

論文 超高強度コンクリートを用いた RC はり部材のせん断耐力に関する研究

松井 祐一^{*1}・内田 裕市^{*2}・六郷 恵哲^{*3}・小柳 治^{*3}

要旨：圧縮強度が300～1300kgf/cm²までのコンクリートを用いた、せん断補強筋のないRCはり部材を対象として、せん断特性ならびに土木学会コンクリート標準示方書のせん断耐力算定式の適用性について実験および解析により検討した。その結果、圧縮強度が1000kgf/cm²以上の超高強度コンクリートを用いた場合には、土木学会コンクリート標準示方書のせん断耐力算定式をそのまま適用すると、せん断耐力を過大評価する危険性があることが示された。

キーワード：せん断耐力、超高強度コンクリート、有限要素解析、分布ひびわれモデル

1. はじめに

高強度ならびに超高強度（圧縮強度が1000kgf/cm²以上）コンクリートを用いたRC部材に関する基本的な特性については、まだ不明な点が多く、これらの特性を生かした設計を行うためには、その破壊性状や耐力について的確に把握しておくことが重要である。また、現行の示方書等に規定されているせん断耐力算定式の適用性についても十分検討しておくことが必要である。本研究は、圧縮強度が300～1300kgf/cm²までのコンクリートを用いた、せん断補強筋のないRCはり部材を対象として、そのせん断特性ならびに土木学会コンクリート標準示方書のせん断耐力算定式の適用性について、実験および解析により検討したものである。

2. 実験および解析概要

はりの供試体寸法と引張鉄筋の諸元を表-1に示す。超高強度コンクリートは、高性能減水剤およびシリカフュームを使用して作製した。A～Fの供試体は、供試体寸法、鉄筋比、せん断スパン比を一定とし、コンクリートの目標強度を6種類に設定したもの（シリーズ1）である。また、L～Nの供試体は、鉄筋比一定で超高強度コンクリートを用い、せん断スパン比a/dを3種

表-1 供試体寸法と引張鉄筋の諸元

シリーズ 番号	供試体名	供試体寸法 幅×高さ×スパン(cm)	有効高さ (cm)	a/d	鉄筋比 (%)	降伏点 (kgf/mm ²)	引張強度 (kgf/mm ²)
1	A～F	10 × 18 × 110	15	3	2.65	37.4	56.7
2	L	10 × 26 × 155	22.5	3	2.55	41.4	62.0
	M	10 × 26 × 178		3.5			
	N	10 × 26 × 200		4			
3	S	10 × 36 × 220	30	3	2.58	34.3	54.8

*1 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 岐阜大学助教授 工学部土木工学科、工博 (正会員)

*3 岐阜大学 教授 工学部土木工学科、工博 (正会員)

類に設定したもの（シリーズ2）であり、供試体Sは、供試体Fのはり幅以外の寸法をすべて2倍にしたもの（シリーズ3）である。供試体はそれぞれ2体ずつ作製し、材令14~20日で載荷試験を行った。載荷方法は、2点集中載荷とし、モーメントスパンは供試体Sで40cm、それ以外の供試体はすべて20cmとした。

解析では、分布ひびわれモデルが組み込まれた汎用FEMプログラム・DIANAを用いた。コンクリートは弾塑性体とし、降伏条件としてDrucker-Pragerの式を用いた。引張ひびわれ発生後は直線軟化を仮定し、終局（応力がゼロとなる）ひずみを超高強度コンクリートでは 500×10^{-6} とし、それ以外のものは 1000×10^{-6} とした。また、せん断低減係数は0.125で一定とした。なお、これらの係数は、いくつかの予備解析を行った結果から定めたものである。その他の解析に用いた材料定数は、実験時に得られたものを用いた。なお、シリーズ1では、供試体と荷重の対称性を考慮して、供試体の半分のみを解析することとした。載荷は、強制変位で与えることとし、収束判定にはエネルギーのノルム($<10^{-3}$)を用いた。

