

UFC材を用いたはり部材の終局曲げ耐力に関する実験研究

生産工 木田哲量 阿部忠 澤野利章

1. はじめに

本研究は、UFC はりの力学特性の解明においては、既往の研究⁴⁾に用いた供試体の一部と、新たに高さの異なる2タイプの供試体を追加製作して5タイプのはり部材を用いた UFC はりの力学特性の解明においては 静荷重実験、 走行一定荷重実験を行い、実験耐荷力、破壊状況から走行一定荷重が静的曲げ耐力に及ぼす影響を検証する。また、静荷重と走行一定荷重が作用する UFC はりの終局耐荷力と実験耐荷力との整合性を検証し、UFC 部材の合理的な設計法の一助とするものである。

2. UFCはりの寸法

UFC はり供試体の寸法は、全長 1200mm、支間長 1000mm、幅 100mm、はり高は 100mm から 25mm 単位で高くし、最大 200mm までとした。供試体の名称は、はり高 100mm をタイプ、125mm をタイプ、150mm をタイプ、175mm をタイプ、200mm をタイプ とする。ここで、供試体の材料特性値を Table 1、寸法を Fig. 1 に示す。

Table 1 Characteristics of materials.

Specimen	Compressive strength (N/mm ²)	Flexural strength (N/mm ²)	Young's modulus (kN/mm ²)
-S-1, -CR-1, -S-1,2, -CR-1,2, -S-1,2, -CR-1,2, -S-1, -CR-1	196	28.3	55.0
-S-2, -CR-2, -S-1,2, -CR-1,2, -S-2, -CR-2	209	30.8	55.0

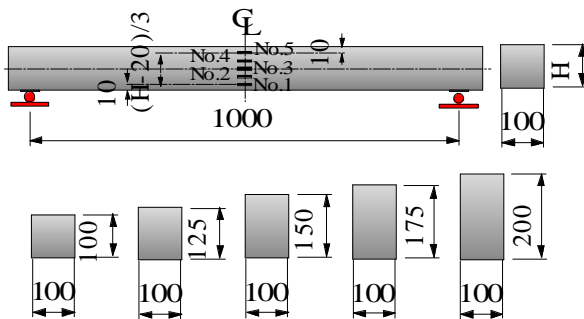


Fig. 1 Specimen size.

3. 実験方法

3.1 静荷重実験方法(S)

静荷重実験は、最大曲げ応力が生じる支間中央に車輪を停止した状態の実験である。荷重の載荷方法は、荷重制御により 5.0kN ずつ増加し、変位が著しく増大した後は 2.5kN ずつ増加する。静荷重実験における供試体記号を S とする。

3.2 走行一定荷重実験(CR)

走行一定荷重実験は、UFC はりの支点 A に車輪を停止し、支点 A から支点 B を折り返す 1 往復を連続走行させる載荷である。本実験における走行速度は 1 往復 2.0m を 9.0sec で走行する 0.22m/s とした。荷重の大きさは、1 走行ごとに 5.0kN ずつ増加させ、走行中に変位が著しく増大した後は 2.5kN ずつ増加させる段階荷重とした。走行一定荷重実験における供試体記号を CR とする。

4. 実験結果および考察

4.1 実験耐荷力

静荷重実験および走行一定実験における最大耐荷力および破壊モードを Table 2 に示す。走行一定荷重による最大耐荷力とは、輪荷重が一往復走行を維持した最大荷重とする。また、最大耐荷力はロードセルから検出した荷重とする。

静荷重実験の場合の最大耐荷力の平均値は、タイプ、,、,、, でそれぞれ 21.8kN、29.5kN、45.6kN、58.5kN、78.8kN となった。各タイプの最大耐荷力ははり高さに比例してほぼ線形的に増大している。また、走行一定荷重実験の最大耐荷力の平均値はタイプ、,、,、, でそれぞれ 21.6kN、29.3kN、43.6kN、56.5kN、76.6kN である。走行一定荷重実験の供試体の破壊位置は異なるものの、最大耐荷力は断面の高さに比例して線形的に増大している。静荷重実験と走行一定荷重実験の最大耐荷力を比較すると、静荷重実験に比して走行一定荷重実験の場合の耐荷力比はタイプ が 0.99、タイプ が 0.99、タイプ が 0.96、

Experimental research on the ultimate bending moment capacity of ultra high strength steel fiber reinforced concrete beams

by

Tetsukazu KIDA, Tadashi ABE and Toshiaki SAWANO

Table 2 Load-carrying capacity of UFC beam.

