

論文 超高強度コンクリートを用いた RC 梁のせん断性状

武田 亮祐*1・睦好 宏史*2・浅本 晋吾*3・渡邊 光*4

要旨：本研究では、160N/mm²を超える超高強度コンクリートの材料特性がせん断耐力に及ぼす影響を明らかにするため RC 梁のせん断載荷実験を行った。その結果、超高強度コンクリートの RC 梁では収縮ひずみを低減させても斜めひび割れ発生荷重が増加しない傾向を示した。その原因としてコンクリートの引張強度と圧縮強度の比は圧縮強度が大きくなるほど小さくなること、軟化域での応力負担の低下、骨材の噛み合わせ効果の減少等が収縮低減効果よりも大きいことが判明した。また修正圧縮場理論に基づいた解析により、軟化域でのせん断抵抗分を考慮することにより、斜めひび割れ発生荷重を精度良く推定することが可能となった。

キーワード：超高強度コンクリート、収縮ひずみ、引張軟化、斜めひび割れ発生荷重

1. はじめに

近年、セメントや混和剤、分散剤の高性能化などにより設計基準強度が 100N/mm²以上の超高強度コンクリートの製造が比較的容易になっている。鉄筋コンクリート（以下 RC）部材に超高強度コンクリートを使用することにより構造部材の縮小化やそれに伴う軽量化の実現が可能となり、特にプレストレストコンクリート（以下 PC）技術と組み合わせることで合理的な構造形式を実現できることが期待されている。しかし、こうした超高強度コンクリートを用いた部材の破壊性状やひび割れ特性はいまだ十分に解明されていない。特に超高強度コンクリートのせん断性状は現状不明な点も多く、既往の

研究では実験結果をもとに斜めひび割れ発生荷重の算定式が提案されており、多くのものが圧縮強度 130 N/mm²以下である。また、近年では高強度コンクリートの収縮や破壊力学に着目している研究¹⁾も行われている。本研究では超高強度コンクリート（120 N/mm²～160 N/mm²程度）を用いた RC 梁のせん断載荷実験を行い、せん断性状に及ぼす材料特性（引張強度、自己収縮、破壊エネルギー等）の影響を明らかにしたものである。

表-1 骨材の特性

記号	細骨材			粗骨材			
	種類	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	種類	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	最大寸法 (mm)
硬質砂岩	砕砂	2.63	1.02	碎石	2.65	0.56	20
安山岩	砕砂	2.61	2.85	碎石	2.61	2.74	20

表-2 コンクリート配合

配合名	W/B (%)	Air (%)	W (kg/m ³)	Gvol (L/m ³)	骨材	単位量 (kg/m ³)				EX (kg/m ³)	SP (kg/m ³)	DA (kg/m ³)
						W	C	S	G			
HA120	20.0	1.5	155	300	硬質砂岩	155	775	703	792	0	11.63	0.78
LA120	20.0	1.5	155	300	硬質砂岩	155	745	706	792	30	11.63	0.78
HA160	17.0	1.5	155	300	硬質砂岩	155	912	592	792	0	14.59	0.91
LA160	17.0	1.5	155	300	硬質砂岩	155	877	592	792	35	14.59	0.91
HSA160	17.0	1.5	155	300	安山岩	155	912	611	783	0	14.59	0.91

SFC：シリカフェーム混合セメント，EX：早強性石灰系膨張材
SP：高性能減衰剤，DA：アルコール系消泡剤

*1 埼玉大学大学院 理工学研究科 環境システム工学系専攻 (正会員)
*2 埼玉大学大学院 理工学研究科 環境科学・社会基盤部門教授 工博 (正会員)
*3 埼玉大学大学院 理工学研究科 環境科学・社会基盤部門助教 博士 (工学) (正会員)
*4 埼玉大学大学院 理工学研究科 環境システム工学系専攻