3. 実験結果

実験から得られた荷重-変位曲線の一例を図-1に、それらに対応する供試体の破壊時におけるひびわれ状況を図-2に示す。F2, S2の供試体以外は、すべて斜め引張破壊となった。超高強度コンクリートで、せん断スパン比が3のはり供試体F, LおよびSでは、両せん断スパン内に斜め引張ひびわれが発生した後も破壊せず、荷重がさらに上昇した。特に、供試体F2, S2のはりは、鉄筋が降伏し、両方の斜め引張ひびわれがモーメントスパン内でつながるように伸びて破壊した。また、供試体A2のはりでも両せん断スパン内に斜め引張ひびわれが発生した。これらの原因としては、一方の斜め引張ひびわれがモーメントスパン内に進展することでひびわれ上部のコンクリートがタイドアーチ的な構造となつたために、斜め引張ひびわれ後もさらに荷重が上昇したためと考えられる。

表-2に、実験結果と土木学会コンクリート標準示方書のせん断耐力算定式(1)およびその

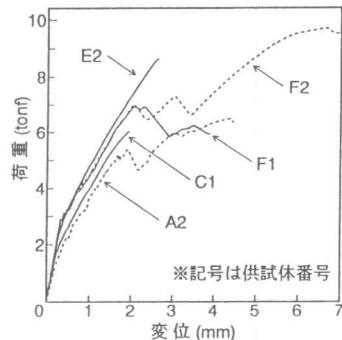


図-1 荷重-変位曲線(実験)

