

4. 中央部に切欠きを有するコンクリート試験体の曲げ破壊実験

Bend Test of Concrete Beam with Notch at the Center

森 浩二* 石原 誠一郎*²

内井 栄二*²

要 旨

コンクリートの破壊エネルギーを求めるため、中央部に切欠きを設けたコンクリートブロックの曲げ破壊試験をJCIコンクリート破壊特性調査委員会素案に基づいて行った。その結果、コンクリートのひずみ軟化域においても、安定した荷重変形関係を得ることができた。しかし、試験体破断時の切欠き開口変位は個々の試験体による差異が大きく、その変位から求められる破壊エネルギーの値にばらつきがあるため、破壊エネルギーの評価方法についても検討を行った。

キーワード：コンクリート／ひび割れ／破壊エネルギー／Mode I

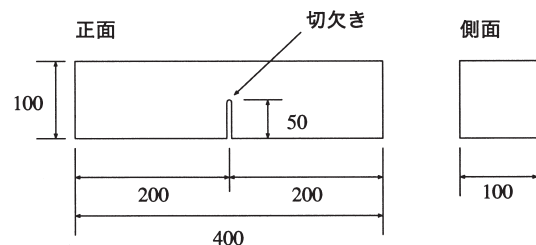
1. はじめに

分散ひび割れモデルを用いたコンクリート材料の有限要素解析では、局所的なものと考えられるひび割れをエネルギー的に等価な仮想的なひずみに置き換える。したがって、ひび割れが発生することによって消費されるエネルギーを知っておく必要がある。このエネルギーは材料によって定まる値、すなわち材料定数であるとの説が有力であり、材料試験によって求めることができると考えられている。

材料試験を行うには、ひび割れ破壊の形式を限定する必要があるが、ここでは Mode I のひび割れを対象とする。Mode I とは3種類あるといわれているひび割れ発生機構のうち、もっとも普遍的に見られる引っ張りにより生じるひび割れ破壊を指す。Mode I の破壊は、せん断に起因すると考えられている残りの2つのモードに比べ、メカニズムが明解であること、再現することが容易なことから、このモードについては多くの研究がなされている。

RILEM(国際材料構造試験研究機関連合)ではMode I に相当する破壊の際に消費されるエネルギーを求めるため、コンクリートブロックの曲げ破壊試験を標準試験法として定めている。しかし、実験規模が大きく実施が困難なため、より簡易な試験方法がJCI(日本コンクリート工学協会)コンクリート破壊特性調査委員会によって提案されている。

ここではJCI委員会案によるコンクリートブロックの曲げ破壊実験を行った、その結果について述べる。



図－1 試験体

表－1 試験体一覧

名 称	質 量 (g)	切欠き幅 (mm)	切欠き深さ (mm)
UTJF1-3	8999.0	2.83	48.43
UTJF1-4	8852.3	2.87	48.51
UTJF1-5	8861.4	2.82	48.64

2. 実験方法

実験はJCIコンクリート破壊特性調査委員会の「プレレンコンクリートの破壊エネルギー試験法(案)」(以下JCI委員会案とする)に基づいて行った。

2.1 試験体概要

試験体は図－1に示す100×100×400mmの矩形断面コンクリート角柱に、長手方向下面中央にダイヤモンドカッターで幅3mm深さ50mmの切欠きを設けたものである。試験体一覧、使用材料、調合表、材料試験結果を表－1～表－4に示す。

2.2 荷重装置

荷重装置の概要を図－2に示す。荷重には容量200kNのアクチュエータを用い、アクチュエータのシリンダストローク変位による荷重制御とした。

*建築構造研究室 *²建築工法・材料研究室

表－２ 使用材料

材 料	規格・性状 他
セメント	普通ポルトランドセメント
細骨材	山砂（城陽産），表乾密度 2.56g/cm ³ ， 粗粒率 2.80，吸水率 1.96％
粗骨材	碎石 1505（高槻産硬質砂岩）（G _{max} =15mm）， 表乾密度 2.67g/cm ³ ，吸水率 0.77％，実積率 57％

表－３ 調合表

骨材寸法 (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量			
			水	セメント	粗骨材	細骨材
15	60	51.1	186	310	876	878

表－４ 材料試験結果

圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	割線弾性係数 (N/mm ²)
30.4	2.47	2.80×10^4