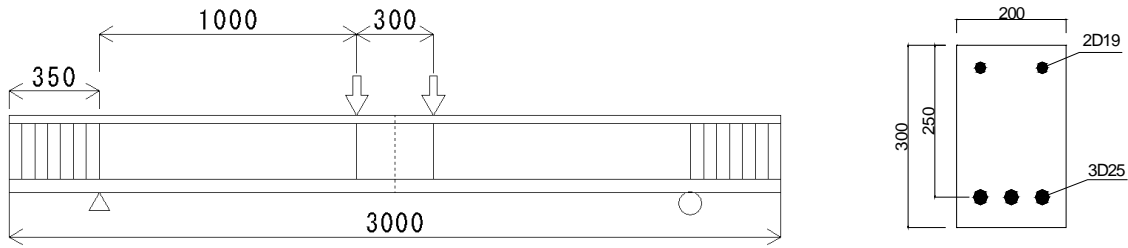


図-1 供試体の形状寸法 (単位 : mm)

表-3 実験要因

供試体名	f'_c (N/mm ²)	a/d	鉄筋		せん断強度に及ぼす影響の検討項目
			圧縮鉄筋	引張鉄筋	
HA-120	120	4	2D19	3D25	・収縮の大小 (膨張剤の有無)
LA-120	120	4			
HA-160	160	4			
LA-160	160	4			
HSA-160	160	4			・収縮の大小 (膨張剤の有無) ・骨材の種類 (硬質砂岩と安山岩)

表-4 使用材料 (鉄筋)

鉄筋名	記号の種類	D (mm)	A_s (mm ²)	f_y (N/mm ²)	E_s (kN/mm ²)
D6	SD345	6	31.7	360.6	187.5
D19		19.1	286.5	384.1	199.7
D25	USD685B	25.4	506.7	720	201

2. RC 梁のせん断荷重実験

2.1 実験概要

(1) 使用材料および供試体の概要

使用したコンクリートは、圧縮強度 $f'_c = 120$, 160 N/mm^2 のコンクリートであり、表-1 に骨材の特性、表-2 にコンクリートの配合を示す。超高強度コンクリートに用いたセメントは低熱ポルトランドセメントにシリカフェュームを10%混合した混合セメントで、高性能減水剤、消泡剤を混和剤として使用した。高性能水剤、消泡剤は内割りで水に混和した。せん断強度への収縮ひずみの影響を明らかにするために、収縮量の異なる二種類の供試体を作製した。自己収縮を制御していない供試体 HA (High Autogenous shrinkage) と、膨張剤を用いて自己収縮を低減した供試体 LA (Low Autogenous shrinkage) である。また高強度用骨材である安山岩を用いた供試体 HSA (High Strength Aggregate) も作製した。表-3 に実験要因を示す。

本研究で用いた供試体の形状寸法を図-1 に示す。供試体は幅 200mm、高さ 300mm、長さ 3000mm の矩形断面で、せん断スパン内にはせん断補強筋を配置していない。また、せん断スパン比 $a/d=4$ とすることで斜め引張破壊を先行させた。実験で使用した鉄筋の材料特性を表-4 に示す。供試体は乾燥させないよう十分な湿潤養生を行い、荷重直前までコンクリートひずみ、引張鉄筋ひずみを計測した。また無筋コンクリート供試体 (100mm × 100mm × 400mm) を各条件で作製し、自由収縮ひずみを計測した。

(2) 荷重方法および計測項目

荷重方法は油圧ジャッキによる単調荷重であり、5kN ごとに測定した。計測項目はコンクリート打設から荷重直前までの自由収縮ひずみと軸方向鉄筋ひずみの経時変化であり、荷重実験では図-1 に示すように、RC 梁の各点のたわみ、鉄筋ひずみ、コンクリートひずみについて行った。

荷重時までの収縮・膨張ひずみは、無筋コンクリート供試体および梁ともにスパン中央の断面中央に設置した埋め込み型ひずみゲージにより計測した。

破壊エネルギー試験は、日本コンクリート工学協会の「プレーンコンクリートの破壊エネルギー試験法 (案)」²⁾ に準じて行った。

表-5 荷重直前のコンクリート特性

供試体名	圧縮強度 (f'_c) (N/mm ²)	引張強度 (f_t) (N/mm ²)	ヤング係数 (E_c) (kN/mm ²)	破壊エネルギー (G_f) (N/mm)	収縮・膨張ひずみ		
					無筋コンクリート供試体	コンクリート (梁)	引張鉄筋 (梁)
HA120	138.2	7.2	39.4	0.234	-94	-122	-94
LA120	155.0	8.3	41.0	0.280	-114	28	-50
HA160	183.0	7.4	43.5	0.271	-454	-255	-180
LA160	175.0	8.5	44.7	0.259	-182	32	-53
HSA160	163.8	7.6	44.2	0.195	-484	-202	-136

