

# 論文 超高強度材料を用いた腹鉄筋のない RC はり部材のせん断特性に関する研究

伊藤堅生\*1・阿部祐規\*2・松原一実\*3・鈴木基行\*4

**要旨:** 超高強度コンクリートおよび超高強度鉄筋を用いたせん断補強鉄筋のない RC はり部材のせん断特性評価を目的として実験を行った。その結果、同じせん断スパン比でも、有効高さや引張鉄筋比の値により破壊形態が変化することが分かった。また、既往のひびわれモデルや破壊エネルギー算定手法を用いた FEM 解析を行い、超高強度材料を用いた RC 部材のせん断特性評価への適用性を検討した。解析の結果、せん断耐力に関しては破壊モードに関わらず、十分な精度で実験値を評価できることが分かった。

**キーワード:** 超高強度材料, せん断破壊形態, 有効高さ, 引張鉄筋比, 有限要素解析

## 1. はじめに

高強度コンクリートおよび高強度鉄筋を使用した RC 部材は、部材断面の縮小やそれに伴う部材の軽量化、施工の省力化等が期待される。

しかし、材料が高強度化するほど終局時の挙動はより脆性的になるなど、このような材料を用いた RC 部材の力学的特性は、十分な検討を必要とする。特にせん断破壊に至る過程は、多くの要因に左右され、複雑であることから、超高強度材料を用いた RC 部材のせん断耐力を正しく評価するための実験資料を収集しなければならない。さらに、近年著しい発展を遂げた破壊力学を用いた有限要素解析手法の超高強度 RC 部材への適用性も検討する必要がある。

そこで、超高強度材料を用いた RC 部材の合理的な設計法を確立するための基礎的資料を得ることを目的に、コンクリート圧縮強度 100MPa 以上、鉄筋降伏強度 700MPa 程度の材料を用いた腹鉄筋のない RC はり部材のせん断特性について実験的、解析的検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験供試体の諸元

実験供試体の形状図とその諸元をそれぞれ図-1および表-1に示す。なお、表-1には、著者ら

により本実験と同一条件で過去に行った実験時の供試体も併記している。供試体の片側には腹鉄筋を十分配筋し、他方(試験区間)でせん断破壊が生じるようにした。各供試体の断面幅は 200mm、引張鉄筋中心から供試体底面までは 50mm、支点からはり端部までの張り出し長さは 200mm で統一した。変動因子は、コンクリートの目標圧縮強度 ( $f'_{cd}$ )、有効高さ ( $d$ )、せん断スパン比 ( $a/d$ )、引張鉄筋比 ( $\rho_t$ ) とし、それぞれ  $f'_{cd}$ : 30 ~ 120MPa,  $d$ : 150, 350, 600mm,  $a/d$ : 2.0, 2.5, 3.0, 4.0,  $\rho_t$ : 0.54 ~ 2.17% の範囲である。なお、表-1中の供試体番号は順にコンクリート圧縮強度 (L,N,M,H,U)、有効高さ (S,M,L)、せん断スパン比 (20,25,30,40)、引張鉄筋比 (A,B,D,E) をそれぞれ表している。

### 2.2 材料の諸元

本実験で用いた超高強度コンクリートは普通ポルトランドセメントに混和材料としてシリカフューム、AE 剤、減水剤を使用し、粗骨材の最大寸法を 20mm とした。圧縮試験および引張割裂試験によって得られた各供試体のコンクリート圧縮強度 ( $f'_c$ ) と引張強度 ( $f_t$ ) を表-1に示した。使用した引張鉄筋は SD685 であり、各径の弾性係数 ( $E_s$ )、降伏強度 ( $f_y$ )、降伏ひずみ ( $\epsilon_y$ )、引張強度 ( $f_b$ ) を表-2に示した。

\*1 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻(正会員)

\*2 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻(正会員)

\*3 オリエンタル建設(株)東北支店工務部設計チーム

\*4 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 工博(正会員)

