

論文 コンクリートの引張軟化特性に及ぼす骨材の影響

清水 大輔^{*1}・名和 真一^{*2}・内田 裕市^{*3}・小柳 洽^{*4}

要旨：粗骨材量，骨材粒度（粗骨材，細骨材）ならびに粗骨材とモルタルとの付着特性がコンクリートの引張軟化特性に及ぼす影響について検討した。その結果，骨材の粒度は粗骨材，細骨材ともにコンクリートの引張軟化特性に対しほとんど影響を及ぼさないが，粗骨材量および付着特性については，その影響の大きいことが確認された。また，コンクリートの引張軟化曲線の推定において問題点とされていた軟化開始点応力を決定するための一つの方法を提案した。

キーワード：破壊力学，引張軟化曲線，破壊エネルギー，骨材

1. はじめに

コンクリートの力学的挙動は，その構成材であるセメントモルタルと粗骨材それぞれの力学的性質に加えて，その境界層の付着特性によって影響を受けるとされる。骨材岩種とセメントモルタルとの付着特性については既に幾つかの研究が行われているが，コンクリートの力学的挙動との関連性となると必ずしも解明されているとはいえない。現在までに，骨材粒径や付着特性などのコンクリート内部構造が引張軟化特性に及ぼす影響について研究した例は少ない¹⁾。そこで本研究では，粗骨材量，骨材粒度（粗骨材，細骨材）および粗骨材とモルタルとの付着特性の4点がコンクリートの破壊エネルギーおよび引張軟化曲線に及ぼす影響を検討した。

2. 引張軟化曲線の推定

現在までに，コンクリートの引張軟化曲線を推定する方法は数多く提案されている。本研究では，橋高ら²⁾により提案された多直線近似解析法を用いることとした。この方法は，ひび割れが進展するごとに引張軟化曲線の勾配を解析値と実験値の一致性から決定し引張軟化曲線の全形を推定し

ていくもので，ここでは有限要素法と組み合わせたものを使用する。この方法の特徴は，軟化開始点応力とひび割れ方程式さえ求められれば，ほぼ厳密な引張軟化曲線が解析できるということであり，逆に問題点としては，軟化開始点応力が唯一に決定できないということがある。しかし，引張軟化曲線の推定法を一般化するためには，軟化開始点応力の推定は重要である。そこで本解析では，軟化開始点応力を一意的に決定する一つの方法を提案する。

2.1 軟化開始点応力の決定

図-1に切欠きはりの3点曲げ試験で得られた荷重-ひび割れ肩口開口変位(CMOD)関係から軟化開始点応力を適当に変えて多直線近似解析法により荷重-CMOD曲線の解析値と実験値の誤差を同一として推定した引張軟化曲線の一例を示す。同図において，推定される引張軟化曲線の初期部分の形状は軟化開始点応力により変化しており，これは軟化開始点応力を唯一に決定することができないことを示すものである。しかしながら，同図においてひび割れ幅が0.005mm以上の部分では軟化開始点応力によらず推定された引張軟化曲線はほぼ一致している。そこで，ここでは

*1 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻

*3 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

*4 岐阜大学教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

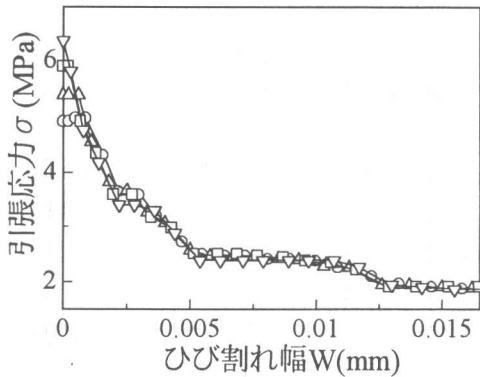


図-1 引張軟化曲線の推定

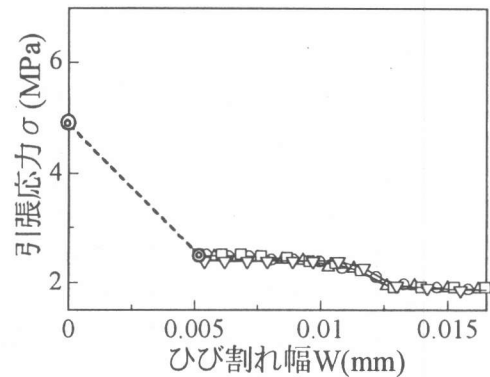


図-2 軟化開始点応力の決定

引張軟化曲線の初期部分の形状を推定するかわりにその形状を仮定することで逆に軟化開始点を決定することにした。すなわち、図-2 に示すようにひび割れ幅 0.005mm 以下の部分は直線軟化を仮定し、0.005mm 以上の部分は推定された引張軟化曲線をそのまま採用して解析で得られる荷重-変形関係と実験で得られた荷重-変形関係が一致するように軟化開始点応力を最適化することにした。以下に軟化開始点応力の具体的な決定方法を示す。