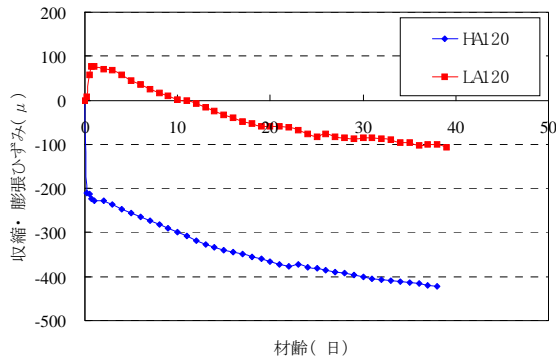


図-2 無筋コンクリート供試体のひずみ

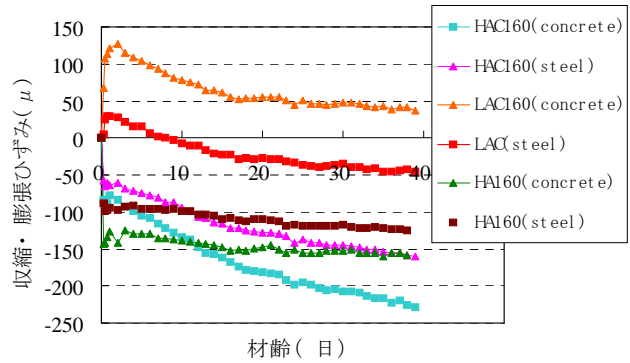


図-3 梁におけるコンクリート・鉄筋のひずみ

2.2 実験結果

(1) 超高強度コンクリートの材料特性

載荷直前のコンクリートの圧縮強度(f'_c), 引張強度(f_t), ヤング係数(E_c)および収縮ひずみ(ϵ_{sh})を表-5に示す。また, $f'_c=160\text{N/mm}^2$ シリーズの無筋コンクリート供試体から得られた打込み直後からのコンクリートひずみの経時変化を図-2に, RC梁のコンクリートひずみと引張鉄筋ひずみを図-3に示す。表-5より, コンクリートの引張強度についてLAシリーズはHA, HSAシリーズに比べて大きくなっている。また, ヤング率は圧縮強度の増加に伴って増加した。破壊エネルギーにおいてはHSA160が他の供試体に比べて小さくなっている。これは骨材の種類によるものと考えられるが, 本研究ではその原因を追究できておらず, 今後詳細な考察が必要である。

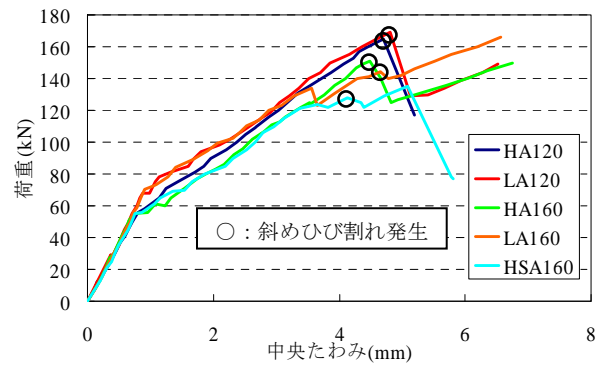
図-2, 図-3より, HAシリーズでは若材齢時に自己収縮に起因した収縮ひずみが発生するのに対して, LAシリーズでは, 膨張剤の混和により材齢初期に膨張挙動を示し, ピーク値に達した後は徐々に収縮が進行した。その結果RC梁の引張鉄筋にもHAシリーズとLAシリーズでは大きなひずみ差が生じた。

