論文 鋼製永久型枠を用いた RC 造梁部材の寸法効果に関する研究

遠藤 正美^{*1}・鈴木 裕介^{*2}・Sanjay PAREEK^{*3}

要旨:本研究では、鋼製永久型枠(PSF)を使用し、作製した RC 造梁部材の寸法効果に、PSF が及ぼす影響に ついて静的曲げ載荷試験結果から比較・検討している。実験は、2 点集中載荷で行われ、加力中に荷重、変位 及びひずみ度を連続的に測定した。結果として、PSF を用いた試験体の曲げ強度は、梁断面に対する PSF の 引張補強率(*p_{t-PSF}*)が大きく影響し、断面寸法が拡大するに連れほぼ比例関係で増加することを確認した。さら には、梁降伏時における中立軸比は、*p_{t-PSF}* が 1.0%未満になると顕著に増加する傾向が見られたが、その中立 軸を基に算出した *p_{t-PSF}* の値は、梁断面寸法と高い相関性を確認した。 **キーワード**:鋼製永久型枠、寸法効果、RC 造梁、中立軸比、PSF 補強率

1. はじめに

鉄筋コンクリート(RC)構造物のコンクリート打設時 における合板を用いた型枠工法(以下,在来工法)は,原 料となる丸太を大量に使用し、その上、数回の使用で使 い捨てる現状であることから、自然環境に悪影響を及ぼ すといった致命的な問題点が挙げられている。そのため, 在来工法に代わる新たな型枠の提案が求められている。 以上を背景に既往の研究では、コンクリート打設後, 躯 体と一体となることから RC 構造物の補強効果が期待で きる, 強度を有する鋼製永久型枠 (Permanent Steel Form, 以下, PSF)に着目し, 実験的研究を行った。その結果, PSF が縮小モデル化した矩形断面(b×D=120×200mm)RC 造梁部材の強度及び変形に及ぼす影響を明らかとしてい る¹⁾。しかし, PSF の板厚は, 作製する梁の断面寸法に関 わらず一定であるため、断面寸法が拡大するに連れ、断 面に対する PSF の補強率は低下する^{2),3)}。よって, PSF の実用化を考慮する際、実寸大に近い梁部材をはじめと する様々な梁断面寸法に対して、PSF が及ぼす構造性能 の基礎的データを提示する必要があると考える。そこで 本研究では、既往の研究で検討した RC 造梁部材(Table 2 中の Plain-2 を参照)の断面寸法及びスパンを 0.5, 1.5 及 び 2.0 倍となる様に、また、その時の各鉄筋比の誤差が 0.1%以内に収まる様に設計,施工した試験体を用いて, 静的曲げ載荷試験を行い、その実験結果から PSF が RC 造梁部材の寸法効果に及ぼす影響について比較・検討し ている。なお,本研究における寸法効果とは, RC 造梁部 材の寸法の違いに伴う PSF 補強効果の変動として述べた ものである。

Table 1 に使用した PSF の材料特性を, Photo 1 にその 形状を示す。本研究で使用する PSF は、施工の効率面か ら派生したものであり,単位質量4.8kg/m²と軽量であり, 厚さ 0.4mm と超薄型の型枠材である。また、鋼板表面に 特殊な配合を行った亜鉛めっき層が塗装されており、耐 食性に非常に優れている。並びに、25mm 間隔で折れ目 線を有しているため、型枠加工及び組立ての施工が容易 であること、更には、50mm 間隔に設けられている円状 の切れ目から,コンクリート打設の際,余剰水分のみ排 出されるといった利点を持っている。コンクリートにつ いては、後述する L=3m 及び L=4m の試験体に、既往の 研究¹⁾で検討した試験体(L=2m)同様,設計基準強度 F_c= 24N/mm²の普通コンクリートを使用した。また, L=1m の試験体にコンクリートで打設した場合,流動性が悪く, 明らかな空隙が発生しため、L=1mの試験体に限り、同 等の圧縮強度を有するセメントモルタルを使用した。各 試験体の主筋には SD295 を使用し、あばら筋には SR295 を使用した。

2.2 試験体概要

Fig.1 に在来工法で作製した試験体である Plain 及び

Table 1	Properties	of P	ermanent	Steel	Form
---------	------------	------	----------	-------	------