表-1 供試体諸元

供試体 番号	$f'_c$ (MPa)	$f_t$ (MPa)	$a/d$	$d$ (mm)	$\rho_t$ (%)	供試体 番号	$f'_c$ (MPa)	$f_t$ (MPa)	$a/d$	$d$ (mm)	$\rho_t$ (%)
MS25D	88.6	4.91	2.5	150	1.27	HM25E	111	6.14	2.5	350	2.17
MS30D	88.6	4.91	3.0	150	1.27	LM30D	38.1	2.70	3.0	350	1.23
LM20D	38.1	2.70	2.0	350	1.23	NM30D	70.7	4.03	3.0	350	1.23
NM20D	70.7	4.03	2.0	350	1.23	MM30D	91.3	5.36	3.0	350	1.23
MM20D	87.8	5.95	2.0	350	1.23	HM30D	115	4.72	3.0	350	1.23
HM20D	115	4.72	2.0	350	1.23	MM30A	90.1	5.42	3.0	350	0.54
UM20D	125	9.40	2.0	350	1.23	HM30B	103	6.73	3.0	350	0.85
MM25D	91.3	5.36	2.5	350	1.23	HM30E	111	6.14	3.0	350	2.17
HM25A	118	6.10	2.5	350	0.54	MM40D	87.8	5.95	4.0	350	1.23
HM25B	118	6.10	2.5	350	0.85	HL25D	111	6.14	2.5	600	1.27
HM25D	115	4.72	2.5	350	1.23	HL30D	117	7.88	3.0	600	1.27

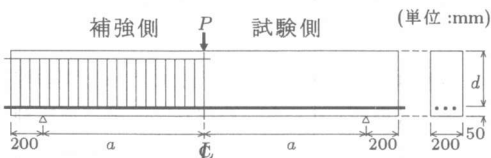


図-1 供試体形状図

### 2.3 載荷方法および測定項目

載荷は、図-1に示すようにスパン中央1点載荷とし、荷重制御により静的単調載荷で行った。測定項目としては、スパン中央での変位、荷重、引張鉄筋のひずみ、圧縮部コンクリートのひずみを測定し、あわせてひびわれ状況を観察した。

### 3. 実験結果および考察

せん断破壊は、斜めひびわれの発生した直後に終局に至る斜め引張破壊と、斜めひびわれの発生後もタイドアーチ的な耐荷機構の形成により、さらに大きな荷重に耐えるせん断圧縮破壊に大別される。本実験においてもこの二つの破壊形態が主に観察された。その他に、斜めひびわれが発生した後、載荷点付近のコンクリートが圧縮破壊する前に曲げ降伏する供試体が観察された。各供試体の破壊形態および斜めひびわれ発生荷重 ( $P_{sc}$ )、同変位 ( $\delta_{sc}$ )、最大荷重 ( $P_{max}$ )、同変位 ( $\delta_{max}$ ) をそれぞれ表-3に示した。

超高強度材料を用いた場合、表-3中のLM20DとHM20Dの最大荷重  $P_{max}$  の比較から明らかのように、せん断圧縮破壊を呈するはり部材のせん断耐力が大幅に増加する。LM20Dに対する

表-2 鉄筋の材料試験結果

呼び径	$E_s$ $\times 10^5$ (MPa)	$f_y$ (MPa)	$\epsilon_y$ ( $\mu$ )	$f_b$ (MPa)
D13	1.92	815	5058	944
D16	2.07	761	3983	888
D19	2.04	781	4540	985
D22	2.06	753	4218	973
D25	2.10	785	3830	977

HM20Dの最大荷重の増加は、コンクリート標準示方書のせん断耐力算定式で想定している増加割合よりもかなり大きい。これに対し、斜め引張破壊を呈するはり部材では、供試体LM30DとMM30Dの最大荷重の比較から分かるように、コンクリートの高強度化がせん断耐力の増加にほとんど寄与していないことが分かる。このように超高強度コンクリートを用いた場合、破壊形態の違いにより、コンクリートの高強度化の寄与分が大きく異なるため、その判定には注意を要する。

