

# 論文 高強度材料を使用した RC 梁のせん断耐力に関する FEM 解析

土井 至朗\*1・佐藤 勉\*2・下野 一行\*3・松岡 茂\*1

**要旨:** 高強度材料を用いた構造物の設計を行う場合、その耐力算定方法については十分な検討が必要である。特に、高強度コンクリートでは圧縮強度に比べてせん断強度の増加が少ない傾向があることが報告されており、高強度材料を用いた RC 構造物のせん断耐力算定方法の確立が望まれている。本論文では普通コンクリートと高強度コンクリートでは引張応力の伝達が異なるのではないかと考え、著者らが過去に実施した載荷実験を対象として、高強度材料を用いた RC 梁のせん断耐力を引張軟化曲線をパラメータとした FEM 解析により検討した結果、破壊エネルギーがせん断強度に及ぼす影響が大きいことが判明した。

**キーワード:** 高強度材料, 鉄筋コンクリート, せん断耐力, 引張軟化曲線

## 1. はじめに

高強度材料をコンクリート構造物に適用すれば、断面の縮小化が可能になり経済性に優れたものが施工できるものと考えられる。構造物のコスト削減等を目的として、高強度コンクリート・鉄筋を用いた RC 梁部材のせん断耐力に関する実験<sup>1)・2)</sup>が行われている。それらの研究報告によると、曲げひび割れ幅は土木学会コンクリート標準示方書による算定式でほぼ推定することができるが、せん断耐力については普通コンクリートを対象とした算定方法より小さくなる傾向があることが指摘されている。さらに、阿部ら<sup>3)</sup>は、高強度コンクリートは普通コンクリートに比べて、圧縮強度に対する引張強度の増加の割合が小さいことを指摘しており、普通コンクリートを対象に提案された示方書式を高強度コンクリートに適用する場合には注意が必要であることを指摘している。また、藤田ら<sup>4)</sup>は、高強度コンクリートのせん断強度に対する寸法効果則についても、普通コンクリートと異なる可能性があることを指摘している。

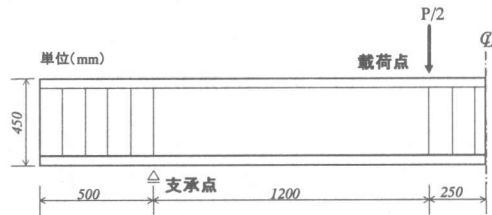


図-1 供試体概要

本論文では、普通コンクリートと高強度コンクリートでは、引張応力の伝達に違いがあると考え破壊エネルギーがせん断耐力に与える影響を把握する目的で、著者らが行った実験を対象に引張軟化曲線をパラメータとして数値解析を実施した。さらに、数値解析の結果に基づいて高強度材料を用いた RC 梁のせん断耐力の寸法効果についての検討を行った。

## 2. 計算対象とした実験概要

筆者らは、図-1 に示すような供試体により高強度材料を用いた RC 梁のせん断耐力算定式を立案する目的で RC 梁のせん断実験を実施した<sup>1)・2)</sup>。

\*1 鉄建建設(株) エンジニアリング本部 技術研究所 構造・解析グループ (正会員)

\*2 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部 橋梁担当 (正会員)

\*3 西日本旅客鉄道(株) 大阪建設工事事務所 施設技術課 (正会員)

表-1 実験結果一覧表

供試体 No.	圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>	鉄筋比 %	せん断耐力(kN)		P <sub>test</sub> /V <sub>cal</sub>
			実験値 P <sub>test</sub>	土木学会コンクリート標準示方書による計算値 V <sub>cal</sub>	
No.100-1	111.7	2.27	189	271	0.70
No.100-2	99.3	2.27	162	260	0.62
No.100-3	125.4	2.27	192	282	0.68
No.80-1	79.7	2.32	320	418	0.82
No.80-2	79.1	2.27	290	362	0.86
No.80-3	77.3	2.28	260	298	0.87
No.80-4	75.9	2.27	169	238	0.74

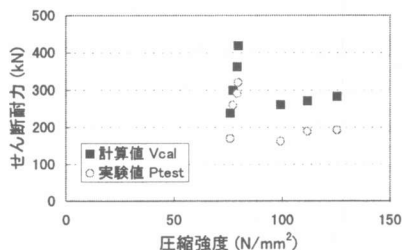


図-2 せん断耐力の比較

図に示すようにせん断スパン内には、せん断補強鉄筋を配置しておらず、コンクリートの圧縮強度のみをパラメータとするため、せん断スパン比等は一定とした。なお、各供試体の幅は変化させているが引張鉄筋比はほぼ一定の値(2.27%)に保っている。