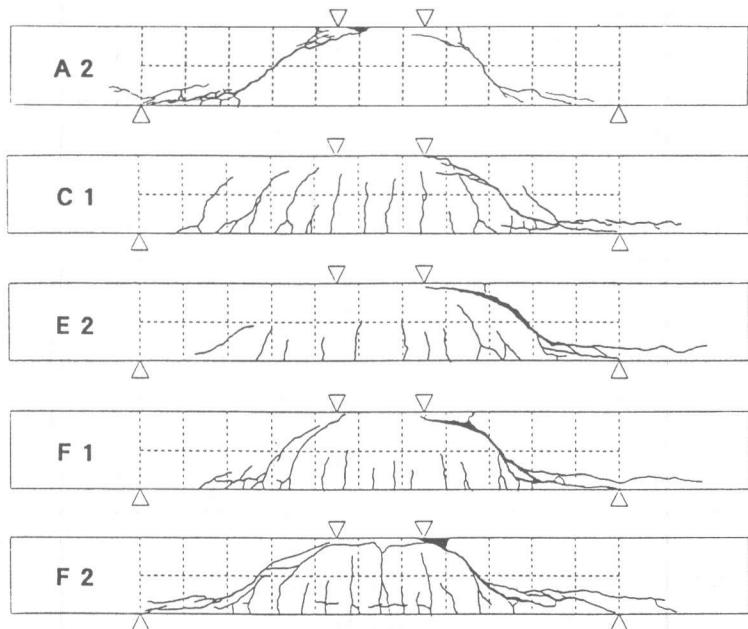


図-2 破壊時におけるひびわれ状況

表-2 実験結果とせん断耐力算定値

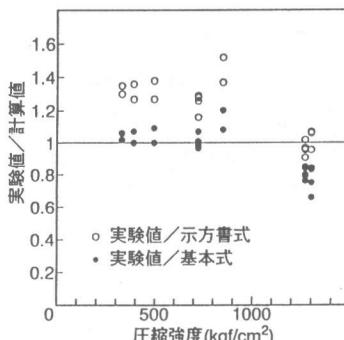
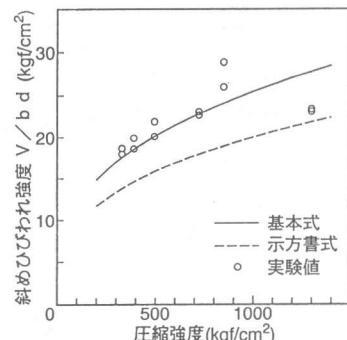
シリーズ*	供試体	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	斜めひびわれ発生時			示方書式 (tonf)	基本式 (tonf)	最大荷重時 せん断力 (tonf)
				せん断力 (tonf)	せん断強度 (kgf/cm ²)	変位 (mm)			
1	A 1	330	28.0	2.80	18.7	1.96	2.08	2.64	2.80
	A 2			2.70	18.0	1.92			3.25
	B 1	391	32.0	2.99	19.9	2.11	2.20	2.79	2.99
	B 2			2.80	18.6	1.94			3.13
	C 1	496	35.4	3.02	20.1	1.94	2.38	3.02	3.02
	C 2			3.29	21.9	2.32			3.29
	D 1	723	52.4	3.40	22.7	2.04	2.70	3.43	3.40
	D 2			3.46	23.1	2.06			3.46
	E 1	850	56.3	3.90	26.0	2.31	2.84	3.62	3.90
	E 2			4.33	28.8	2.60			4.33
	F 1	1300	79.9	3.51	23.4	2.07	3.28	4.17	3.51
	F 2			3.47 *1	23.1	2.05			4.90
2	L 1	1269	79.7	4.44	19.7	2.31	4.35	5.53	7.10
	L 2			4.18	18.5	2.05			4.33
	M 1			4.42	19.6	3.63		5.22	4.42
	M 2			4.46	19.8	3.50			4.46
	N 1			4.21	18.7	4.57		5.00	4.21
	N 2			3.96	17.6	4.10			3.96
3	S 1	1300	79.9	5.24	18.3	3.22	5.46	6.94	5.50
	S 2			4.61 *1	15.4	2.89			8.47

*1 鉄筋降伏後、付着破壊

基本式(2)（以下、示方書式、基本式と呼ぶ）より求めた算定値を、図-3に実験値と算定値の比を示す。また図-4に、実験から得られたコンクリートの圧縮強度とはりの斜めひびわれ強度の関係を示す。なお、ここで言う斜めひびわれ強度 ($V/\sqrt{b d}$) とは、斜め張ひびわれ発生後、荷重がいったん低下する時のせん断力(V)をはり幅(b)と有効高さ(d)で除したものであり、斜めひびわれ発生時変位とは、両載荷点下の平均変位である。以下に、示方書式および基本式を示しておく。

$$V_c/b d = 0.9 \cdot \sqrt[3]{f'_c} \cdot \sqrt[3]{100 p} \cdot \sqrt[4]{100/d} \quad \dots(1)$$

$$V_c/b d = 0.94 \cdot \sqrt[3]{f'_c} \cdot \sqrt[3]{100 p} \cdot \sqrt[4]{100/d} \cdot \left(0.75 + \frac{1.4}{a/d} \right) \quad \dots(2)$$

図-3 せん断耐力の実験値
と算定値の比図-4 圧縮強度と斜めひ
びわれ強度の関係

コンクリートの圧縮強度が700kgf/cm²程度までの斜めひびわれ強度は、基本式から求めた算定値

とよく対応しており、示方書式に対しては安全側となった。また、圧縮強度が 850kgf/cm^2 の場合には、基本式に対して8~20%程度高い値を示した。しかし、超高強度である圧縮強度が 1300kgf/cm^2 の斜めひびわれ強度は、示方書式に対してわずかに安全側にあるが、基本式より小さくなり、約85%

の値を示した。この原因についてACIでは、高強度コンクリートにおけるひびわれ面がなめらかになり、骨材のかみ合い効果がコンクリート強度の増加につれて減少するためであると報告している[1]。この結果から、現行のせん断耐力算定式は圧縮強度が 800kgf/cm^2 程度までの場合にはそのまま適用できるが、特に圧縮強度が 1000kgf/cm^2 以上の超高強度コンクリートを用いた場合に、これらの算定式をそのまま適用するとせん断耐力を過大評価する危険性があることを示していると考えられる。

また図-5に、超高強度コンクリートにおけるせん断スパン比と斜めひびわれ強度の関係を示す。本実験ではせん断スパン比が3~4の範囲のみを検討したものだが、斜めひびわれ強度に与えるせん断スパン比の影響は、せん断スパン比を考慮している基本式ほど顕著には現れず、またせん断スパン比を考慮していない示方書式と比較的一致する結果となり、両算定式に比べ斜めひびわれ強度に対するせん断スパン比の影響はほとんどみられなかった。また、図-6に超高強度コンクリートにおけるはり高さと斜めひびわれ強度の関係を示す。この図から、超高強度コンクリートを用いた場合には、両算定式に比べ寸法効果の影響が強く現れることがわかるが、本実験ではデータの数が少ないので、今後さらに詳細な検討をする必要がある。