供試体	引張強度 N/mm ²	最大耐力(kN)		耐力力比 CR or R/S	破壊 モード
		実験値	平均値		
-S-1	28.3	20.3	21.8	-	曲げ破壊 曲げ破壊
-S-2	30.8	23.2			
-S-1	28.3	28.4	29.5	-	曲げ破壊 曲げ破壊
-S-2		30.5			
-S-1	30.8	45.8	45.6	-	曲げ破壊 曲げ破壊
-S-2		45.3			
-S-1	28.3	61.6	58.5	-	曲げ破壊 曲げ破壊
-S-2		55.3			
-S-1	28.3	77.3	78.8	-	曲げ破壊 曲げ破壊
-S-2	30.8	80.2			
-CR-1	28.3	20.6	21.6	0.99	曲げ破壊 曲げ破壊
-CR-2	30.8	22.5			
-CR-1	28.3	30.8	29.3	0.99	曲げ破壊 曲げ破壊
-CR-2		27.7			
-CR-1	30.8	44.8	43.6	0.96	曲げ破壊 曲げ破壊
-CR-2		42.3			
-CR-1	28.3	55.3	56.5	0.97	曲げ破壊 曲げ破壊
-CR-2		57.7			
-CR-1	28.3	75.4	76.6	0.97	曲げ破壊 曲げ破壊
-CR-2	30.8	77.8			

タイプ, S: 静荷重実験, CR: 走行一定荷重実験, 1, 2: 供試体番号

タイプ および が 0.97 となり, 走行一定荷重が作用することにより最大で 4%の耐力力の低下がみられる。筆者ら⁷⁾は, RC はりに走行一定荷重が作用した場合の耐力力の低下率を報告している。これによると最大で 10 %耐力力が低下している。したがって, UFC 材材は RC はりに比して低下率が低いことから走行荷重が作用する道路橋, 鉄道, 滑走路などにも有効な構造材料であると考えられる。

4.2 断面のひずみ分布および中立軸

本実験における供試体の中央側面のひずみから中立軸の位置を得ることとする。よって, 本実験におけるはり高とひずみの関係の一例(タイプ ,)をFig. 2に示す。ひずみゲージの貼り付け位置は Fig. 1 より, 供試体の下縁から 10mm, 上縁から 10mm の位置と, その間に 3 点 (H-20)/3, H: はり高(mm))の合計 5 点とした。中立軸 x の位置は, Fig. 2 より, ひずみが 0 になる位置を中立軸 x とする。すなわち, Fig.1に示した計測点 No. 5 の圧縮ひずみと計測点 No. 4 の引張ひずみを用いて補間法により算出する。

静荷重実験における中立軸の位置は, 供試体 -S-1 の場合, Fig. 2(1), 1)に示すように, 荷重 10kN でははりの図心軸付近であるが, 荷重の増加に伴って上縁方向へ移動している。これは荷重の増加にともなってひび割れが上縁方向に進展し, 中立軸が上昇している。終局時では上縁から 19.7mm の位置となり, はり高 H との比は 0.19 である。同様にタイプ , の場合もFig. 2(2), 1), (3), 1)に示すように荷重の増加に伴って中立軸の位置は上縁方向へ移動している。よって, 静荷重実験におけるタイプ ~ の中立軸の位置を中立軸 x とはり高 H の関係として Fig. 3に示す。