破壊形態を左右する主要因子であるせん断スパン比に関して、本実験では、2.0~4.0に変化させた。その結果、コンクリート圧縮強度が100MPa程度の供試体では、概ねせん断スパン比が3.0前後で破壊形態が変化することが分かった。しかし、破壊形態には有効高さ、引張鉄筋比の値も影響していた。これについては後述する。

#### 3.1 コンクリート圧縮強度の影響

図-2は縦軸にせん断強度 ( $P/2b_w d$ ) をとり、横軸をコンクリート圧縮強度としたグラフであり、せん断スパン比が2.0と3.0、有効高さが

表-3 実験結果

供試体 番号	$P_{sc}$ (kN)	$\delta_{sc}$ (mm)	$P_{max}$ (kN)	$\delta_{max}$ (mm)	破壊形態	供試体 番号	$P_{sc}$ (kN)	$\delta_{sc}$ (mm)	$P_{max}$ (kN)	$\delta_{max}$ (mm)	破壊形態
MS25D	114	2.4	236	23.6	せん断圧縮	HM25E	298	3.6	300	3.7	斜め引張
MS30D	113	3.4	200	42.9	(せん断圧縮)	LM30D	180	3.5	185	3.6	斜め引張
LM20D	213	2.0	336	4.6	せん断圧縮	NM30D	176	2.6	266	7.7	せん断圧縮
NM20D	249	2.0	601	22.3	(せん断圧縮)	MM30D	188	4.3	188	4.3	斜め引張
MM20D	230	2.7	526	15.7	せん断圧縮	HM30D	193	3.2	414	45.5	(せん断圧縮)
HM20D	257	1.8	634	31.8	(せん断圧縮)	MM30A	146	5.7	146	5.7	斜め引張
UM20D	200	0.7	748	***	(せん断圧縮)	HM30B	167	4.9	167	4.9	斜め引張
MM25D	199	3.5	446	10.0	せん断圧縮	HM30E	243	3.9	332	7.7	せん断圧縮
HM25A	196	3.9	196	3.9	斜め引張	MM40D	160	7.0	160	7.0	斜め引張
HM25B	219	3.1	410	74.8	(せん断圧縮)	HL25D	270	3.45	270	3.45	斜め引張
HM25D	224	2.8	464	23.9	(せん断圧縮)	HL30D	295	1.4	295	7.5	斜め引張

破壊形態の括弧付きは引張鉄筋の降伏を伴う供試体

\*\*\*: 変位過大のため変位計撤去により測定不可

350mm, 引張鉄筋比が約 1.2% の供試体を対象とした。なお、図中の白抜き記号は斜めひびわれ発生時、黒塗りは最大荷重時のせん断強度を表す。図-2より、せん断圧縮破壊する場合にはコンクリート圧縮強度が最大せん断強度におよぼす影響が大きく、コンクリート圧縮強度が大きくなるほどせん断耐力が増加することが分かる。これは、形成されたタイドアーチ的耐荷機構のアーチ部分の高強度化が耐荷機構全体の強化に結びついたものであると考えられる。

これに対し、斜め引張破壊する場合の最大せん断耐力およびせん断圧縮破壊をする場合の斜めひびわれ発生時のせん断耐力は、コンクリート圧縮強度の増加に対して一様に大きくならない。これは、斜めひびわれの発生に影響をおよぼす主要因子はコンクリートの引張強度であり、表-1に示すように、圧縮強度の増加ほどに引張強度の増加が見込めない高強度コンクリートの性質によるものである。

### 3.2 有効高さの影響

高強度コンクリートを用いると普通強度コンクリートを用いた場合と比べて、せん断強度に現れる寸法効果が大きくなるといわれている。超高強度コンクリートを使用した本研究でも寸法効果の影響が普通強度コンクリートを使用した場合よりも大きく出た。そのため、既往のせん断耐力算定式では超高強度コンクリートを用いた部材の寸法効果を十分に評価できない結果