実験報告によるとコンクリートの圧縮強度が 80N/mm<sup>2</sup> クラスの供試体では、せん断スパン内に斜めひび割れが発生し荷重が一時的に低下した(後述：図-7, 8 参照)。さらに荷重を継続すると再び荷重は増加に転じ、最終的には曲げスパン内の圧縮側のコンクリートが損傷するせん断圧縮破壊が生じたことから、本論文ではせん断スパン内に斜めひび割れが発生・進展して最初に荷重が低下に転じた値を供試体のせん断耐力として扱った。一方コンクリートの圧縮強度が 100N/mm<sup>2</sup> 以上の供試体ではせん断スパン内の斜めひび割れの進展により最終的な破壊が決定されていることから、最大荷重をせん断耐力とした。

表-1 および図-2 にせん断耐力について、土木学会コンクリート標準示方書<sup>5)</sup>の梁部材のせん断耐力算定式(以降、示方書式)と、実験結果を

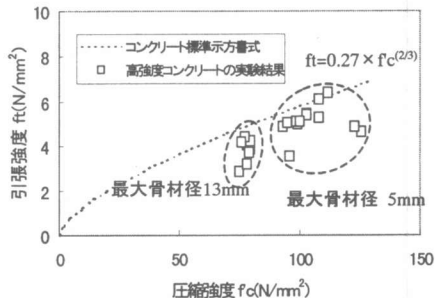


図-3 コンクリートの圧縮強度と引張強度

比較した結果を示す。阿部らが指摘しているように、実験で得られたせん断耐力は、式(1)で示される示方書式より小さい。特に、コンクリートの圧縮強度が 100N/mm<sup>2</sup> 以上では示方書式により算定されたせん断耐力の 7 割程度であった。

$$V_c = 0.20(0.75 + 1.4d/a) \cdot f_c^{A/3} \cdot \beta_d \cdot \beta_p \cdot b_w \cdot d \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、V<sub>c</sub> : せん断耐力 (N)

$$\beta_d = \sqrt[4]{1000/d} \leq 1.5$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100p_c} \leq 1.5$$

f'<sub>c</sub> : コンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

b<sub>w</sub> : 梁のウェブ幅 (mm) d : 有効高さ (mm)

p<sub>c</sub> : せん断引張鉄筋比 p<sub>c</sub> = A<sub>s</sub> / (b<sub>w</sub> · d)

A<sub>s</sub> : 軸方向引張鉄筋の断面積 (mm<sup>2</sup>)

a/d : せん断スパンと有効高さとの比

圧縮強度と引張強度の関係を図-3 に示す。同図には、普通コンクリートを対象とした土木学会コンクリート標準示方書の圧縮強度と引張強度との関係式を記入している。高強度コンクリートの

表-2 供試体諸元

供試体	供試体断面寸法				コンクリート			軸方向鉄筋			
	b (mm)	h (mm)	d (mm)	せん断 スパン a(mm)	圧縮強度 $f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮ひずみ $\epsilon'_c$	引張強度 $f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	呼び 名	本 数	鉄筋比 $p_c$ %	引張降伏 強度 (N/mm <sup>2</sup> )
No.100-1	350	450	400	1200	111.70	3.42E-03	6.40	D32	4	2.27	724
No.100-2	350	450	400	1200	99.26	3.47E-03	5.50	D32	4	2.27	
No.100-3	350	450	400	1200	125.43	3.38E-03	4.63	D32	4	2.27	
No.80-1	600	450	400	1200	79.73	2.52E-03	4.25	D32	7	2.32	742
No.80-2	525	450	400	1200	79.08	2.46E-03	3.76	D32	6	2.27	
No.80-3	435	450	400	1200	77.31	2.45E-03	4.41	D32	5	2.28	
No.80-4	350	450	400	1200	75.94	2.38E-03	4.22	D32	4	2.27	

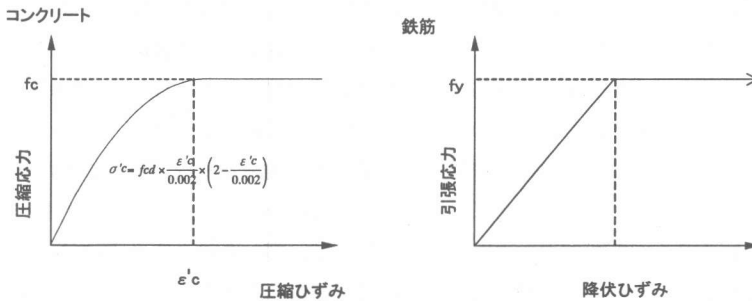


図-4 コンクリートと鉄筋のモデル化した応力ひずみ曲線

引張強度は圧縮強度の増加に比べて小さい傾向がある。なお最大骨材径は、80N/mm<sup>2</sup>クラスが13mm、100N/mm<sup>2</sup>クラスが5mmと一般のコンクリートより小さいものを使用している。