4. 解析結果

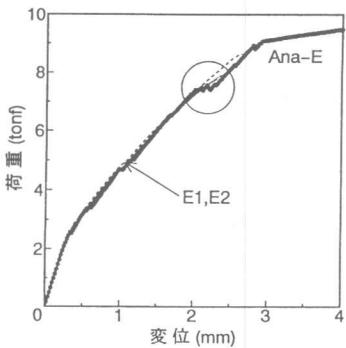


図-7 荷重-変位曲線

(シリーズ1：解析E)

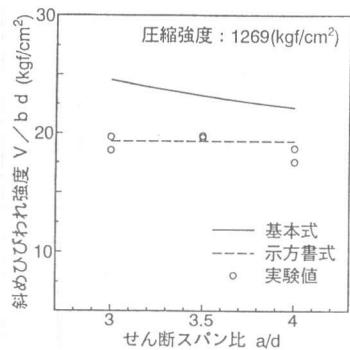


図-5 せん断スパン比と斜めひびわれ強度の関係

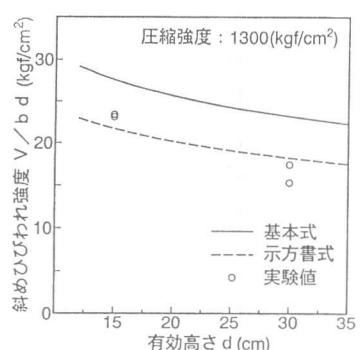


図-6 有効高さと斜めひびわれ強度の関係

—— 基本式
--- 示方書式
○ 実験値

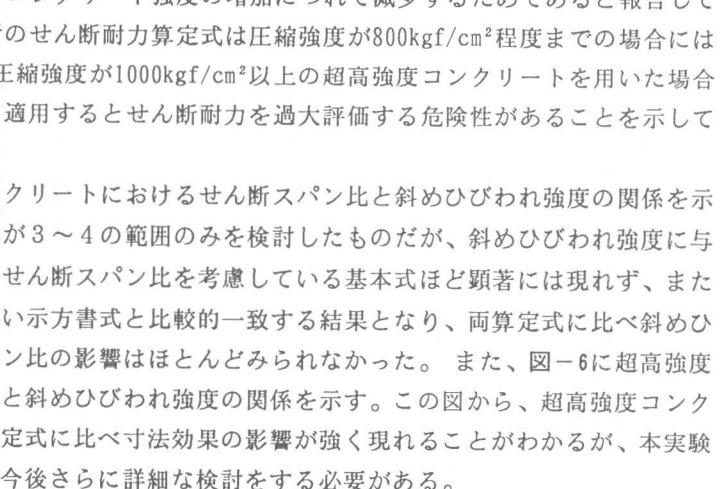


図-8 荷重-変位曲線

(シリーズ1：解析F)

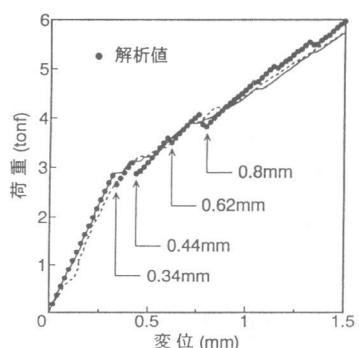


図-9 荷重-変位曲線

(図-8の拡大図)

図-7～10に、解析で得られた荷重－変位曲線の一例を実験値とともに示す。なお、図-9は、図-8における変位が0～1.5mmの部分を拡大したものである。図中のAna-Eとは、解析値および供試体番号を意味する。また、図-11～14に、それらに対応する主引張ひずみの分布状況を示す。荷重－変位曲線の傾きは、すべての解析で実験値とほぼ一致したが、圧縮強度が500kgf/cm²以上の解析では、すべて鉄筋が降伏し、曲げ破壊となった。しかし、シリーズ1の解析では、実験における初期ひびわれ発生荷重点あるいは斜めひびわれ荷重点近傍（図-9および図-7, 8中の○印内）において、解析の荷重－変位曲線が複雑な挙動を示した。この付近で荷重が低下す

