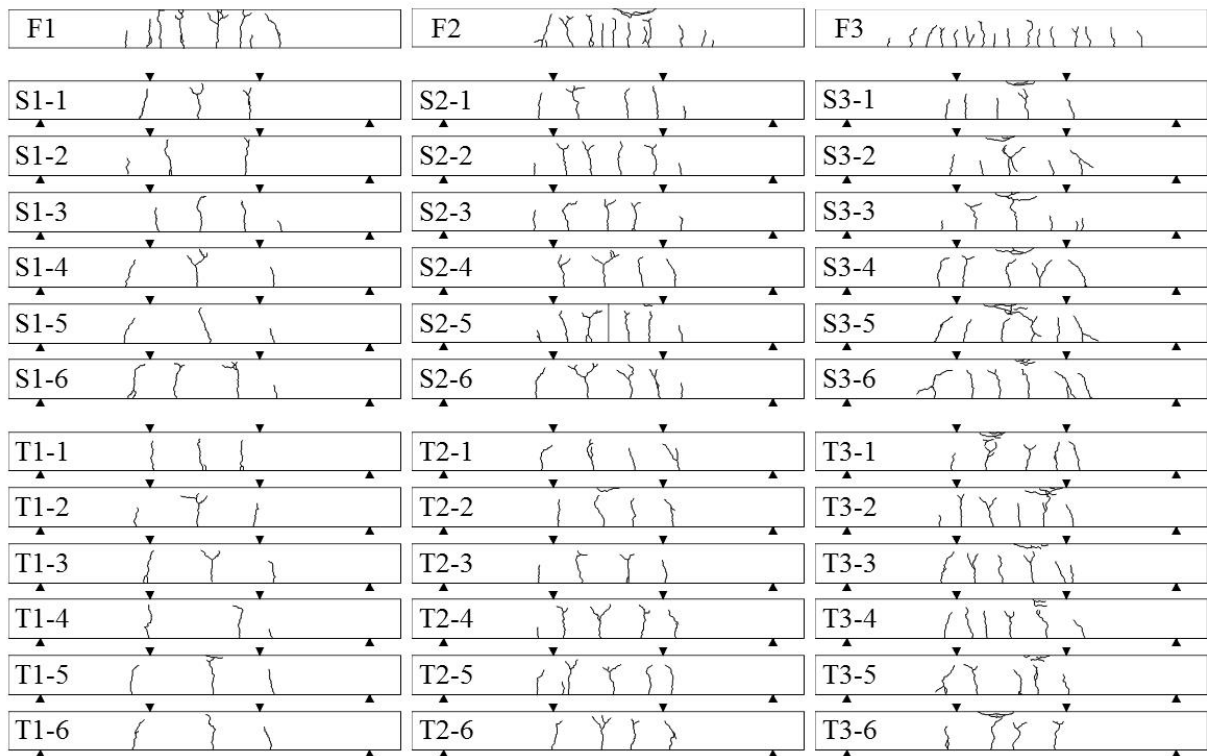


図-9 試験体のひび割れ発生状況

い、b) 原型試験体と同様に鉄筋比が大きな試験体ほどひび割れ本数が多い、c) 縮尺 1/7 縮小試験体と縮尺 1/10 縮小試験体とではひび割れ発生状況に差が見られない、などが特徴として挙げられる。a)の縮小試験体のひび割れ本数が少ない原因としては、縮小鉄筋が実鉄筋に比較して付着力が小さいためと考えられる。縮小鉄筋の付着力および縮小試験体と原型試験体のひび割れ分散性の相違については今後引き続き検討が必要と考える。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 縮小鉄筋の力学的性質は、降伏点が明瞭でないなど実鉄筋と相違する特性を有している。
- 2) 縮小鉄筋の特性により、縮小試験体の荷重-変位曲線の降伏点は明瞭ではない。
- 3) 最大荷重に至るまでの縮小試験体の曲げ挙動のばらつきは少ない。
- 4) 縮小試験体の弾性領域から降伏までの挙動は、原型試験体と良く一致する。
- 5) 1.2%程度までの低鉄筋比においては、縮小試験体で原型試験体の最大荷重までの挙動がある程度再現可能であることが示唆された。
- 6) 縮小試験体のひび割れ発生本数は、原型試験体に比較して少なく、ひび割れの分散性は小さい。
- 7) 縮尺 1/7 縮小試験体と縮尺 1/10 縮小試験体とではひび割れ発生状況に差が見られない。

参考文献

- 1) 村山八州雄, 野田進, 岩城良: 試作 D3 鉄筋を用いた縮小部材実験, コンクリート工学年次講演会講演論文集, Vol. 4, pp. 277-280, 1982.7
- 2) 隈澤文俊, 中埜良昭, 岡田恒男: 鉄筋コンクリート造超小型立体模型建物の振動破壊実験-超小型立体模型による建物の振動破壊性状に関する研究(第1報)-, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 493, pp. 83-90, 1997.3
- 3) 上田芳郎, 藤井賢志, 山内成人, 真田靖士, 中埜良昭: 偏心を有する鉄筋コンクリート造建物の縮小模型を用いた振動台実験, 生産研究, Vol. 55, No. 6, pp. 541-545, 2003
- 4) 境有紀, 徳井紀子, 真田靖士, 山内成人, 中埜良昭, 諏訪田晴彦, 福山洋: 超縮小模型を用いた鉄筋コンクリート構造の簡易振動実験手法の開発, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 584, pp. 147-152, 2004.10
- 5) 細川大介, 松土雄紀, 溝渕利明, 満木泰郎: 鉄筋コンクリート工学における卓上破壊試験の教育効果, 土木学会第 65 回年次学術講演会, pp. 13-14, 2010.9
- 6) 佐藤満次郎: 鋼材の基礎知識, コンクリート工学, Vol. 17, No. 7, pp. 7-16, 1979.7
- 7) 香川崇章: 土構造物の模型振動実験における相似則, 土木学会論文報告集, Vol. 275, pp. 69-77, 1978.7