### 3. 解析

#### 3.1 解析モデル

渡辺ら<sup>9)</sup>は、ひび割れ発生要素のせん断剛性をひび割れ開口幅の関数としてモデル化した分布ひび割れモデルで、RC梁のせん断耐力を推定できることを提案している。そこで、渡辺らが提案した解析モデルを用いてせん断補強鉄筋を配置しないRC梁のせん断耐力を計算した。

表-2に計算対象の供試体と計算に使用した鉄筋・コンクリートの強度特性の一覧表を示す。80N/mm<sup>2</sup>クラスのコンクリートを用いたNo.80-1,2,3,4供試体の圧縮強度は、ほぼ同一であることから引張強度は80N/mm<sup>2</sup>クラスの平均的な値を計算では使用した。100N/mm<sup>2</sup>クラスのコンクリートを用いた供試体を対象とした計算では、圧縮強度が異なることから、表-2に示される実測さ

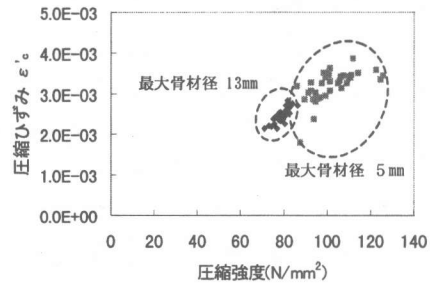


図-5 圧縮強度と破壊時のひずみ

れた引張強度を使用した。コンクリートの圧縮応力-ひずみ曲線は図-4に示すように圧縮強度に達するまでは、応力とひずみの関係は二次曲線で表せるものとし、圧縮強度に達した後は一定の応力を保持するものとした。また、鉄筋も降伏強度に達した後は、コンクリートと同様に降伏強度を保持する完全弾塑性モデルとして計算を行った。計算では、鉄筋のひずみ硬化およびコンクリートの応力軟化を考慮していないので、今回の解析モデルでは曲げ破壊先行型の破壊形態を計算することはできない。

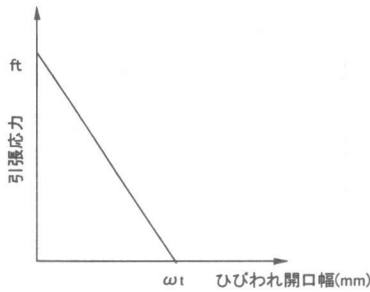


図-6 引張軟化曲線

コンクリートが圧縮強度に達した時の圧縮ひずみ  $\epsilon'_c$  は、圧縮試験結果によると図-5に示すように圧縮強度が増加するとひずみも大きくなる傾向を示していることから、数値解析では圧縮ひずみについては、圧縮強度試験より得られた値を使用した。

渡辺らが提案している解析モデルでは、コンクリートの引張破壊特性として引張軟化曲線を直線モデルで定めることになっている。コンクリートの破壊エネルギーを表す引張軟化曲線については、Bazant ら<sup>7)</sup>が指摘しているようにコンクリートの強度の影響を受けることが予想される。しかしながら、本解析の対象とした荷重実験ではコンクリートの破壊エネルギーに関する試験がほとんど行われていない。そこで、本研究ではコンクリートの破壊エネルギーを図-6に示す引張軟化曲線で表すことができると仮定し、引張応力の伝達が

無くなるひび割れ幅  $\omega_t$  をパラメータとして計算を行った。

### 3.2 解析結果

供試体の対象条件を考慮して、計算領域は図-7に示すように1/2の範囲とした。また、図-7には計算結果の最終状態におけるひび割れ幅分布と実験で観察された結果を示している。計算結果では、最初に荷重点間の純曲げ区間に曲げひび割れが発生した後にせん断スパン内に斜めひび割れが発生した。最終的には、同図に示すようにせん断スパン内に生じた斜めひび割れが貫通したために計算が終了した。なおその時点で引張鉄筋は降伏に達していなかった。