まず、適当な軟化開始点を仮定して引張軟化曲線を推定する。推定された引張軟化曲線の初期部分（図-1 において軟化開始点からひび割れ幅 0.005mm までの区間）を削除する。この初期部分は仮定する軟化開始点応力に応じて曲線の形状が変化する区間であり、適当に軟化開始点を变化させて解析すればそのひび割れ幅を求めることができる。ただし、普通コンクリートの場合、筆者らの経験では初期部分のひび割れ幅は推定された引張軟化曲線を用いた荷重-変位関係の解析で得られる最大荷重時のひび割れ先端開口変位 (CTOD) の 1/2 程度であったので、次節以降の解析では初期部分のひび割れ幅はすべて解析で得られる最大荷重時の CTOD の 1/2 とした。

次に削除した初期部分を直線と仮定し、解析で得られる荷重-変形関係と実験で得られた荷重

-変形関係が最も一致する(荷重-変位曲線下の面積差が最小となる)ように軟化開始点を定める。

2.2 軟化終了点の決定

引張軟化曲線の全形を求めるためには、軟化開始点応力の他に軟化終了点も求める必要がある。そこで軟化終了点まで推定する一つの方法として、破壊エネルギー (G_F) を用いることとした。すなわち、RILEM の試験法に準じて荷重-載荷点変位曲線を計測して G_F を求め、これと推定された引張軟化曲線下の面積が等しくなるように軟化終了点を推定した。

3. 実験概要

3.1 コンクリートの配合

本実験では粗骨材量、骨材の寸法ならびに粗骨材のモルタルとの付着特性がコンクリートの引張軟化特性に与える影響について検討することにした。

粗骨材量の影響を検討する実験 (SA シリーズ) では、モルタルマトリックスの配合を一定とし、細骨材率を 44%、72%ならびに 100%(モルタル) の 3 種類に変化させたコンクリートを用いた。

骨材粒度の影響を検討する実験 (G シリーズ) では、単位水量、水セメント比、細骨材率、最大骨材寸法を同一として、粗骨材の寸法を 15-20mm、10-20mm ならびに 5-20mm の 3 種

表-1 示方配合

シリーズ	供試体名	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
				W	C	S	G	Ad
SA	SA-44	45.0	44.0	163	362	777	1001	3.62
	SA-72	45.0	72.0	225	500	1073	422	5.00
	SA-100	45.0	100.0	271	601	1291	0	0
G	Gシリーズ	48.0	44.0	162	358	784	998	3.58
S	Sシリーズ	48.0	44.0	170	354	777	989	3.54
B	Bシリーズ	48.0	44.0	170	354	777	989	3.54

細骨材：揖斐川産川砂，比重；2.59

粗骨材：揖斐川産玉碎石，比重；2.62

混和剤：AE 減水剤

類に変化させたコンクリートを用いた。なお粒度分布は、土木学会の標準粒度分布を参考にして使用する粗骨材の範囲に換算したものをを用いた。また、細骨材の粒度の影響（S シリーズ）を検討するために、細骨材寸法 0-5mm の全粒度を使用したもの、1.2mm 未満のみ使用したものならびに 1.2-5mm のみ使用したものの 3 種類のコンクリートを用いた。

粗骨材の付着の影響（B シリーズ）は、型枠用剥離剤を塗布することでモルタルとの付着特性を低下させた粗骨材を用いて、配合条件を同一とし、粗骨材に剥離剤を全く塗布しないもの、50%ならびに 100%に塗布するものの 3 種類のコンクリートを用いて実験を行った。使用した剥離剤はフッ素系化合物を有機溶剤で混合組成したもので撥水性を有するものである。気乾状態の粗骨材を剥離剤に数分浸した後、再び乾燥させたものをを用いた。表-1 に使用したコンクリートの示方配合を示す。