	-		
Weight per	Thickness	Viold Strongth	Young's
Unit Area	THICKNESS	Tield Stielight	Modulus
(kg/m^2)	(mm)	(N/mm^2)	(N/mm^2)
4.8	0.4	195	2.06×10 ⁵
25 25	25. (Unit : mm)	Transverse	al

Photo 1 Shape and Dimension of Permanent Steel Form

2. 実験概要

2.1 使用材料

*1 日本大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員) *2 日本大学大学院 工学研究科建築学専攻 博士(工学) (正会員) *3 日本大学 工学部建築学科准教授/(現)デルフト工科大 客員教授 工博(正会員) PSF を使用した試験体の配筋形状を示し, Fig.2 に断面形 状を示す。また, Fig.3 に PSF を使用した試験体形状を 示し, Table 2 に試験体諸元を示す。試験体は矩形断面 $b \times D = 60 \times 100$, 120 × 200, 180 × 300 及び 240 × 400 mm とし, 各寸法における配筋については,各鉄筋比の誤差が 0.1% 以内に収まるように設計した。各寸法及び配筋,並びに 圧縮鉄筋比($_{Sp_c}$),引張鉄筋比($_{Sp_t}$)及びあばら筋比($_{Sp_w}$) は, Table 2 中に記されている。

2.3 荷重及び測定方法

Fig.4 に載荷状況及び変位計設置位置を示す。なお、変位



(Unit:mm)

Fig.1 Re-bar Arrangement for RC Beams with PSF

計の取付位置は左右対称とする。載荷方法として, 試験 体をアムスラー型万能試験機に設置し, 試験体上面がコ ンクリートの圧壊に至るまで漸増荷重を加えた。なお, 加力中において, 荷重の測定とともに, 各荷重階におけ る各変位及びひずみ度の測定を行った。



(Unit:mm)

Fig.2 Cross - Section of RC Beams Using PSF



Fig.3 Position of Strain Gauges and Arrangement Patterns of PSF for RC Beams



Fig.4 Details of RC Beam for Flexural Strength Test set-up and Position of Displacement Meters Table 2 Identifications and Reinforcement Ratio of RC Beams for Flexural Strength Test Using PSF

Identification	D (mm)	b (mm)	d (mm)	L (mm)	Top Reinforcement	spc (%)	Bottom Reinforcement	spt (%)	Stirrup	spw (%)
Plain-1	100	60	80	1000	2-D4-SD295	0.59	2-D4-SD295	0.59	4φ-SR295@50	0.21
PSF-1	100	60	80	1000	2-D4-SD295	0.59	2-D4-SD295	0.59	4φ-SR295@50	0.21
Plain-2	200	120	175	2000	2-D10-SD295	0.68	2-D10-SD295	0.68	4φ-SR295@100	0.21
PSF-2	200	120	175	2000	2-D10-SD295	0.68	2-D10-SD295	0.68	4φ-SR295@100	0.21
Plain-3	300	180	264	3000	3-D13-SD295	0.78	3-D13-SD295	0.78	6φ-SR295@150	0.21
PSF-3	300	180	264	3000	3-D13-SD295	0.78	3-D13-SD295	0.78	6φ-SR295@150	0.21
Plain-4	400	240	350	4000	2-D19-SD295	0.68	2-D19-SD295	0.68	6φ-SR295@100	0.24
PSF-4	400	240	350	4000	2-D19-SD295	0.68	2-D19-SD295	0.68	6φ-SR295@100	0.24

3. 実験結果

3.1 強度結果

Table 3 に強度結果一覧を示す。なお,[]内には Plain との比率を示している。初期ひび割れ荷重(P_c)について, Plain1~4 ではひび割れを目視により確認できた時の値 とし, PSF を用いた試験体では目視による確認ができな いため,試験体中央における圧縮及び引張鉄筋のひずみ 度測定値を用いて,断面解析から引張側最外縁コンクリ ートの応力度を算出し,その応力度が Plain 試験体の初 期ひび割れ発生時における引張側最外縁コンクリート応 力度に達した時の値とした。また,降伏荷重については, 試験体中央の引張鉄筋が降伏した時の値とした。