図-8に実験と計算で得られた荷重-変位曲線を示す。80N/mm<sup>2</sup>クラスのコンクリートを用いた実験では、図-8に示すようにせん断スパン内に斜めひび割れが発生すると荷重が一時的に低下し最終的にはせん断圧縮破壊で終了している。これに対して、計算結果では斜めひび割れの貫通により供試体の最終耐力が決定されている。また、荷重-変位曲線は斜めひび割れ発生・進展による荷重低下までは、計算結果は実験とほぼ同様の傾向を示している。一方、100N/mm<sup>2</sup>クラスのコンクリートを使用した供試体では、実験も計算結果と同様に斜めひび割れで最終的な破壊が決定されており、荷重-変位曲線についてもほぼ同様の結果

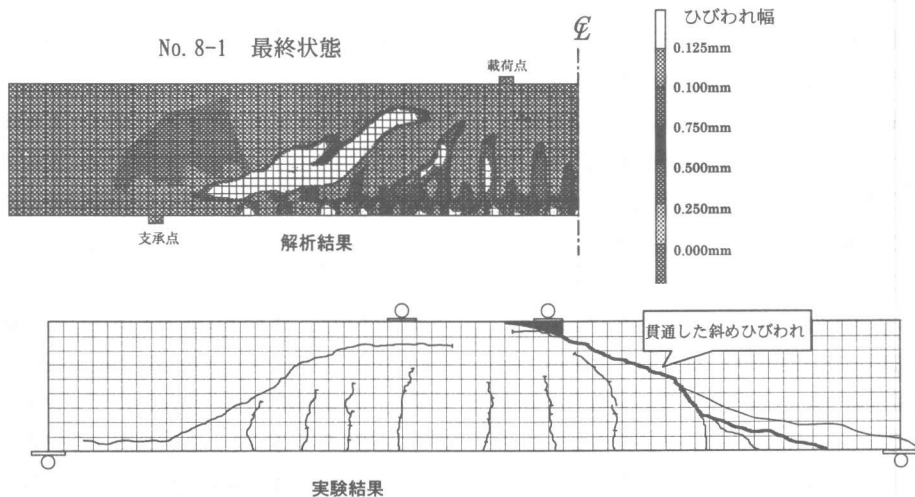


図-7 ひびわれ発生パターン

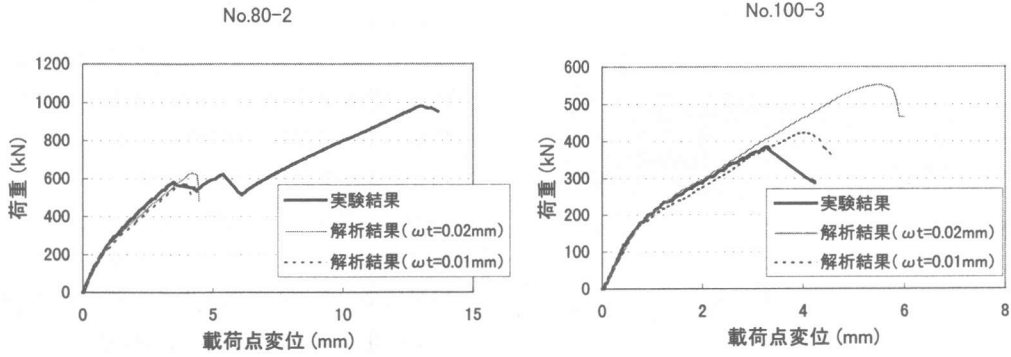


図-8 荷重—変位曲線

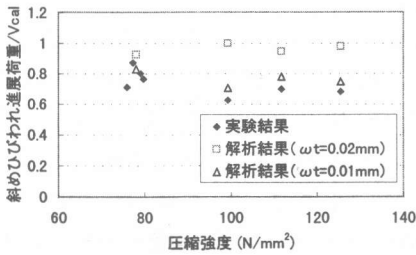


図-9 圧縮強度とせん断耐力の関係

を示している。

実験結果のせん断耐力と計算結果との関係を図-9に示す。なお、図-9の縦軸は、示方書式で算出される値で無次元化している。

数値解析結果を見ると、使用した引張軟化曲線によりコンクリートのせん断強度の大きさが異なっている。渡辺らが普通コンクリートを対象として適用した引張応力の伝達がなくひび割れ幅 $\omega_t$ を0.02mmと設定した計算結果では、せん断強度は大きめに算定されおり、特に100N/mm<sup>2</sup>クラスではその傾向が顕著である。一方、ひび割れ幅 $\omega_t$ を0.01mmと設定した計算結果のせん断強度はほぼ実験結果と一致している。

実験結果から得られたコンクリートのせん断強度は、実験結果では示方書式のように圧縮強度の増加に伴って大きくなっていない。ただし、計算対象とした実験で使用したコンクリートの最大骨材径は通常のものより小さいため、ひび割れ面における骨材間の噛み合わせ等による応力が小さいと思われる。しかしながら、他の実験においても高強度コンクリートのせん断強度は低い傾向が報