(2) RC梁のせん断破壊性状

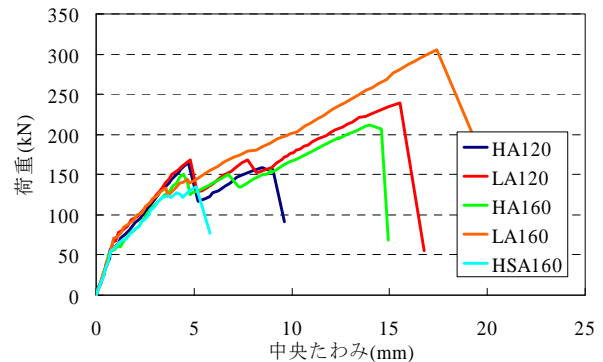
図-4(1)は斜めひび割れ発生時までの荷重-変位曲線を, 図-4(2)は斜めひび割れ発生から終局時に至る荷重-変位曲線を示したものである。斜めひび割れ発生荷重は目視による確認と明確な荷重低下が生じたことを確認し, 決定した。また, 表-6にせん断破壊形態と耐力を示している。表-6には2009年度の著者らが行った同様の梁の実験結果³⁾も追記している。表-6において, 本研究では斜めひび割れ時に明確な荷重低下を生じたものを斜め引張破壊とし, 斜めひび割れ発生後も荷重が増加して最終的に圧縮部のコンクリートの圧壊により破壊に至ったものをせん断圧縮破壊と定義している。

(3) 収縮の影響

表-6より, LAシリーズにおいて曲げひび割れ発生荷



(1) 斜めひび割れ発生時



(2) 終局状態時

図-4 荷重と梁中央たわみ関係

重と終局耐力は収縮を低減していないHAシリーズに比べて増加している。LAシリーズの曲げひび割れ発生荷重がHAシリーズに比べて増加したのは, 収縮低減により, 梁にかかる収縮応力が小さくなったためである。また, LAシリーズの終局耐力がHAシリーズに比べて増加したのは, 収縮低減によって鉄筋周辺のコンクリートに発生する微細ひび割れが発生しにくくなり, 斜めひび割れが発生した後も圧縮鉄筋および引張鉄筋に沿ったひび割れが進展し難い状況となり, ダウエル効果や圧縮部コンクリートのせん断抵抗により, 終局耐力が向上したと考えられる。既往の研究ではW/B=0.15の超高強度コンクリートを用いたRC供試体において, 鉄筋周辺のコンクリートに自己収縮による微細ひび割れが発見されたという報告⁴⁾がある。

表-6 破壊荷重および破壊形態

供試体名	f'_c (N/mm ²)	f_t (N/mm ²)	曲げひび割れ発生荷重 (kN)	斜めひび割れ発生荷重 (kN)	終局耐力 (kN)	破壊形態
HA120	138.2	7.2	58	164.9	164.9	斜め引張破壊
LA120	155	8.4	69	169.9	240.8	せん断圧縮破壊
HA160	183	7.4	57	149.9	210.9	せん断圧縮破壊
LA160	175	8.8	74.5	134.1	305.8	せん断圧縮破壊
HSA160	163.8	7.5	59	127.9	134.9	斜め引張破壊
S-40-4	36	3.4	41	153.9	153.9	斜め引張破壊
S-80-4	114	6.9	53	170.9	170.9	斜め引張破壊
S160-4	181	7.4	57	151.9	151.9	斜め引張破壊

しかし、表-6 より斜めひび割れ発生荷重について本研究においては収縮の影響がほとんどみられない結果となっている。この原因の一つとして、斜めひび割れ発生荷重に直接関係するコンクリート引張強度 (f_t) と圧縮強度 (f'_c) の比 α ($=f_t/f'_c$) は f'_c が大きくなるほど小さくなること⁵⁾が挙げられる。図-5 に f_t/f'_c と荷重の関係を示す。図-5 には著者らが 2009 年度に行った実験結果も併せて示しており、この図から超高強度コンクリートでは圧縮強度が増大したとしても、 f_t/f'_c は増加せず、逆に減少する。これが斜めひび割れ発生荷重が増大しない原因であると考えられる。圧縮強度 $f'_c=120\sim 160\text{N/mm}^2$ の超高強度コンクリートでは収縮の有無が斜めひび割れ発生荷重に与える影響は小さいと推測される。