PSFを用いた試験体は、Plainと比較し、初期ひび割れ荷 重(P_c)で1.25~1.73倍、降伏荷重(P_y)で1.95~6.68倍、及 び最大荷重(P_{max})で1.72~4.30倍を示し、いずれの寸法に おいても各耐力の上昇が確認された。寸法別に比較する と、P_y及びP_{max}の値では梁幅及び梁せいが小さくなるに 連れ、Plainと比較した上昇率が高くなっているが、P_c の値に関しては、断面寸法の大きさに比例して、Plainか らの上昇率が高くなる傾向が見られた。前者については、 寸法が小さくなることで、断面に対する PSF の補強率が 上昇するため、高応力下ではその影響が顕著に表れてい ると、容易に推察されるが、後者については、次節に記 す曲げ剛性から検討する。

3.2 曲げ剛性

Table 4 及び Fig.5 に各試験体の各種剛性(Primary, Secondary, Tertiary Stiffness)を示す。表中の各剛性は後述 する荷重-変形曲線の割線勾配として算出し,初期剛性 (Primary)は加力開始から初期ひび割れ発生まで,2 次剛 性(Secondary)は初期ひび割れ発生から引張鉄筋降伏まで, 3 次剛性(Tertiary)は引張鉄筋降伏から最大荷重までの割 線勾配とした。

PSFを使用した試験体を Plain と比較すると,初期剛性では 1.26~2.60 倍, 2 次剛性では 1.27~4.61 倍,並びに 3



Fig.5 Stiffness of RC Beams Using PSF

	Initial C	rack Load	Yiel	d Load	Maximum Load P _{max} (kN)	
Identification	P _c	(k N)	P_y	(k N)		
Plain-1	2.16	[1.00]	5.56	[1.00]	8.00	[1.00]
PSF-1	2.73	[1.26]	31.01	[5.58]	34.43	[4.30]
Plain-2	9.77	[1.00]	26.10	[1.00]	31.07	[1.00]
PSF-2	12.25	[1.25]	73.15	[2.80]	87.85	[2.83]
Plain-3	23.28	[1.00]	67.27	[1.00]	83.94	[1.00]
PSF-3	36.27	[1.56]	131.23	[1.95]	168.60	[2.01]
Plain-4	29.04	[1.00]	100.10	[1.00]	128.78	[1.00]
PSF-4	50.24	[1.73]	171.66	[1.71]	221.65	[1.72]
					[]:Rati	io to Plain

Table 3 Results of RC Beams Tested for Flexural Strength Using PSF

Table 4 Stiffness of RC Beams Using PSF

Type of Specimen	Primary Stiffness (kN/mm)		Secondar (kN	ry Stiffness //mm)	Tertiary Stiffness (kN/mm)	
Plain-1	6.10	[1.00]	1.75	[1.00]	0.14	[1.00]
PSF-1	7.71	[1.26]	8.17	[4.66]	0.75	[5.32]
Plain-2	21.71	[1.00]	5.14	[1.00]	0.21	[1.00]
PSF-2	43.15	[1.99]	6.55	[1.27]	0.82	[3.91]
Plain-3	16.39	[1.00]	7.74	[1.00]	0.33	[1.00]
PSF-3	42.67	[2.60]	14.52	[1.88]	1.79	[5.42]
Plain-4	26.76	[1.00]	8.05	[1.00]	0.60	[1.00]
PSF-4	50.25	[1.88]	14.98	[1.86]	2.53	[4.21]

[]:Ratio to Plain

次剛性では,3.91~5.42 倍という結果が得られた。寸法 別に比較すると,L=2~4mの試験体では3次剛性におい て Plainの約4倍以上と著しい上昇が見られたことに対 し,L=1mの試験体では2次剛性から4.66倍の値を示し ている。以上の事は,L=1m試験体の断面に対する PSF の補強率が過多であったことによって鉄筋降伏以前から PSF に付加される応力が過大になったためと考えられる。

3.3 荷重-たわみ関係及び破壊挙動

Fig.6 に荷重(P) ーたわみ(δ)曲線を示す。たわみは,梁 中央に設置した変位計から測定された値を用いた。図中 の▲は各試験体の初期ひび割れ発生点,●は引張主筋降 伏点を示し,★はコンクリート上面の圧壊発生点を示し ている。また,Photo 2 に PSF の破断時の写真を示す。