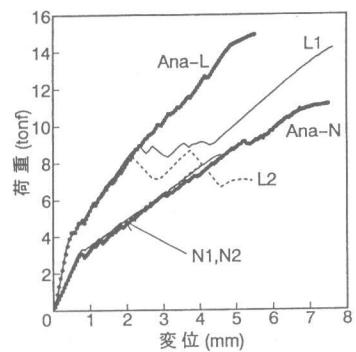


図-10 荷重－変位曲線
(シリーズ2：解析L, N)

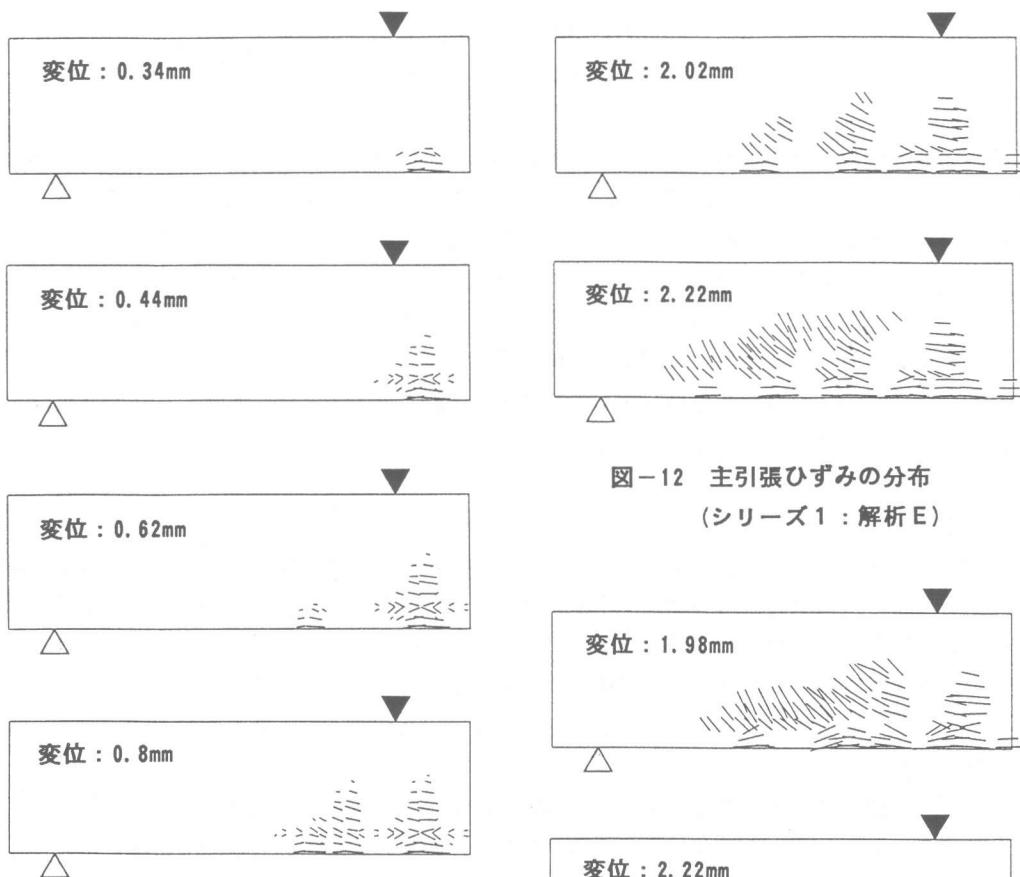


図-11 主引張ひずみの分布
(シリーズ1：解析F)