を得ている<sup>1)</sup>。

次に、有効高さの大きさが破壊形態におよぼす影響を検討した。図-3は縦軸にせん断耐力  $V$  を有効断面積 ( $d \times b_w$ ) とコンクリート圧縮強度  $f'_c$  で除して無次元化した値  $\tau$  を縦軸に用い、横軸に有効高さを取ったグラフである。供試体は、コンクリート圧縮強度が約 100MPa, せん断スパン比が 2.5 と 3.0, 引張鉄筋比が約 1.2% の範囲を対象とした。図-3より、斜めひびわれ発生時および最大荷重時の無次元化されたせん断力  $\tau_{sc}, \tau_{max}$  は有効高さが大きくなるとともに一様に低下していく。しかし、同じせん断スパン比を持つにも関わらず、有効高さの大きさにより、斜めひびわれ発生時せん断力  $\tau_{sc}$  と最大荷重時せん断力  $\tau_{max}$  の差は異なり、特にせん断スパン比 2.5 を有する供試体 HL25D でも、有効高さ 600mm においても斜め引張破壊した。このように超高強度コンクリートを用いたはり部材では大型断面ほど斜め引張破壊をする可能性があり、今後、より詳細に検討する必要があると思われる。

### 3.3 引張鉄筋比の影響

図-3と同様に、縦軸に無次元化したせん断力  $\tau$ , 横軸に引張鉄筋比をとったグラフを図-4に示した。このグラフでは、コンクリート圧縮強度が約 100MPa, せん断スパン比が 2.5 と 3.0, 有効高さが 350mm の供試体を対象とした。せん断スパン比 2.5 の供試体がせん断圧縮破壊する場合には、引張鉄筋比 2.2% の場合を除き、引張

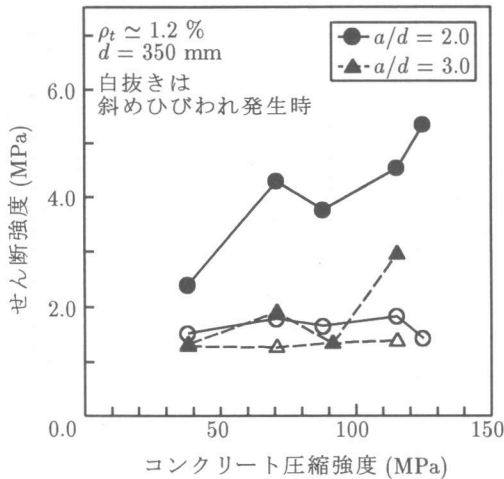


図-2 せん断強度とコンクリート圧縮強度の関係

鉄筋比の増加に対して最大せん断耐力は大きく増加している。その増加割合は、斜めひびわれ発生時せん断力  $\tau_{sc}$  の引張鉄筋比の増加による増加割合に比べてかなり大きい。これは、形成されたタイドアーチ的耐荷機構のタイに相当する引張鉄筋に高強度鉄筋を使用したため、耐荷機構全体の強化につながったものと考えられる。しかし引張鉄筋比 2.2% の供試体では、最大荷重時せん断力  $\tau_{max}$  が、1.2% のときに比べ低下した。既往の研究から引張鉄筋比が大きくなることで、コンクリートの負担できる平均せん断応力度が増加する効果は、約 2.0% で頭打ちになると言われている<sup>2)</sup>。また、実験上の制約から、はり幅を 200mm と一定に保って供試体を作製したため、引張鉄筋比 2.2% の場合には斜めひびわれの発生直後に付着割裂破壊した。このため、引張鉄筋比 2.2% の供試体の最大荷重時せん断力  $\tau_{max}$  は小さくなったと考えられる。

また、同じせん断スパン比の供試体でも引張鉄筋比が 2.2% の供試体を除けば、引張鉄筋比が小さな供試体が斜め引張破壊していてもこれが大きくなるとせん断圧縮破壊となる傾向が図-4よりうかがえる。このように、超高強度材料を用いた低鉄筋比部材では、ある程度小さなせん断スパン比 (2.5) でも斜め引張破壊する可能性がある。