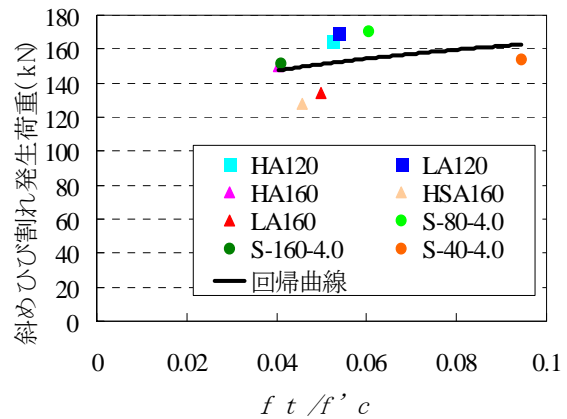


図-5 f_t/f'_c と荷重の関係

(4) 骨材の影響

写真-1 に梁の斜めひび割れの断面の一例を示す。斜めひび割れ発生荷重の大きい HA120 では斜めひび割れの形状が粗く、骨材の噛み合わせ効果が推定できる。一方、圧縮強度の大きい LA160, HSA160 においては斜めひび割れが平滑であり、骨材の噛み合わせ効果が HA120 に比べて減少しているのは顕著である。また、HSA160 は高強度用骨材を用いているが、セメントペーストマトリックスの付着、強度が高いため、LA160 の骨材と同様にひび割れ面で骨材が割れたため LA160 と大きな違いが見られなかった。

(5) ひび割れの進展状況

図-6 に HA160, HSA160, LA160 の斜めひび割れ発生直前のひび割れ進展状況を、図-7 に収縮を低減した LA シリーズのひび割れ進展状況を示している。

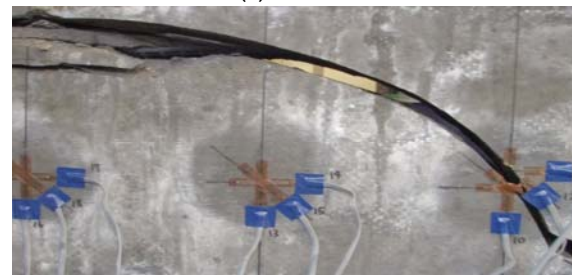
図-6 より、同一荷重時の 160 シリーズでは曲げおよび曲げせん断ひび割れが供試体の同じ高さまで進展している。また著者らの研究により、超高強度コンクリートはひび割れが脆性的に進展するため、初期の曲げひび割れ幅が大きくなる事が判っている⁶⁾。超高強度コンクリートではひび割れの進展により応力の開放が早くなり、それによって超高強度コンクリートではひび割れ先端部の軟化域での応力負担が低下し、中立軸深さの減少による圧縮部コンクリートによるせん断抵抗の低下



(1) HA120



(2) LA160



(3) HSA160

写真-1 160 シリーズの斜めひび割れ断面状況

や軟化域でのせん断抵抗の低下により斜めひび割れ発生荷重が増加しないことが推測される。

また図-7においては圧縮強度が小さいLA120は圧縮強度の大きいLA160よりも同一荷重時でのひび割れ進展が遅く、ひび割れの進展性からひび割れ先端部の軟化域での応力負担が増加し、圧縮部コンクリートによるせん断抵抗や軟化域でのせん断抵抗が増加し、結果的にLA160よりも斜めひび割れ発生荷重が大きくなったといえる。

ひび割れ先端部の軟化域の応力負担は、 f_i/f'_c と深い相関関係にあると考えられるため、今後超高強度コンクリートの両引き試験等を行い、高強度・超高強度コンクリートの軟化域を明らかにして、せん断伝達モデルや、せん断強度の定量的評価を検討し、普通強度～超高強度コンクリートまで網羅する斜めひび割れ発生強度を明らかにしていく必要があると考えられる。

3. 解析的検討

3.1 修正圧縮場理論

本研究では超高強度コンクリートを用いたRC梁部材のせん断性状を明らかにするため修正圧縮場理論⁷⁾(Modified Compression Field Theory)に基づいて、斜めひび割れ発生荷重の検討を行った。

修正圧縮場理論とは、斜めひび割れを有する一様なRC要素としてとらえ、要素内に働くひずみ・応力を平均的に取り扱うことで、せん断問題を合理的に取り扱う手法である。修正圧縮場理論は表-7の3つの関係を解くことにより、釣り合い条件を満たすRC要素状態を収束計算から求め、ひび割れ発生から破壊に至るまでのせん断耐力機構を合理的に算出することができる。

3.2 解析結果

(1) せん断破壊状況

図-8に解析結果の一例と実験結果から得られた荷重-梁中央たわみ関係を示す。ここで修正圧縮場理論による解析にはひび割れ先端部の軟化域での応力負担分を入力するTension Stiff Factorが存在し、この数値が大きいと応力負担分が大きくなり、逆に小さくなると応力負担分は小さくなる。本研究ではこの数値を実験では得ないため、実験結果と考察を基に解析を行った。また解析には本研究で得られたコンクリートおよび鉄筋材料