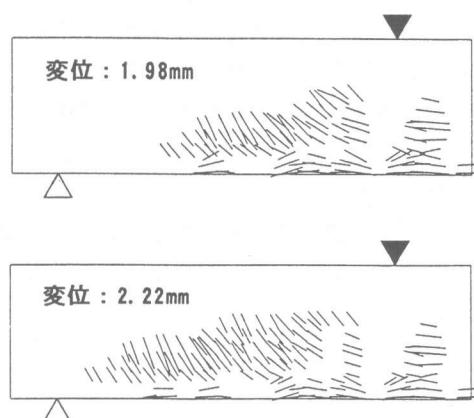


図-12 主引張ひずみの分布
(シリーズ1：解析E)

図-13 主引張ひずみの分布
(シリーズ1：解析F)

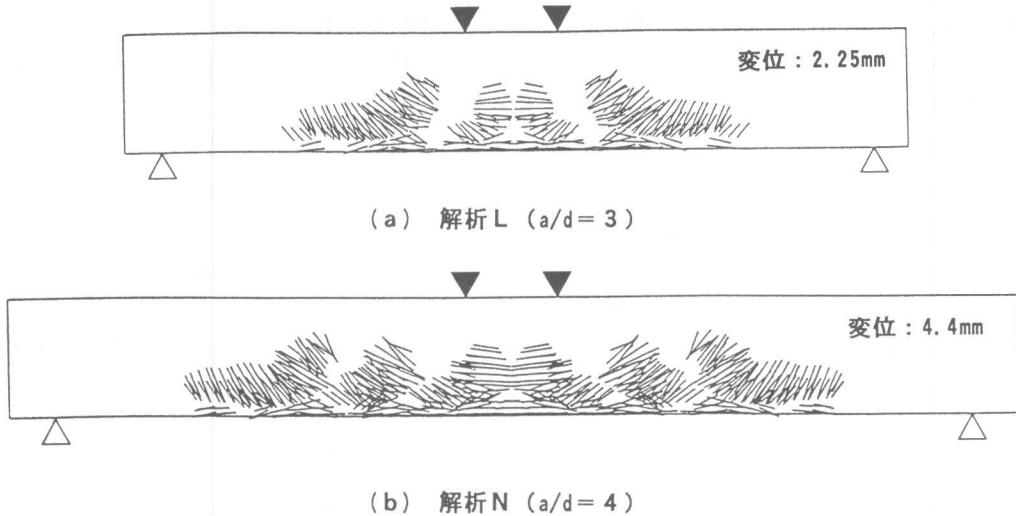


図-14 主引張ひずみの分布（シリーズ2、供試体L, N）

る前後の主引張ひずみの分布（図-11～13）をみると、初期ひびわれや曲げひびわれが発生・進展していく過程、あるいは斜めひびわれ幅が大きくなる過程に対応した形でひずみ分布が広がっていくことがわかり、このひずみ分布図で曲げひびわれや斜め引張ひびわれの進展状況を把握できるものと考えられる。また、シリーズ2の解析（図-10, 14）でも、実験時のひびわれ本数を比べると数は少ないが、斜め引張ひびわれの分布状況を比較的良く表している。これらの結果から、分布ひびわれモデルを用いた有限要素解析において、荷重－変位曲線の傾きが精度良く求められ、ひびわれの進展状況や分布状況も把握することが可能であるが、斜め引張破壊する場合のせん断耐力あるいはせん断破壊の特性を定量的に求めることは困難であることがわかった。

5. まとめ

圧縮強度が $300\sim 1300\text{kgf/cm}^2$ までのコンクリートを用いた、せん断補強筋のないRCはり部材を対象として、せん断特性ならびに土木学会コンクリート標準示方書のせん断耐力算定式の適用性について実験および解析により検討し、以下のような結果が得られた。

- (1) 圧縮強度が 1000kgf/cm^2 以上の超高強度コンクリートを用いた場合には、土木学会コンクリート標準示方書のせん断耐力算定式をそのまま適用するとせん断耐力を過大評価する危険性がある。
- (2) 分布ひびわれモデルを用いた有限要素解析において、荷重－変位曲線が複雑な挙動を示す点での主引張ひずみの分布により、曲げあるいは斜め引張ひびわれの進展状況を把握することができる。

参考文献

- [1] 文献抄録委員会構造部会・抄訳：高強度コンクリートに関する研究の現状－ACI363委員会報告－、コンクリート工学、Vol. 23、No. 5、pp35～45、1985.5