PSF を用いた試験体は,鉄筋が降伏するまで高い剛性 を維持し,降伏後も耐力が緩やかに上昇し続け,最大荷 重を示した。最大荷重に達すると同時に,PSF が引張側 から破断し,PSF の破断の進展とともに,耐力は除々に 低下した。また,さらに変形が進行されると,梁上面の コンクリートが圧壊し,終局に至った。以上までに記し た,PSF と比較した際の降伏までの耐力及び剛性の伸び, 降伏後の耐力上昇とその後の耐力劣化については,寸法 の違いによる大差は見られなかった。しかし,コンクリ ート上面の圧壊発生(終局)時におけるたわみ量をPlain と 比較した値では,各寸法での違いが確認される。その詳 細として,L=1m の試験体では,Plain-1 のたわみ量が 28mm であるのに対し, PSF-1 は 16mm と, その誤差は 43%, L=2m の試験体では, Plain-2 のたわみ量が 28mm であるのに対し, PSF-2 は 32mm と, その誤差は 13%で ある。同様に, L=3m では終局時のたわみ量の誤差が 9%, L=4m の試験体では 4%と, 寸法が大きくなるに連れ, そ の誤差が小さくなる傾向が見られた。以上の事は, PSF の引張補強率が影響しているためと容易に推察できる。 試験体断面が小さくなれば, PSF 引張補強率が増大する ため圧縮側断面領域が小さくなり, 圧縮縁に過大な応力 が集中する。特に, L=1m の試験体では, 梁断面に対す る PSF の引張補強率が過多となったため, Plain に比べ, 早期の圧壊発生に至ったものと考えられる。



Photo 2 Tearing Failure of PSF



Fig.6 Load (P)-Deflection (δ) Curves of RC Beams Tested for Flexural Strength Using PSF

4. PSF 補強 RC 梁の寸法効果

4.1. 曲げ応力度(σ_b) - たわみ角(R) 関係

本節では、寸法の違いによる PSF の補強効果をより明確に検討するため、各試験体の荷重及び変位を断面寸法及びスパンのパラメータで基準化し、曲げ応力度(σ_b)ーたわみ角(R)関係から考察する。なお、曲げ応力度(σ_b)は梁中央の曲げモーメントを断面係数で除すことで算出し、たわみ角(R)は梁中央のたわみを載荷・支点間距離で除すことで算出した²。これまで、在来工法による RC造梁部材の寸法効果として、断面寸法が拡大するに連れ強度が低下すること、並びに、寸法を変化させても終局たわみ角には影響しないことなどが報告されている^{3),4),5),6,7}。本論文においても、各試験体の最大曲げ応力度及び終局たわみ角に着目し、考察を行う。

Fig.7にPlainの曲げ応力度(*σ_b*)-たわみ角(*R*)曲線を示す。 なお,図中の▲は初期ひび割れ発生点,●は引張鉄筋降 伏点及び≭は圧壊発生点を示している。本研究における在 来工法 Plain では,引張鉄筋比に多少の誤差があるため, 引張鉄筋比が高いもの程,最大曲げ応力度(*σ_{b-max}*)が大き い値を示している。並びに,一般的に同一補強筋比下に おける RC 梁部材は寸法が大きくなるに連れ施工性とと もに強度が低下すると考えられるが, Plain-2 及び Plain-4 の圧壊時強度の比較では寸法の大きい Plain-4 が上回っ ている。以上の事から,本研究における試験体は,寸法 が大きくなることによる施工性及びそれに伴う強度の 低下を抑制することができたと考えられる。一方,終局 たわみ角の値については,既往の研究結果と同様,寸法 の違いによる差異は見られなかった。 Fig.8 に PSF の曲げ応力度(*σ_b*)ーたわみ角(*R*)曲線を示 す。PSF を用いた試験体では、寸法が小さくなるに連れ、 梁主筋降伏時及び最大曲げ応力度が上昇する結果が得 られた。一方、終局たわみ角の値については、Plain と同 様、寸法の違いによる大差は見られなかった。曲げ応力 度の結果については、当初の想定通り、PSF の補強率が 影響していることは明白である。よって次節では、梁断 面に対する PSF の補強率について検討・考察する。

4.2 梁断面に対する PSF 補強率の検討

Table 5 に PSF の中立軸及び引張側補強率を示す。表中の中立軸長さは,試験体中央に貼付けたひずみケージ(Fig.1 及び Fig.3 内に示すコンクリート上面,圧縮及び引張鉄筋,並びに PSF 側面における 3 点)の測定値から,鉄筋降伏時の断面ひずみ度分布を作成し,その分布から算出した。並びに,表中の PSF の引張補強率(*p_{t-PSF}*)は,以上で得た鉄筋降伏時の中立軸位置を考慮し,中立軸位置から下側の PSF の断面のみを引張側として算出した値である。Fig.9 に中立軸比(*x_n*)と PSF 補強率(*p_{t-PSF}*)の関係を,Fig.10 に中立軸比と引張側 PSF と引張主筋を合算した補強率(*p_t*)との関係を示す。