3.2 供試体および載荷方法

供試体には 100×100×400 [スパン 300] mm のはり供試体を用いた。供試体は 1 条件につき 5 体作製し、載荷試験の 2, 3 日前にはり高さの 1/2 の切欠きをコンクリートカッター（厚 2.5mm）により設けた。養生は水中養生(20℃)とし、載荷試験の直前まで供試体が乾燥しないように細心の

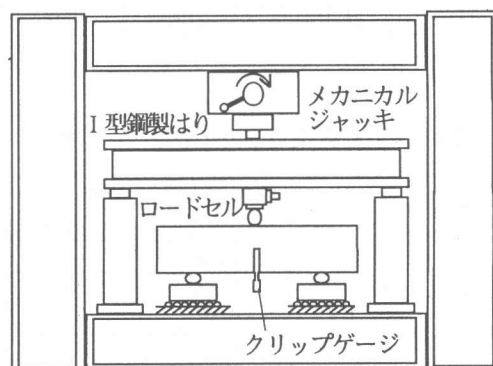


図-3 載荷試験図

注意を払った。図-3 に載荷試験図を示す。載荷試験機は、図のように手動メカニカルジャッキを取り付けた鋼製フレームに I 型鋼製はりを組み込み、剛性を高めたものを使用した。載荷方法は 3 点曲げ載荷とし、水平方向の拘束を取り除くために両支点ともローラー支持で行った。計測項目は荷重、CMOD ならびに載荷点変位の 3 項目とし、載荷はパソコン画面上の荷重-CMOD 曲線を観ながら行い、最大荷重点以降、急激に破壊が進行するような場合には、必要に応じて除荷・再載荷の操作を繰り返して計測を行った。破壊エネルギーを求めるため、最終破断点まで慎重に載荷を行った。表-2 にフレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの諸試験値を示す。

表-2 フレッシュコンクリートと硬化コンクリートの諸試験値

シリーズ	供試体名	スランブ (mm)	空気量 (%)	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	曲げ強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
SA	SA-44	10	3.9	62.3	4.19	6.49	32.3
	SA-72	130	4.6	62.6	4.54	6.59	30.5
	SA-100	160*	5.0	70.6	5.48	7.11	28.6
G	G15-20	80	3.4	50.4	4.02	6.43	30.8
	G10-20	50	3.3	51.9	3.94	6.58	30.5
	G5-20	40	4.0	50.3	4.16	6.64	29.5
S	S0-5	40	5.3	47.8	3.76	6.34	29.6
	S0-1.2	10	6.0	44.6	3.72	6.26	29.1
	S1.2-5	60	3.7	45.2	3.45	5.80	29.3
B	B-0	40	3.6	53.3	3.90	6.31	30.1
	B-50	70	5.0	42.7	3.10	4.90	27.6
	B-100	160	6.9	39.3	2.88	4.51	27.8

*)モルタルフロー値

表-3 軟化開始点応力と破壊エネルギー

シリーズ	供試体名	軟化開始点 応力(MPa)	破壊エネルギー (N/m)
SA	SA-44	5.68	122
	SA-72	5.78	90
	SA-100	6.37	67
G	G15-20	5.49	116
	G10-20	5.59	126
	G5-20	5.10	110
S	S0-5	4.31	137
	S0-1.2	4.80	122
	S1.2-5	4.80	129
B	B-0	4.90	123
	B-50	3.82	104
	B-100	2.94	127

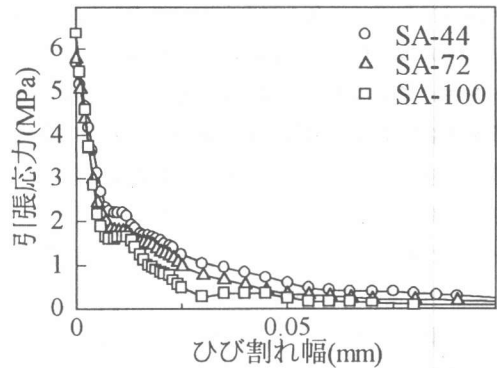
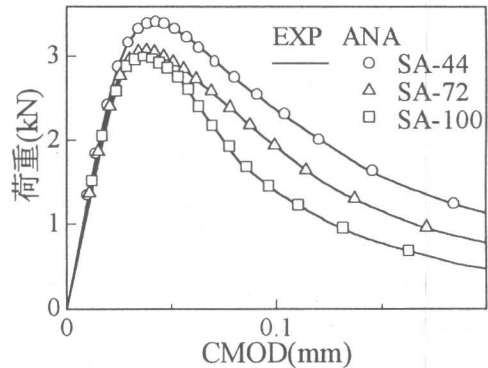