表-7 修正圧縮場理論の条件式

	条件式
1	せん断補強筋および主鉄筋方向の力の釣り合い条件
2	変形の適合条件
3	コンクリートおよび鉄筋の材料構成則

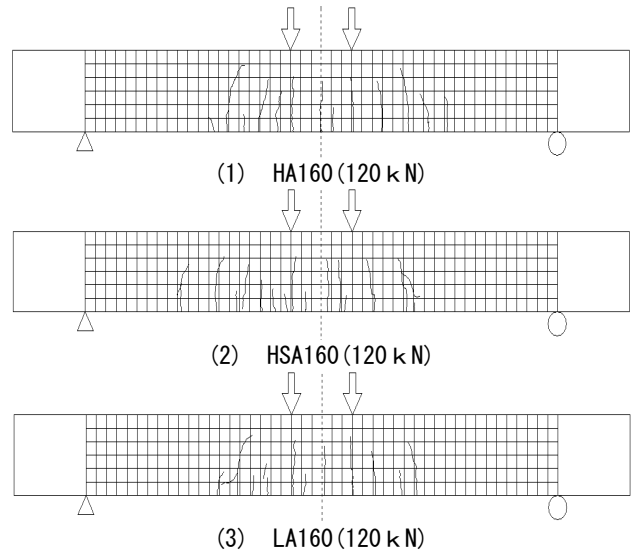


図-6 斜めひび割れ発生直前のひび割れ進展状況 160 シリーズ (載荷時の荷重)

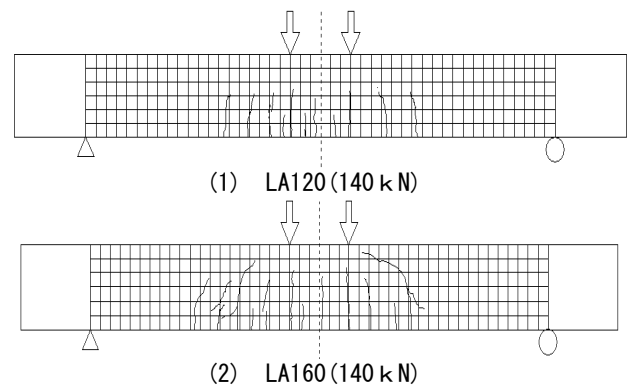


図-7 斜めひび割れ発生直前のひび割れ進展状況 LA シリーズ (載荷時の荷重)

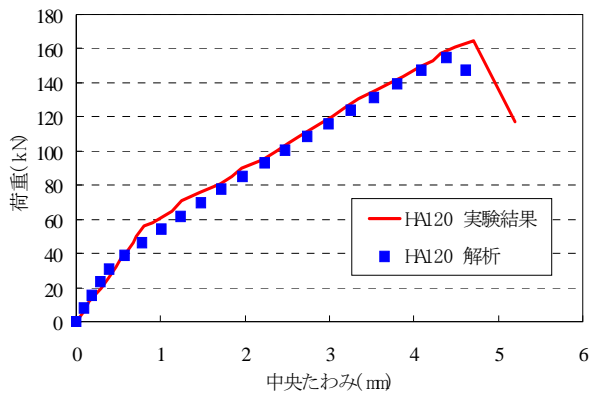
構成則を入力し、載荷直前の収縮膨張ひずみも入力した。

図-8(1)、(2)ともに解析結果は、載荷から破壊に至るまで比較的精度良く実験結果を表している。しかし、本研究の解析ではひび割れ先端部の軟化域での応力負担分を表すTension Stiff Factorを実験から得ていないため、今後超高強度コンクリートを用いた両引き試験を行い、各々のコンクリートに合ったTension Stiff Factorを算出し、解析していく必要がある。