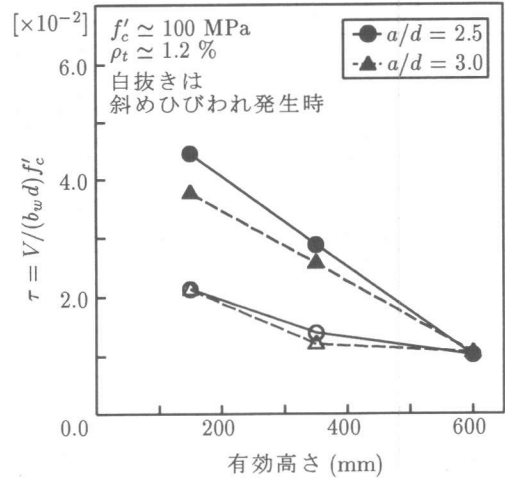


図-3 せん断耐力と有効高さの関係

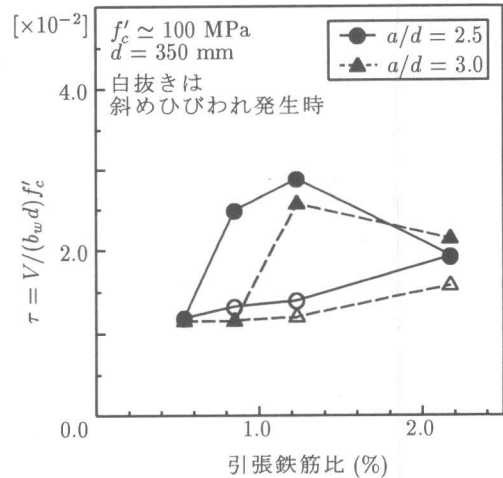


図-4 せん断耐力と引張鉄筋比の関係

#### 4. 解析モデル

既往のひびわれモデルや破壊エネルギー算定手法などを用いた有限要素解析を行い、超高強度材料を用いた RC 部材のせん断特性評価への適用性を検討した。

本研究では 2次元平面応力場問題として解析を行った。また、供試体の対称性を考慮し試験区間のみをモデル化した。供試体モデルを図-5に示す。実験では V 字型のプレートを載荷点に設けたため、解析においてはその影響を考慮し載荷点に載荷板に相当する幅 30mm の要素を設けた。コンクリートの引張軟化特性としては、図-6に示す 1/4 モデル<sup>3)</sup>を用いた。破壊エネル

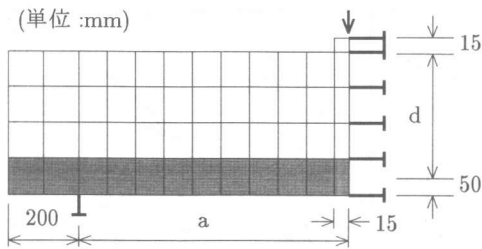


図-5 解析モデル形状図

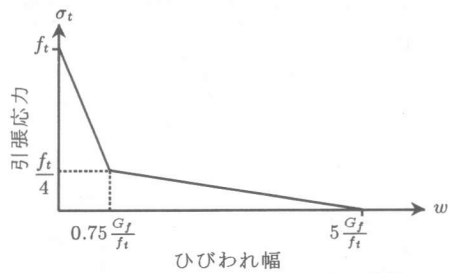


図-6 コンクリートの引張軟化特性

ギー ( $G_F$ ) の計算は、CEB の式<sup>4)</sup>を用いた。なお式(1)は、 $f'_c > 80\text{MPa}$  に対して定義される。

$$G_F = 4.30 \cdot G_{F0} \quad (\text{N/mm}) \quad (1)$$

ただし  $G_{F0}$  は骨材の最大寸法 ( $d_{\max}$ ) に依存する破壊エネルギーの基準値であり、本実験では骨材の最大寸法が 20mm より  $G_{F0}=0.035$  となる。

