

論文

[1052] ノッチを有するコンクリート曲げ試験体の軟化挙動

正会員 古村福次郎（東京工業大学工業材料研究所）

正会員 安部 武雄（東京工業大学工業材料研究所）

正会員○篠原 保二（東京工業大学工業材料研究所）

1. はじめに

コンクリート特有の不均一性のため、コンクリート構造物のクラック先端に、軟化領域が形成されるということは良く知られている。軟化領域とは、マイクロクラックが累積しているにも関わらず、応力伝達が可能な非線形領域である。その軟化領域内の応力分布は、変形とコンクリートの軟化特性によって決定される。従ってコンクリート内のクラック進展による破壊現象を詳細に検討する場合、引張応力下におけるコンクリートの破壊エネルギーや引張軟化曲線などの軟化特性を明らかにしていく必要がある。

本研究では、コンクリートの軟化特性を解明するための一助として、最大耐力後も安定した荷重-変位関係が測定できる曲げ試験方法を用いて、初期ノッチ深さ、載荷速度、最大骨材寸法、水セメント比及び材令がその軟化挙動に及ぼす影響について検討する。さらに、スロークラック成長と曲げ変形モードとの関係についても考察する。

2. 実験方法

2.1 試験項目と試験体の作成

試験項目は、ノッチ深さ、載荷速度、最大骨材寸法及び水セメント比の影響を検討する4項目で、試験材令は4週と1年である。各試験の実験条件を表-1に示す。

曲げ試験に用いた試験体の寸法を図-1に示す。圧縮試験に用いた試験体は100φ×200mmの標

表-1 実験条件

試験名称	ノッチ深さ (mm)	載荷速度 (mm/min)	最大骨材 寸法(mm)	水セメント比	曲げ試験体 数 1YR+4WK	圧縮試験体 数 1YR+4WK	試験項目
M20-1	10	0.005	20	0.55	3+4	3+3	ノッチ深さ の影響
M20-2	30	0.005	20	0.55	3+5	3+3	
M20-3	50	0.005	20	0.55	3+5	3+3	
M20-4	70	0.005	20	0.55	3+6	3+4	
M20-5	50	0.05	20	0.55	3+5	3+4	載荷速度 の影響
M20-6	50	0.5	20	0.55	3+5	3+3	
M05-1	50	0.005	5	0.55	3+5	3+4	最大骨材 寸法の影響
M10-1	50	0.005	10	0.55	3+5	3+4	
M15-1	50	0.005	15	0.55	3+5	3+3	
M25-1	50	0.005	25	0.55	3+5	3+4	
L20-1	50	0.005	20	0.45	3+5	3+4	水セメント比 の影響
H20-1	50	0.005	20	0.65	3+5	3+4	

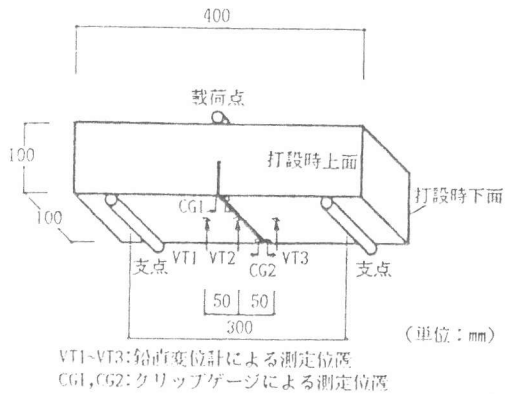


図-1 試験体寸法及び変位測定位置

表-2 コンクリートの調合表

調合名称	水セメント比	最大骨材寸法	単位重量 (kg/m <sup>3</sup> )			
			水	セメント	細骨材	粗骨材
M20	0.55	20mm	194	353	689	1054
M05	0.55	5mm	323	587	1174	---
M10	0.55	10mm	202	367	700	1020
M15	0.55	15mm	198	360	703	1037
M25	0.55	25mm	190	345	700	1071
L20	0.45	20mm	203	451	603	1054
H20	0.65	20mm	192	295	766	1037