走行一定荷重における中立軸の位置は, 供試

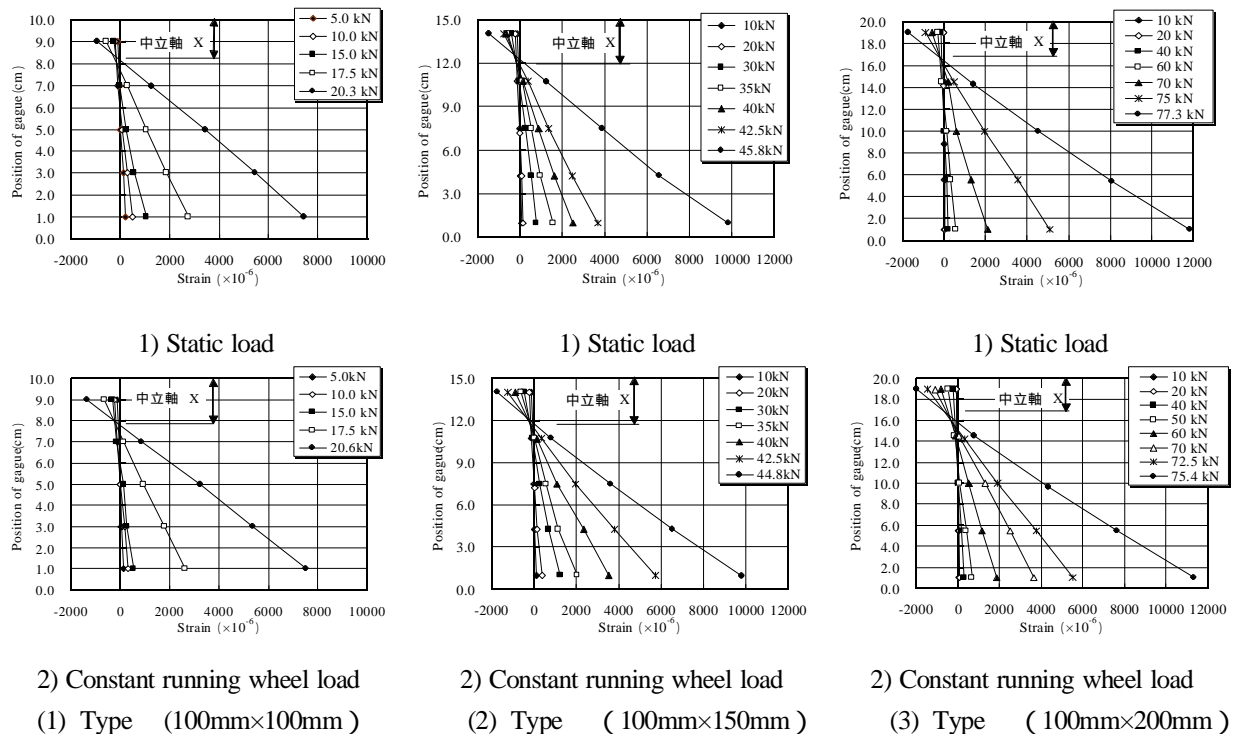


Fig. 2 Relationship between height of beam and strain

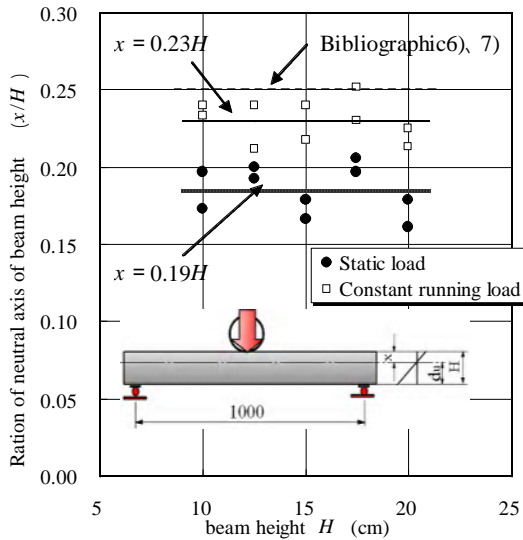


Fig. 3 Relationship between neutral

体 -CR-1 が荷重 10kN の場合ではりの図心軸付近である。終局時のはり高 H との比は 0.22 である。よって、走行一定荷重実験の場合のタイプ ~ の中立軸の位置を中立軸 x とはり高 H の関係として Fig. 3 に併記した。走行一定荷重実験の場合の中立軸とはり高 H との比の平均値は 0.23 である。静荷重実験の場合と走行一定荷重実験の場合とを比較すると、走行一定荷重の場合が、やや下回っている。

繊維補強コンクリートはりの中立軸に関する既往の研究では、Edgington⁸⁾ は、鋼繊維で補強した場合の静荷重実験における中立軸の位置は、はり高 H に対して $0.20H$ であるが、安全性を考慮して $0.25H$ としている。また、秋浜ら⁶⁾ は炭素繊維で補強したはりの静的実験における中立軸の位置は、 $0.25H$ として理論解析している。両者と本実験の中立軸の位置を比較すると、本供試体の中立軸の位置はやや上縁側にあるものの概ね近似している。よって、終局曲げ耐力の算出には本実験より得た中立軸 x を適用して終局曲げ耐力および終局耐力を算出する。