引張軟化の開始時応力には、表-1に示した割裂引張試験による引張強度 ( $f_t$ ) を用いた。圧縮側の応力-ひずみ関係は図-7に示すモデルを用いた<sup>5)</sup>。鉄筋は鉄筋位置にある要素の中で平均化された鉄筋比としてモデル化し、応力-ひずみ関係は完全弾塑性型とした。これらコンクリート圧縮強度や鉄筋降伏強度などは材料試験結果を用いた。ひびわれモデルとしては回転ひびわれモデルを用いた。非線形求解法は、変位制御による増分解析とし、収束計算は Linear Stiffness 法で行った。

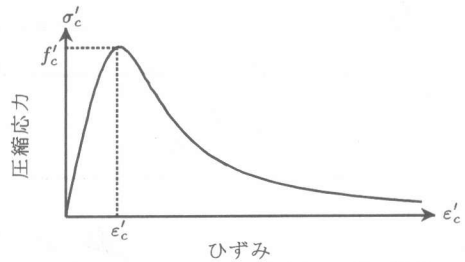


図-7 コンクリートの応力-ひずみ関係

## 5. 解析結果および考察

上記に仮定したモデルを用いて、実験供試体 MM20D, MM25D, MM30D, および MM40D ( $f'_c$ : 約 90MPa,  $d$ : 350mm,  $a/d$ : 2.0 ~ 4.0,  $\rho_t$ : 1.23%) より得られた荷重-変位関係の再現を試みた。結果を図-8 (a)~(d) に示す。なお、MM25D の実験荷重初期のデータは計測ミスにより測定できなかったため、図示していない。

図-8 (a) に示した MM20D 供試体の結果では、解析時の剛性が全体に大きく、実験において斜めひびわれの発生が確認された付近から、実験と解析より得られる荷重-変位曲線の差が大きくなる。そして解析から得られる最大荷重に相当する変位は、実験の最大荷重時変位の約 3 割程度となった。この原因として、実験では、V

字型の載荷板を用いたために、最大荷重に近づくにつれて、載荷板の設置面積が載荷初期の段階よりも大きくなるのが観察されたが、この効果を解析では考慮しておらず、変位増分過程で一定の載荷幅 (30mm) を有すると仮定したことが一因と考えられる。しかしながら、最大荷重値自体は、概ね実験結果を再現できている。

図-8 (b) に示した MM25D 供試体では、斜めひびわれ発生後の剛性に多少の差異が認められるものの、斜めひびわれの発生点やその後のせん断耐力増加も含め、せん断圧縮破壊が解析により良く再現されている。

図-8 (c),(d) に示したせん断スパン比が 3.0 (MM30D), 4.0 (MM40D) である斜め引張破壊を呈した供試体では、曲げひびわれによる部材の剛性の低下も含めて解析値が実験値と良く一致した。

既往のひびわれモデルなどを用いた有限要素解析手法を超高強度材料を用いたはり部材に適用した結果、せん断破壊形態に依ることなく実験結果とのある程度の整合性が認められた。