準シリンダーである。コンクリートの調合を表-2に示す。普通ポルトランドセメントと天然骨材を使用し、目標スランプ18cmで調合した。各試験条件における曲げ試験体と標準シリンダーは同一バッチのコンクリートを使用し、各試験材令まで標準水中養生を行った。ノッチは試験直前に、厚さ1.2mmのダイヤモンドブレードによって、所定の深さに正確に導入した。

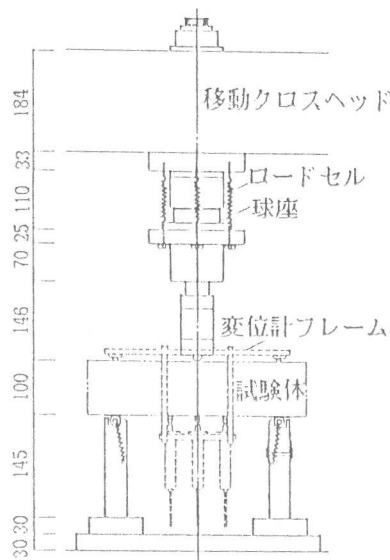


図-2 試験装置

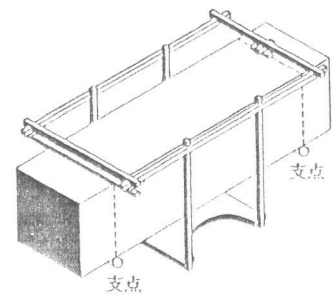


図-3 変位計フレーム

## 2.2 実験方法

実験装置を図-2に示す。全ての曲げ試験体は、インストロン型25ton試験機を用いて、一定の変位速度で載荷した。支承部の水平移動拘束を低減するために、ピンはスロット内で必要な動きができる構造となっており、支点間距離300mmを確保するスロット内側に、弱いバネによって保持されている(図-2参照)。荷重は0.4kg感度のロードセル、図-1に示す位置における鉛直変位3箇所とクラック開口変位(CMOD)2箇所は、各々、1/2000mm感度の変位計と1/2400mm感度のクリップゲージを用いて測定した。支承部のめり込みによる変位を除去するために、図-3に示すような変位計フレームを用いた。試験体の両側面におけるスロークラック成長は、デジタルマイクロメーター付きの2台の50倍光学顕微鏡で観測した。

## 3. 実験結果と考察

実験より得られた材料特性値の主なものを表-3に要約している。この表には、曲げ試験における最大荷重とその時の載荷点の鉛直変位及び破壊エネルギー、圧縮試験における圧縮強度と割線係数を示している。破壊エネルギー $G_f$ とは、荷重-載荷点変位曲線で囲まれる面積を、破壊面積で除した値である。本実験ではM05-1シリーズ以外の試験体は試験終了まで完全に破壊しなかったため、破壊エネルギーの計算には、後述するように試験体の変形を剛体の回転運動と仮定し

表-3 材料特性値

試験種別		曲げ試験			圧縮試験	
試験体 名称	試験材令	最大荷重 $L_m$ (kg)	$L_r$ 時の変位 $D_b$ (mm)	破壊エネルギー $G_f$ (kg/m)	圧縮強度 $f_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	割線弾性 係数 $E_s$ (kg/cm <sup>2</sup> )
M20-1	4-WEEK	788	0.041	(14.2)	397	$2.90 \times 10^5$
M20-1	1-YEAR	939	0.034	(15.5)	506	$3.43 \times 10^5$
M20-2	4-WEEK	471	0.039	10.4	365	$2.91 \times 10^5$
M20-2	1-YEAR	541	0.037	11.1	495	$3.41 \times 10^5$
M20-3	4-WEEK	258	0.048	10.0	400	$2.93 \times 10^5$
M20-3	1-YEAR	272	0.038	10.5	500	$3.60 \times 10^5$
M20-4	4-WEEK	97.6	0.052	9.5	401	$2.91 \times 10^5$
M20-4	1-YEAR	105	0.043	8.2	504	$3.51 \times 10^5$
M20-5	4-WEEK	264	0.042	10.9	417	$2.99 \times 10^5$
M20-5	1-YEAR	314	0.043	10.8	509	$3.46 \times 10^5$
M20-6	4-WEEK	291	0.043	10.8	387	$2.92 \times 10^5$
M20-6	1-YEAR	334	0.046	12.6	486	$3.48 \times 10^5$
M05-1	4-WEEK	239	0.046	5.7	490	$2.42 \times 10^5$
M05-1	1-YEAR	254	0.042	5.8	588	$2.77 \times 10^5$
M10-1	4-WEEK	256	0.048	9.1	421	$2.97 \times 10^5$
M10-1	1-YEAR	282	0.041	10.2	519	$3.51 \times 10^5$
M15-1	4-WEEK	256	0.044	9.2	398	$3.09 \times 10^5$
M15-1	1-YEAR	301	0.048	11.4	470	$3.62 \times 10^5$
M25-1	4-WEEK	275	0.049	16.3	374	$3.13 \times 10^5$
M25-1	1-YEAR	303	0.042	12.0	468	$3.62 \times 10^5$
L20-1	4-WEEK	293	0.044	10.6	513	$3.31 \times 10^5$
L20-1	1-YEAR	309	0.036	11.3	655	$3.75 \times 10^5$
H20-1	4-WEEK	219	0.037	8.3	300	$2.91 \times 10^5$
H20-1	1-YEAR	264	0.041	11.1	388	$3.46 \times 10^5$