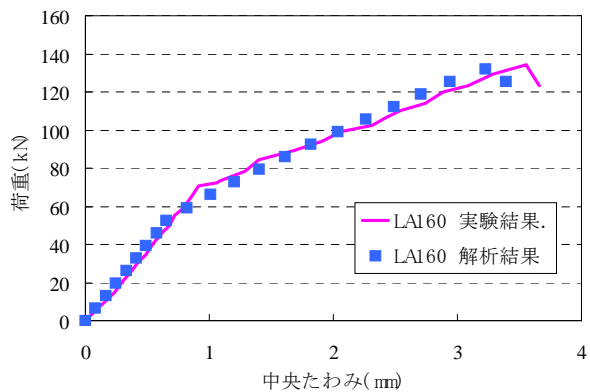
また、表-8に本研究で作成した梁の斜めひび割れ発生荷重の実測値と解析結果、また解析で用いたTension Stiff Factorの数値を示す。表-8から $f'_c=160\text{N/mm}^2$ シリーズは $f'_c=120\text{N/mm}^2$ シリーズに比べて、Tension Stiff Factorの値が小さくなる傾向があり、実験結果から考察されたように、超高強度コンクリートではひび割れ先端部の軟化域での応力負担が低下し、その影響が収縮低減効果よりも大きくなるために収縮を低減したり、圧縮強度を大きくしても斜めひび割れ発生荷重が増加しない傾向が解析的にも示唆された。

表-8 斜めひび割れ発生荷重の実測値と解析値および Tension Stiff Factor 値

供試体名	①斜めひび割れ発生荷重 (kN)	②解析による斜めひび割れ発生荷重 (kN)	①/②	Tension Stiff Factor
HA120	164.9	154.8	1.07	0.4
LA120	169.9	180.1	0.94	0.4
HA160	149.9	156.1	0.96	0.4
LA160	134.1	132.1	1.01	0.2
HSA160	127.9	138.3	0.92	0.3



(1) HA120



(2) HA120

図-8 解析結果と実験結果の比較

4.まとめ

圧縮強度 $f'_c=120, 160\text{N/mm}^2$ の高強度・超高強度コンクリートを用いた RC 梁の荷重実験を行い、コンクリートの材料特性がせん断性状に及ぼす影響について以下のことが明らかとなった。

- (1) 超高強度コンクリートでは収縮を低減すると、終局耐力は増加するが、斜めひび割れ発生荷重においては増加しない傾向がみられた。その理由の一つとして、超高強度コンクリートでは引張強度と圧縮強度の比が普通強度・高強度コンクリートに比べて小さくなることが挙げられる。
- (2) 異なる種類の骨材を超高強度コンクリートの RC 梁

に適用しても、ひび割れが骨材を貫通して進展するため、ひび割れ表面が平滑になり、骨材が斜めひび割れ発生荷重に与える影響は小さい。

- (3) 超高強度コンクリートは曲げ・曲げせん断ひび割れがより早く進展し、ひび割れ先端部の軟化域での応力負担が低下し、圧縮部コンクリートによるせん断抵抗や軟化域でのせん断抵抗の低下につながる。修正圧縮場理論を用いた解析により、ひび割れ先端部の軟化域での応力負担分を考慮することで超高強度コンクリートの斜めひび割れ発生荷重を精度良く追従できた。また今後超高強度コンクリートの軟化域を考慮した斜めひび割れ算定式の検討を行う必要性がある。

参考文献

- 1) 河金 甲, 佐藤良一: 高強度 RC はりの斜めひび割れ発生強度に及ぼす収縮の影響評価, 土木学会論文集, Vol.65, No.2, pp.178-197, 2009.4
- 2) 日本コンクリート工学協会: コンクリートの破壊特性の試験方法に関する調査研究委員会報告書, 2001
- 3) S.V.T.J.Prera, Lam Huu Ouang, Hiroshi Mutsuyoshi, Ha Minh: Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams Using High-Strength Concrete, proceedings of JCI, Vol.31, No.2, pp.589-594, July 2009
- 4) 丸山一平, 亀田昭一, 鈴木雅博, 佐藤良一: RC プリズムにおける自己収縮による微細ひびわれ発生と収縮応力挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.587-592, 2006.
- 5) 日本コンクリート工学協会: 高強度コンクリート構造物の構造性能研究委員会報告書・論文集, 2006.7
- 6) 前川敦: 高強度コンクリートを用いた RC および PRC 部材の曲げ・せん断性状に関する研究, 埼玉大学修士学位論文, 2008
- 7) Evan C. Bentz: Sectional Analysis of Reinforced Concrete Members, PhD dissertation, 1 Dept. Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, Canada, 2000