5. 終局曲げ耐力および終局耐力

5.1 繊維補強コンクリートの曲げ応力分布

UFC はりの抵抗曲げモーメントに関しては Hannant⁵⁾ や秋浜ら⁶⁾ が曲げ応力分布を提案している。両者ともに UFC はりは、荷重増加とともに応力はほぼ直線的に上昇する弾性挙動を示し、その後の荷重の増加に伴いひび割れ発生応力に達するとひび割れが発生する。この時、配合された繊維がひび割れと交差することによって応力が伝達される。すなわち、

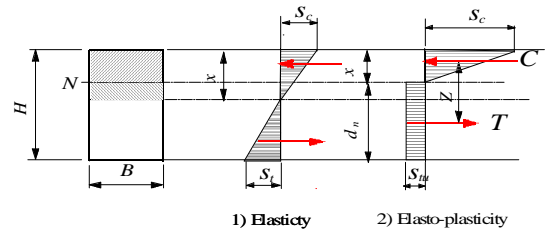


Fig. 4 Bending stress distribution

Table 3 Ultimate bending strength and Maximum load

specimen	x/H	Tensile strength (Nmm ²)	Test Maximum load (kN)	Ultimate bending strength		Theory load (kN)	Load ratio	
				Experiment (N·m)	Theory (N·m)			
-S-1	0.19	10.33	20.3	5075	4505	18.0	1.13	
-S-2		11.30	23.2	5800	4942	19.8	1.17	
-S-1		10.33	28.4	7100	7088	28.2	1.01	
-S-2		10.33	30.5	7625	7088	28.2	1.08	
-S-1		11.30	45.8	11450	11119	44.5	1.03	
-S-2		11.30	45.3	11325	11119	44.5	1.02	
-S-1		10.33	61.6	15400	13795	55.2	1.12	
-S-2		10.33	55.3	13825	13795	55.2	1.00	
-S-1		10.33	77.3	19325	18018	72.1	1.07	
-S-2		11.30	80.2	20050	19767	79.1	1.01	
-CR-1		0.23	10.33	20.6	5150	4713	18.9	1.09
-CR-2			10.33	22.5	5625	4713	18.9	1.19
-CR-1	10.33		30.8	7700	6712	26.8	1.15	
-CR-2	10.33		27.7	6925	6712	26.8	1.03	
-CR-1	11.30		44.8	11200	10604	42.4	1.06	
-CR-2	11.30		42.3	10575	10604	42.4	1.00	
-CR-1	10.33		55.3	13825	13156	52.6	1.05	
-CR-2	10.33		57.7	14425	13156	52.6	1.10	
-CR-1	10.33		75.4	18850	17184	68.7	1.10	
-CR-2	11.30		77.8	19450	18852	75.4	1.03	

架橋効果により耐力が維持される。その後の荷重増加においても架橋効果によりひび割れ発生後も応力が增大するが完全塑性状態となる。これらの影響を考慮して簡易弾塑性モデルが提案された。ここで、Hannant が提案する曲げ応力分布を Fig. 4 に示す。

5.2 本実験における終局曲げ耐力式

本実験供試体の場合の曲げ応力分布は、Fig. 2 に示すように、中立軸 x は初期荷重時でははり高の $0.5H$ 付近であるが、終局時には、静荷重実験の場合がはり高の $0.19H$ 、走行一定荷重実験の場合は $0.23H$ の位置であり、圧縮域は完全弾性状態の応力分布状態となり、また中立軸から下縁は完全塑性状態を示している。したがって、終局曲げ耐力の算出においては Fig. 4 に示した簡易弾塑性モデルに、本実験から得た中立軸 x とはり高 H との比を中立軸係数として適用する。また、中立軸の位置までの塑性域には UFC の引張強度 f_t を適用する。よって、UFC はりの終局曲げ耐力は式(1)として与えられる。

$$M_u = f_t \cdot B \cdot D \left(\frac{2}{3} - \frac{D}{6} \right) H^2 \quad (1)$$

$$D = 1 - \kappa \cdot H \quad \text{or} \quad D = d_u / H$$

ここで、 f_t ：引張強度(N/mm²)、 B ：はり幅(mm)、 H ：はり高(mm)、 D ：中立軸から下縁までの距離とはり高との比、 κ ：中立軸 x とはり高 H との比(静荷重実験： $\kappa = 0.19$ 、走行荷重実験： $\kappa = 0.23$)、 d_u ：下縁から中立軸までの距離(= $H - x$ (mm))