て、ノッチ先端開口変位が 0.6mm (M05-1 シリーズは 0.4mm) に達するまでのエネルギーを考慮した。また、その時点でクラックは試験体の上端にまで達していたので、破壊面積はノッチ部における全断面積とし、梁軸に垂直な平面に投影した破壊域の面積を用いた。

図-4 から7 は、ノッチ深さ、載荷速度、最大骨材寸法及び水セメント比が荷重-変位曲線に及ぼす影響を比較するために、各試験シリーズの平均曲線を示している。試験材令は全て1年であり、材令4週の実験結果に関しては文献(1)に報告済みである。変位の記号は図-1 に従う。

図-5 と表-3 から、最大耐力後の抵抗力と破壊エネルギーは、リガメント長さが長くなると、増大して行くことが解る。これは、進展するクラックがより大きな抵抗を示す粗骨材に出会う可能性が高くなること、及びクラック後の粗骨材のかみ合い効果が増大することが、主要要因とし

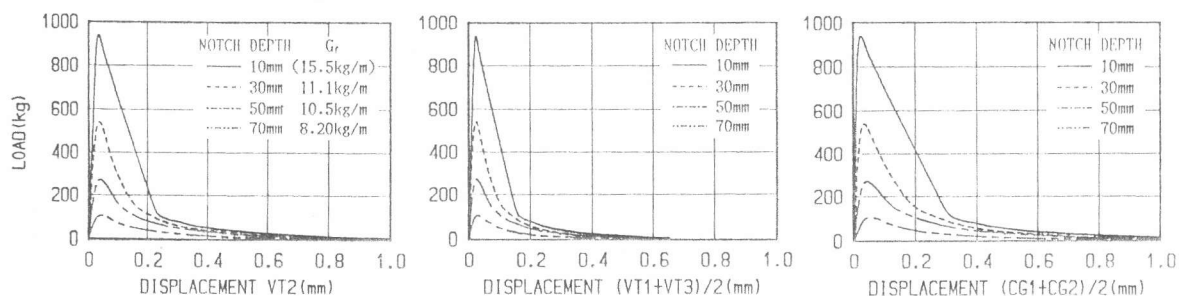


図-4 荷重-変位平均曲線 (ノッチ深さの影響)

て考えられる。ノッチ深さが10mmの試験体は、最大耐力を過ぎてから急激なクラック伝播を起こし、その間の測定点がないので破壊エネルギー( $G_f$ )を過大評価している。