## 6. まとめ

コンクリート圧縮強度約 100MPa, 超高強度引張鉄筋 SD685 を用いたせん断補強鉄筋のない

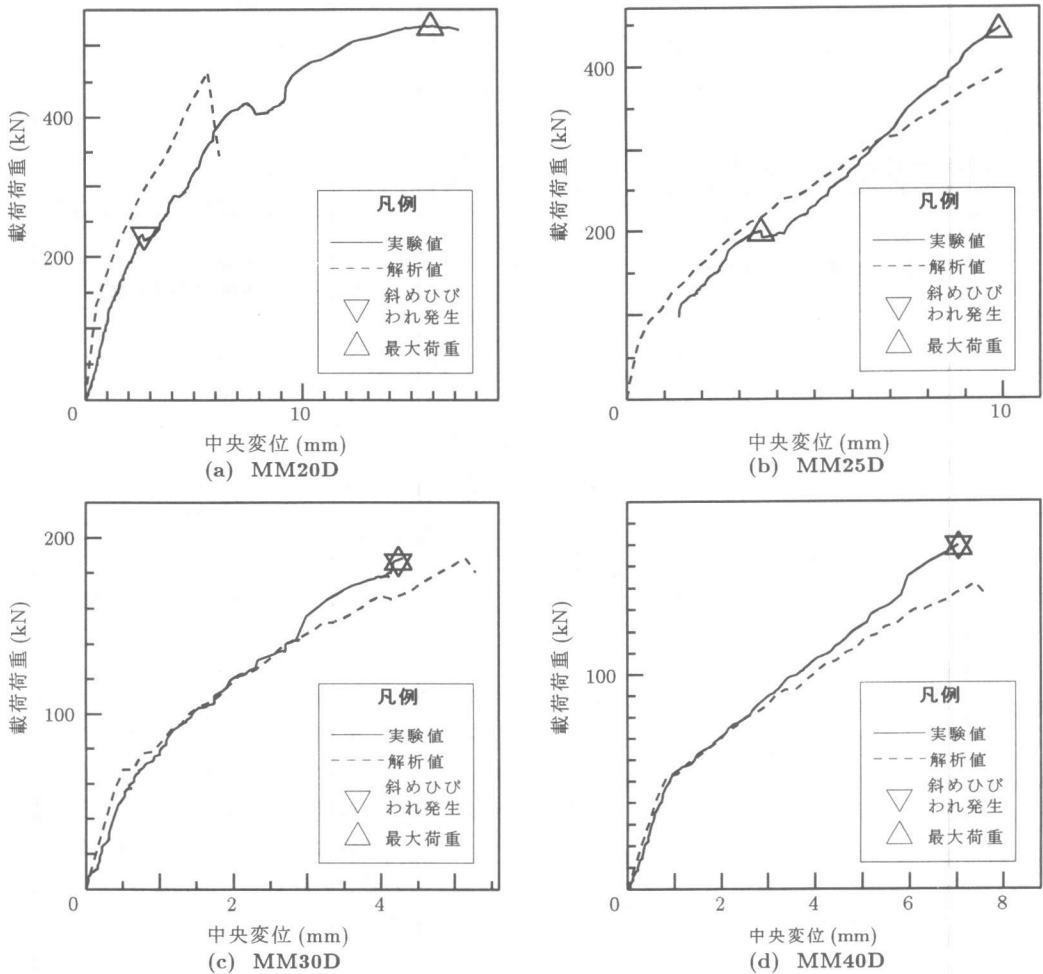


図-8 荷重変位曲線の比較

RCはり部材のせん断実験および解析を行った結果、次のような所見を得た。

- (1) 超高強度材料を用いた場合、せん断圧縮破壊と斜め引張破壊を分けるせん断スパン比はおおよそ3.0である。
- (2) 同じせん断スパン比のはり部材でも有効高さが大きく、引張鉄筋比が小さいほど、斜め引張破壊する傾向にあることが分かった。
- (3) 既往のひびわれモデルなどを用いた有限要素法は、超高強度材料を用いたRCはり部材のせん断特性評価に適用可能であることが分かった。

参考文献

- 1) 阿部 祐規 ほか: 超高強度材料を用いたせん断補強鉄筋のないRCはり部材のせん断耐力に関する

実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.181-186, 1999.7

- 2) Kang-Hai Tan, Susanto Teng, et al : Main Tension Steel in High Strength Concrete Deep and Short Beams, ACI Structural Journal, Vol.94, No.6, pp.752-768, Nov./Dec. 1997
- 3) 六郷 恵哲 ほか: コンクリートの曲げ強度の推定に関する破壊力学的検討, コンクリート工学論文集, Vol.3, No.1, pp.57-63, 1992.1
- 4) CEB-FIP: Structural Concrete - Textbook on Behaviour, Design and Performance, Vol.1, pp.33-34, Jul. 1999
- 5) THORENFELDT, E., et al : Mechanical properties of high-strength concrete and applications in design, In Proc. Symp. Utilization of High-Strength Concrete, 1987