終局曲げ耐力式(1)に適用する引張応力 f_t には、超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)⁹⁾に示されている曲げ強度 f_b と引張軟化曲線による引張強度 f_t の関係より算出する。

5.3 終局耐力： P_u

本実験における終局耐力の算出は、式(1)より得た終局曲げ耐力 M_u より、単純ばりに輪荷重が集中荷重として作用した場合として算出する。よって、終局耐力は式(2)として与えられる。

$$P_u = M_u \cdot 4/L \quad (2)$$

ここで、 P_u ：終局耐力、 M_u ：終局曲げ耐力、 L ：支間

5.4 終局曲げ耐力および終局耐力

本実験供試体の終局曲げ耐力(式(1))および終局耐力(式(2))をTable 3に示す。

静荷重実験における終局耐力と実験最大耐力を比較すると、供試体 -S-1, 2 の場合は実験値が理論値の 1.13, 1.17 倍となり、実験値がやや上回っている。また、タイプ , , の場合は近似する結果となった。

走行一定荷重実験の場合は供試体 -CR-2, -CR-2 が 1.19, 1.15 倍となり実験値がやや上回っているものの、タイプ , , の供試体は概ね理論値と実験値が近似している。よって、UFC はりの設計曲げ耐力の算出においては、材料係数および部材係数を適用することによってより安全な設計が可能となる。

6. まとめ

本供試体は高強度セメント系マトリックスを高強度鋼繊維で補強したコンクリートであることから、初期ひび割れ発生後も鋼繊維の架橋効果が顕著に現れ、はり高に比例して耐力も線形的に増加している。

UFC はりの静的耐力に対して走行一定荷重の耐力比は最大で 0.96 となり、走行一定荷重が作用した場合に 4 %の低下となったが、鋼繊維の架橋効果により大幅な低下がみられない。したがって、

UFC 材は走行荷重が作用する構造物にも有効な構造材料である。

終局曲げ耐力式に適用する UFC はりの中立軸 x の位置は、静荷重の場合 0.19 H 、走行一定荷重の場合が 0.23 H となった。

弾塑性力学モデルに本実験の中立軸の位置および UFC の引張強度を適用することにより実験値と理論値が良く近似した。

参考文献

- 1) 社団法人日本コンクリート工学協会：高靱性セメント複合材料を知る・作る・使う、高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会報告書、2002
- 2) 下山善秀、鷓澤正美：ダクタルの特性と応用分野、太平洋セメント研究報告、No.142、pp. 55-62 (2002)
- 3) 畑秀彦、木田哲量、阿部忠、水口和彦：反応性粉体コンクリートの力学特性に関する実験研究、セメント・コンクリート論文集、No. 58、pp. 448-453(2004)
- 4) Tetsukazu KIDA, Kazuhiko MINAKUCHI, Tadashi ABE, Toshiaki SAWANO, and Makoto KATAGIRI : Experimental Study on Mechanical Properties of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Beam, THEORETICAL AND APPLIED MECHANICS JAPAN, Vol. 55, pp. 73-83(2006)
- 5) Hannat, D. J., : The effect of post cracking ductility on the flexural strength of fiber cement and fiber concrete, Fiber-reinforced Cement and Concrete, RILEM Symposium, Volume 2, Construction Press Ltd., 1975, pp. 499-508.
- 6) 秋浜繁幸、末永龍夫、坂野正：炭素繊維を用いたセメント系複合体(CFRC)の力学的性質に関する実験的研究、コンクリート工学、Vol 2, No.8, pp75-84 (1982)
- 7) Tadashi ABE, Tetsukazu KIDA, Toshiaki SAWANO, Masaaki HOSHINO, Kiyoshi KATO: Flexural Load-Carrying Capacity and Failure Mechanism of RC Beams with Low Effective Depth under Running Wheel-Load, MATERIALS SCIENCE RESEARCH INTERNATIONAL, Vol.7, No.3, pp.186-193(2001)
- 8) Edgington, J., : Steel-fiber reinforced concrete, *PhD Thesis*, University of Surrey, 1973.
- 9) 土木学会・超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)、丸善(株)、2004.9