図-4 SAシリーズ

4. 結果と考察

4.1 粗骨材量の影響 (SA シリーズ)

図-4 に曲げ試験から求めたそれぞれの供試体の荷重-CMOD 曲線と推定された引張軟化曲線を示す。表-3 に全供試体の推定された軟化開始点応力と RILEM の破壊エネルギー試験法に準じて求めた破壊エネルギーを示す。引張軟化曲線の形状をみると、ひび割れ幅 0.015mm 以降で差がみられ、粗骨材量が多くなるほど応力低下が緩くなっている。また、破壊エネルギーも粗骨材量が

多くなるほど、大きな値を示している。これは、粗骨材の存在によってひび割れの偏向・屈曲など

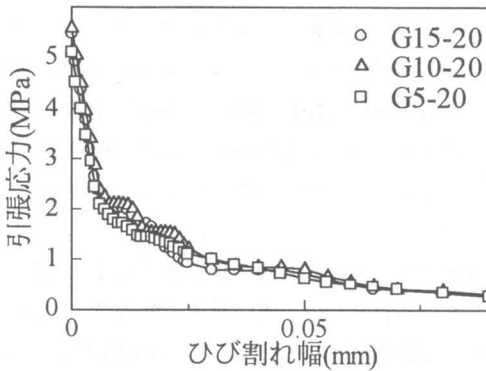
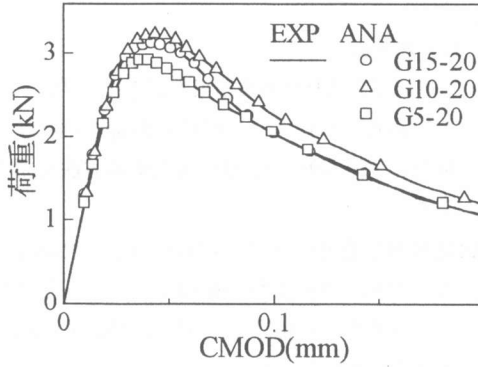


図-5 Gシリーズ

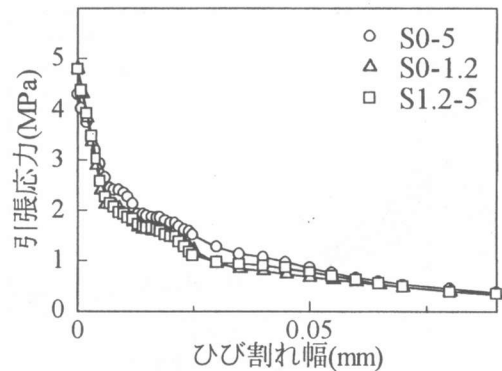
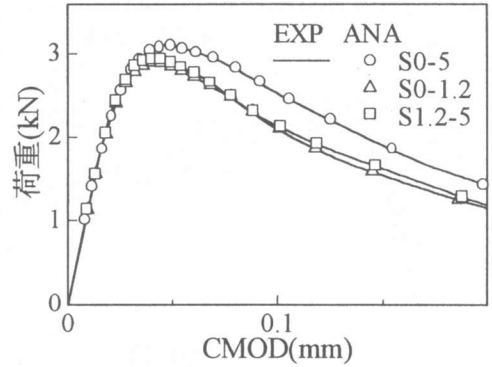


図-6 Sシリーズ

が起り易く、また粗骨材によるブリッジ作用により破壊時のエネルギー吸収が大きくなるためと考えられる。

4.2 粗骨材粒度の影響 (G シリーズ)

図-5 に曲げ試験から求めたそれぞれの供試体の荷重-CMOD 曲線と推定された引張軟化曲線を示す。推定された引張軟化曲線の形状、軟化開始点応力などにはほとんど差がみられなかった。破壊エネルギーに関しては、G10-20 供試体がわずかに大きな値となっているがそれほど明瞭な差とはいえない。これらのことから粗骨材の粒度の影響はほとんど確認できず、コンクリートの引張軟化特性には骨材の最大寸法が影響しており、粒度の影響は少ないといえる。

4.3 細骨材粒度の影響 (S シリーズ)