本研究の降伏時における x_{nl} と p_{rPSF}の関係を検討する と、本実験における PSF-1 から PSF-3 までの断面寸法で あれば、梁断面が大きくなるに連れ中立軸比が徐々に増 加し、その増加幅は小さなものである。しかし、PSF-4 になると中立軸比が PSF-3 に比べ約 0.1 上昇するため、 *L*=4m 試験体以上のより実寸大に近い梁部材を用いた更 なる実験的研究が必要と考えられる。しかし、これらの 中立軸比を考慮して算出している p_{tPSF} の値のみ(Table5



Table 5 Identifications, Reinforcement Details and Neutral Axis Ratios of RC Beams Using PSF

Type of Specimen	d (mm)	x _n (mm)	<i>x</i> _{n1} (-)	p t-PSF (%)		s p t (%)	p _t (%)
PSF-1	80	25.00	0.31	2.53	[1.00]	0.59	3.12
PSF-2	153	50.00	0.33	1.27	[0.50]	0.68	1.95
PSF-3	264	91.00	0.34	0.86	[0.34]	0.78	1.64
PSF-4	350	155.00	0.44	0.66	[0.26]	0.68	1.34

[]:Ratio to PSF-1





参照)に着目すると,梁断面寸法が大きくなるに連れ,その値が 1/2, 1/3, 1/4 になるといった高い相関性が確認された。

Fig.11 に最大曲げ応力度(σ_{b-max}) と PSF 補強率(p_{t-PSF})の 関係を示す。図に示す様に、 p_{t-PSF} の増加とともに、 σ_{b-max} がほぼ比例的に上昇するといった関係が認められる。し かし、本研究のみでは、試験体数及びパターンが限られ ているため、今後より多くの実験試料(特に、 p_{t-PSF} =0.5 ~1.0%)を提示することで、さらなる精細なデータを示す 必要がある。

5. 結論

本研究から得られた知見を以下に示す。

- (1) PSF を用いた試験体は、実寸大に近い寸法において も、Plainと比較して著しい耐力及び剛性上昇が得ら れることを確認した。
- (2) PSFを用いた試験体は、寸法が小さくなるに連れ、 PSF 引張補強率が増大するため、Plain に比べて小さいたわみ量でコンクリートの圧壊を生じることを確認した。
- (3) PSF を用いた試験体の曲げ強度は, PSF の引張補強 率に大きく影響され,本研究における試験体のみの 評価では,ほぼ比例関係で増加することが確認され た。
- (4) PSFを用いた試験体の梁降伏時における中立軸比は、 *p_{t-PSF} が約* 1.0%未満になると、顕著に増加する傾向 が見られたが、その中立軸を基に算出した *p_{t-PSF} の* 値は、梁断面寸法と高い相関係が確認された。
- (5) 今後, *p_{t-PSF}*=0.5~1.0%の範囲となる断面を有した梁 部材の実験試料を提示する必要性があると考えら れる。



Fig.11 Maximum Bending Stress (σ_{b-max}) vs. Tensile PSF Ratio $(p_{t,PSF})$

参考文献

- 寺田 健一郎, Sanjay PAREEK:鋼製永久型枠を用 いた RC 梁部材の力学特性に関する基礎的研究,コ ンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.1651-1656, 2009.7
- 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算基準書・ 同解説 - 許容応力度設計法, pp.106-116, 1999
- 寺井雅和:大断面 RC 基礎部材と寸法効果,福山大 学工学部紀要第,30巻,pp.85-94,2006.12
- 4) 日本コンクリート工学協会:破壊力学の応用研究委員会報告書, pp.141-171, 1993
- Bazant, Z. P., Planas, J: Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials, CRC Press pp.616, 1998
- 6) 楠 浩一,古市 耕輔:鉄筋コンクリートはりの曲 げ挙動に関する寸法効果の影響,コンクリート工学 年次論文集, Vol.37, No.2, pp.35-38, 1999.2
- 7) 桐生博也,中西三和,安達洋:曲げ破壊する鉄筋コンクリート造梁の寸法効果に関する研究,コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.325-308, 2004.2