告されていることと、計算結果もせん断強度が低くなる傾向があること、数値解析でひび割れ幅 $\omega_t$ を普通コンクリートより小さく設定した計算結果が実験とほぼよい対応を示したことから、高強度コンクリートのひび割れ面における骨材間の噛み合わせ等による伝達応力は従来のものより小さい可能性があると思われる。したがって、高強度コンクリートの数値解析では、コンクリートの引張強度だけでなく、引張軟化曲線によって表される破壊エネルギーについても検討が必要であると考えられる。

### 3.3 寸法効果

示方書式では、断面高さによるせん断強度への影響を考慮している。そこで、数値解析により高強度コンクリートの寸法効果を計算した。計算で使用したコンクリートの強度特性値を表-3に、計算に使用した計算モデルを図-10に示す。計算モデルは先の実験のモデルと同じ物を使用し、せん断スパン比、引張鉄筋比は一定に保ちながら有効断面高さを変化させた。図-11に解析で得られたせん断強度と断面高との関係を示す。計算結果

表-3 寸法効果検証の供試体諸元

	d (mm)	a (mm)	a/d
f <sub>c</sub> 80N/mm <sup>2</sup>	600	1800	3
	800	2400	3
	1000	3000	3
	2000	6000	3
	3000	9000	3

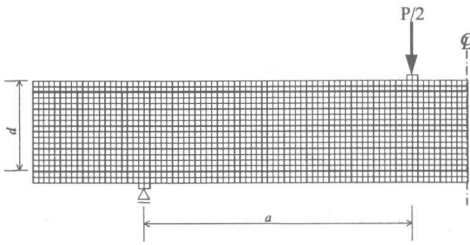


図-10 解析モデル

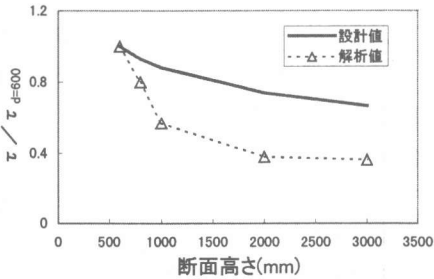


図-11 せん断強度の寸法効果

によると、高強度コンクリートのせん断強度は示方書式の値と比較すると全ての断面高で低い傾向をしめしており、その寸法効果は示方書式の 1/4 乗より小さい傾向を示している。この原因も、コンクリートの圧縮強度と引張強度との関係とコンクリートの破壊エネルギーに起因している可能性があると思われる。本研究結果によると高強度コンクリートのせん断強度の寸法効果は、示方書式で定められたものより大きい可能性があると思われる。

#### 4. まとめ

本研究結果をまとめると以下ようになる。

- ① 渡辺らが提案した解析モデルを用いることにより得られたせん断強度は、 $80\text{N/mm}^2$  の実験の斜めひびわれ進展荷重とほぼ一致し、その荷重までの荷重-変位曲線も実験結果と同様の傾向を示した。
- ② 今回の解析で、引張応力の伝達が無くなるひび割れ幅 $w_t$ を普通コンクリートの場合より

小さくした計算結果が実験とほぼ一致したことから、高強度コンクリートのひび割れ面での応力伝達が普通コンクリートと異なる可能性がある。ただし、解析対象とした実験で使用した最大骨材径が通常より小さいので、その影響を受けている可能性もある。

- ③ 高強度コンクリートはりのせん断強度の寸法効果は示方書式よりも大きく、破壊エネルギーの影響を受けているものと思われる。

#### 参考文献

- 1) 下野一行, 佐藤 勉, 松岡 茂: 高強度材料を用いたRC梁部材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.20, No.2, pp.1039-1044, 1998
- 2) 下野一行, 柏原 茂, 佐藤 勉, 松岡 茂: 高強度材料を用いたRC梁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.175-180, 1999
- 3) 阿部祐規, 伊藤堅生, 松原一美, 鈴木基行: 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
- 4) 藤田 学, 大館武彦, 安田 有, 佐藤良一: 高強度コンクリートはり部材の寸法効果に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.3, pp.349-354, 1998
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編], pp.60-65, 1996
- 6) 渡辺忠朋, 松岡 茂, 武田康司: 破壊力学に基づくRC部材のせん断耐力の研究, 土木学会論文集, No.592/V-39, pp.25-36, 1998
- 7) Bazant, Z. P.: Crack band theory for fracture of concrete, Materials and Structures, pp.155-177