最大耐力と破壊エネルギーに及ぼす荷重速度の影響は、材令4週試験の時よりも材令1年試験のほうが増大する傾向がある。(図-5及び表-3)。

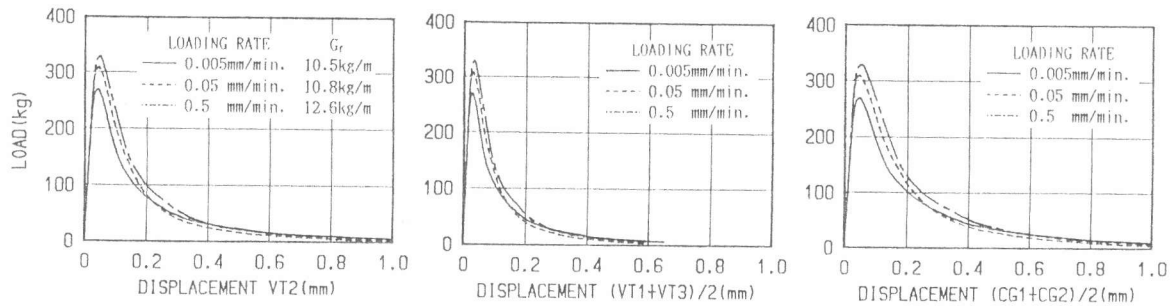


図-5 荷重-変位平均曲線(荷重速度の影響)

最大骨材寸法の影響をみると(図-6)、最大骨材寸法が大きいほど $G_f$ 値も大きくなる傾向にあるが、最大骨材寸法が10~25mmではほとんど同様な挙動を示している。最大骨材寸法が25mmの試験体は、材令4週の試験体のほうが材令1年のものより、 $G_f$ 値が大きい。これは、4週試験の試験体3体のうち2体が、クラック進展経路上に大きな骨材が入り込むことによって、最大耐力後大きな抵抗力を示したためである。破壊面に対して骨材寸法がある程度以上になると、骨材とクラック経路の位置関係により不規則な挙動を示すので、均質材料として平均的な挙動を捕らえることが困難になる。

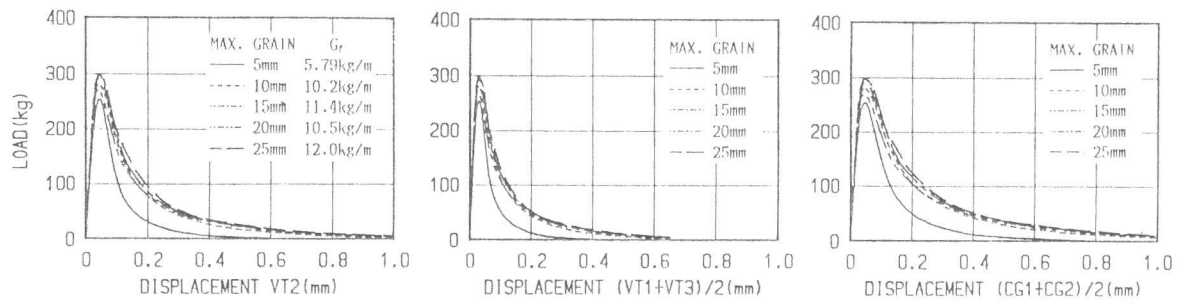


図-6 荷重-変位平均曲線(最大骨材寸法の影響)

水セメント比(W/C)の影響をみると(図-7及び表-3)、W/Cが増加に伴って、最大耐力は減少する傾向がある。しかしながら試験材令1年の $G_f$ 値は、W/C=0.65の値がW/C=0.55の値より大きくなっており、ここでも前述の骨材の存在が $G_f$ 値に大きく影響を与えている。

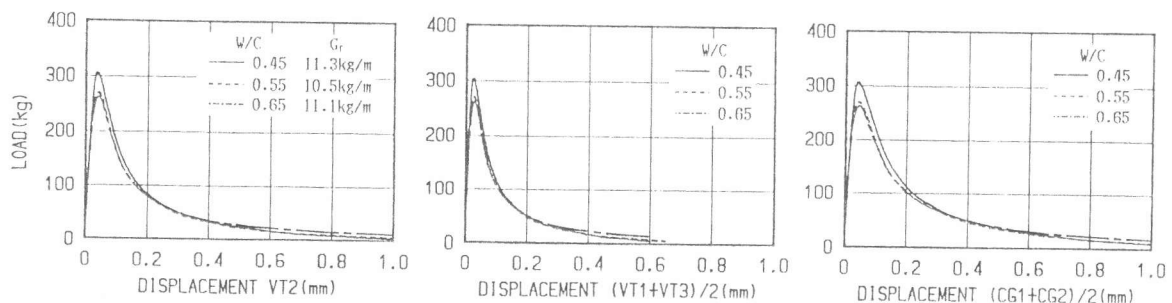


図-7 荷重-変位平均曲線(水セメント比の影響)