図-6 に曲げ試験から求めたそれぞれの供試体の荷重-CMOD 曲線と推定された引張軟化曲線

を示す。図から S0-5 供試体は荷重-CMOD 曲線において他のものに比べてわずかに荷重が高くなり、そのため引張軟化曲線も S0-5 供試体は応力がわずかに大きくなったが、粗骨材粒度の影響と同様、細骨材粒度の明確な影響は確認できなかった。

4.4 粗骨材とモルタルとの付着の影響 (B シリーズ)

図-7 にそれぞれの供試体の荷重-CMOD 曲線と推定された引張軟化曲線を示す。図から、剥離剤を塗布していない B-0 供試体は最大荷重が約 1kN 程度、剥離剤を塗布したものに比べ高くなった。しかし B-50 供試体と B-100 供試体を比較すると B-100 供試体の方が B-50 供試体を上回る結果となった。載荷試験後、供試体の破断面を観察したところ、剥離剤を塗布しなかった供試体では粗骨材自体がひび割れているものが多く確認

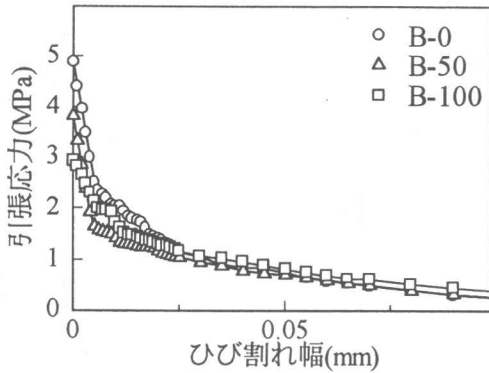
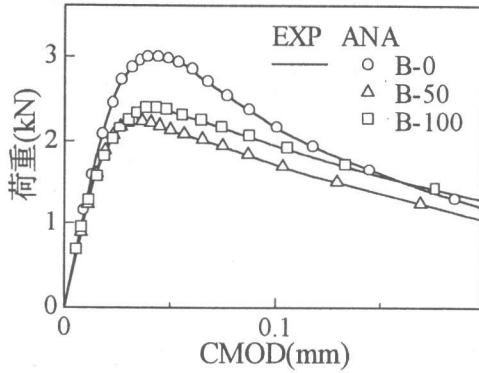


図-7 Bシリーズ

されたが、剥離剤を塗布した供試体では骨材界面で割れているものが多数認められ、それは B-50 供試体よりも B-100 供試体の方がより顕著に観られ、剥離剤により明らかに骨材の付着特性が変化していることが確認された。破壊エネルギーについては、B-50 供試体が B-0 供試体、B-100 供試体に比べ 2 割程度低くなる結果となったが、B-0 供試体と B-100 供試体を比較するとほぼ同じであり、本実験の範囲では破壊エネルギーに関する粗骨材の付着特性の明確な影響は確認できなかった。一方、引張軟化曲線については軟化開始点からひび割れ幅の 0.025mm までは明らかに剥離剤を塗布していない B-0 供試体が剥離剤を塗布したものより応力が高くなっているが、0.025mm 以降ではほとんど差がなくなっていることがわかる。このことより、骨材の付着特性の影響は軟化の初期の部分に影響し、軟化が進行するに従って、

その影響は消失するものと推察される。

5. まとめ

本研究で得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 多直線近似解析法で引張軟化曲線を推定する際に、軟化開始点応力を決定する方法を提案した。
- (2) 粗骨材量を変化させて実験を行なった結果、粗骨材量の減少に伴い破壊エネルギーが減少し、また引張軟化曲線も同一ひび割れ幅に対して応力が低下した。
- (3) 粗骨材の粒度分布を変化させて実験を行った結果、破壊エネルギーならびに引張軟化曲線には影響が現れず、荷重-CMOD 曲線にも明瞭な違いは生じなかった。また、細骨材の粒度分布についても明瞭な影響はみられなかった。
- (4) 粗骨材とモルタルとの付着特性を変えて比較試験を行ったところ、付着特性の低下に伴い引張軟化曲線の初期部分の応力は低下したが、破壊エネルギーには明確な変化はみられなかった。

〈参考文献〉

- 1) 野村希晶, 三橋博三, 新関茂: コンクリートの破壊エネルギーと引張軟化特性に及ぼす粗骨材の影響, コンクリート工学論文集, 第 2 巻/第 1 号, pp.57-65, 1991.1.
- 2) 橘高義典, 上村克郎, 中村成春: コンクリートの引張軟化曲線の多直線近似解析, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 453 号, pp.15-25, 1993.