表-3から解るように、材令の増加により最大耐力は増加するが、その時の荷重点鉛直変位は減少する傾向がある。また、材令1年試験は、4週試験より圧縮強度は20%増加するが、 $G_i$ 値はそれほど増加していない。これは水和過程が進むと、マトリクスと骨材の強度的な差異が減少し、骨材を貫通するクラックが増加するので、より脆性的な破壊形式になるためであると考えられる。

ノッチを有するコンクリートの曲げ変形モードを剛体の回転運動と仮定すると、鉛直変位 (VT 1, 2, 3) とクラック口開口変位 (CG 1, 2) より、剛体の回転中心を求めることができる。図-8から明らかなように、たわみ角  $\theta$  は VT 1, 2, 3 及び CG 1, 2 と式 (1) の関係がある (微小変形角を仮定)。

$$\theta = \frac{VT_2}{S/2} = \frac{(VT_1+VT_3)/2}{S/3} = \frac{(CG_1+CG_2)/2}{2(r(W-a)+a+z)} \quad (1)$$

ここで、各変数の記号は図-8に従う。回転係数 ( $r$ ) はリガメント ( $W-a$ ) に対するクラック先端と回転中心間距離の比である。また、鉛直変位間の関係は次式となる。

$$(VT_1+VT_3)/2 = 2(VT_2)/3 \quad (2)$$

試験体の下面から回転中心までの距離 ( $dc$ ) は式 (3) で与えられる。

$$dc = r(W-a) + a = \frac{S(CG_1+CG_2)/2}{4(VT_2)} - z \quad (3)$$

図-9は、 $VT_2$ と $(VT_1+VT_3)/2$ の関係のある試験体について示したものであるが、式(2)の関係が成立しており、剛体の回転運動の仮定を裏付けている。図-10は式(3)で計算した $dc$ 値を開口変位 $(CG_1+CG_2)/2$ に対して示したものである。実験中、顕微鏡で観察したクラック進展長さも同図に示してある。変形が微小であるとき、式(3)による $dc$ の値はかなり大きくなっている。これは、ノッチを有する試験体の曲げ変形モードを剛体の回転運動と仮定したためである。実際の試験体は、変形の初期の段階では弾性的に挙動するので、 $VT_2$ 値は剛体運動を仮定したときより小さいためである。しかしその後、 $(CG_1+CG_2)/2$ が0.015mmからほぼ最大耐力に対応する0.04mmまで増加する間、回転中心はリガメントの中央付近に留まっている (M20-3は $r=0.49$ から $0.53$ 、M05-1は $r=0.45$ から $0.50$ )。この回転係数は、金属に対して英国標準<sup>2)</sup>で仮定している0.4より幾分大きく、その標準をコンクリートに適用すると、クラック先端開口変位を過小評価することになる。更に変形が進んで、マイクロクラックのような重大な軟化が発生すると、回転係数はもはや一定ではなく、クラック進展と共に、急速に増大することが解る。

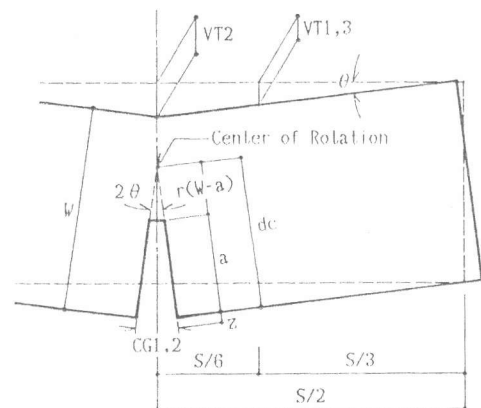
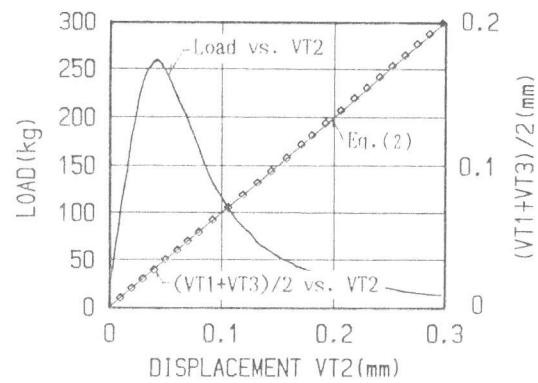
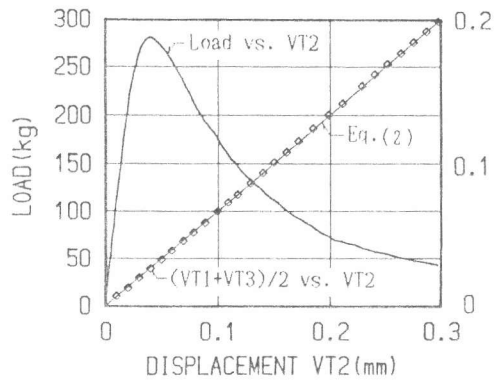
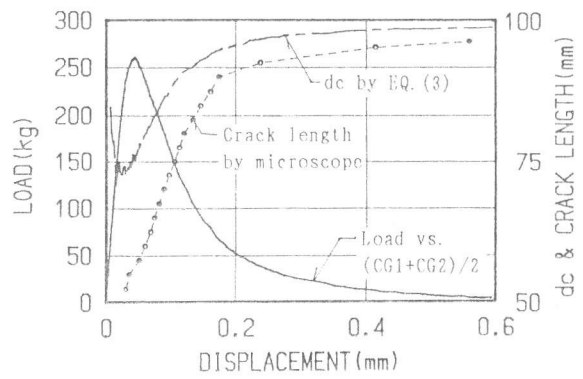
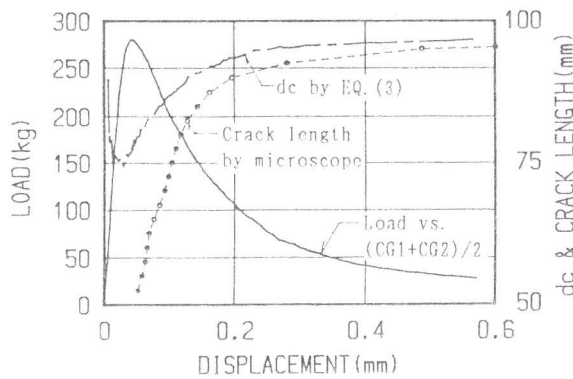


図-8 各変位間の幾何学的関係



(1) M20-3シリーズ - No. 5試験体 (材令1年)      (2) M05-1シリーズ - No. 3試験体 (材令1年)

図-9 鉛直変位  $VT_2$  と  $(VT_1+VT_3)/2$  の関係及び (2) 式との比較



(1) M20-3シリーズ - No. 5試験体 (材令1年)      (2) M05-1シリーズ - No. 3試験体 (材令1年)

図-10 開口変位  $(CG_1+CG_2)/2$  に対する (3) 式による  $dc$  及びクラック進展長さの関係

#### 4. 結論

本実験で得られた結論を以下に要約する。

- 1) 破壊エネルギーは、載荷速度、最大骨材寸法が増加するほど、また初期ノッチ深さ、水セメント比が減少するほど、増大する。
- 2) 材令に伴う破壊エネルギーの増加は、圧縮強度、曲げ強度と比べて小さい。
- 3) コンクリートの最大耐力後の軟化挙動は、骨材のクラック拘束によって大きく影響を受け、その他の影響が明確に現れないこともある。
- 4) ノッチを有するコンクリートの曲げ変形モードは、ノッチの上方のリガメント内に回転中心をもつ剛体の回転運動とみることができる。この回転中心は、最大耐力までリガメントの中央付近にあるが、その後スロークラック成長に伴って、上へ移動する。

#### [参考文献]

- 1) 古村福次郎, 安部武雄, 篠原保二, 岩城英夫, ノッチを有するコンクリート曲げ試験体の最大耐力後の軟化挙動に関する研究 (その1), (その2), (その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集A, pp. 811-816, (1989)
- 2) Methods for COD Testting, BS 5762, The British Standards Institution, London, 1979