2.3 試験体の境界条件

図－３に試験体の支持および載荷の状態を示す。載荷点は試験体の長手方向の中央とし、載荷スパンを300mmとした。

載荷点および支点到モーメントが作用しないように、図－４に示す治具をアクチュエータと試験体との境界、および載荷床と試験体との境界にそれぞれ設置した。載荷点の治具は図－３の面内方向の回転および面外方向の回転の自由度を、支承Aは水平方向の変位と面内方向の回転の自由度、支承Bでは支承Aに加え面外方向の回転の自由度を有するものとしている。

2.4 載荷速度および計測

載荷は0.002mm/secの一定速度（アクチュエータのシリンダストローク変位）で行い、計測サンプリング周波数は20Hzとした。

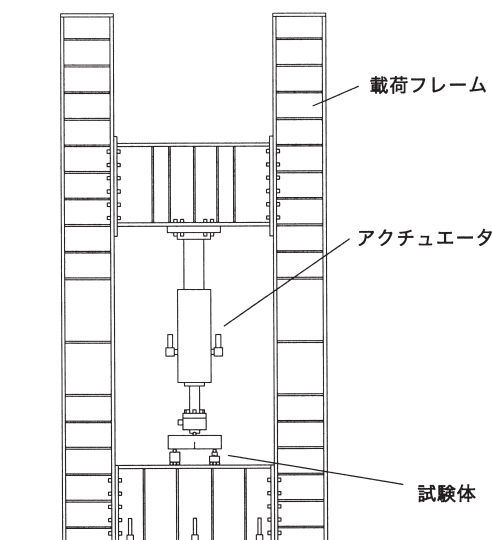
計測項目は、アクチュエータヘッドに取り付けたロードセルの荷重、シリンダストローク変位および、試験体下部の切欠きの幅（図－３奥行き方向両端部）とした。切欠き幅の変位は、図－５のように切欠きの端部に接着剤を用いて金属製の取付コマを貼り付け、クリップ型の変位計を用いて計測を行った。

3. 実験結果

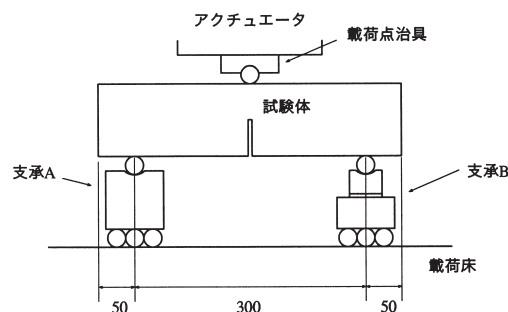
各試験体における、荷重と切欠き幅の変位（CMOD）の関係を図－６に、最大荷重と試験体破断時の切欠き幅の変位（CMOD_c）を表－５に示す。JCI委員会案では試験体破断の定義が明確でないため、ここでは自重により試験体が落下した時点を破断とした。

3.1 破壊状況

いずれの試験体も、亀裂は切欠きの先端部に発生し載

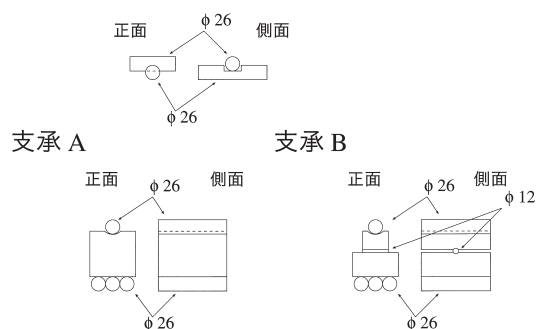


図－２ 載荷装置



図－３ 試験体と支承

載荷点治具



図－４ 支承

荷点に向かって進展した。

試験体UTJF1-4, UTJF1-5についてはアクチュエータヘッド部の荷重の計測値がほぼ0となった段階で、自重により試験体が落下するという現象が観察された。一方、試験体UTJF1-3については荷重が0付近の状態を維持し、計測可能な範囲内では、破断した試験体が自重で落下するという現象は観察されないという違いが見られた。

3.2 制御の精度

載荷制御の各時点について、10秒間のストローク変位の一次近似に対する偏差を求めた。最大荷重以後につい

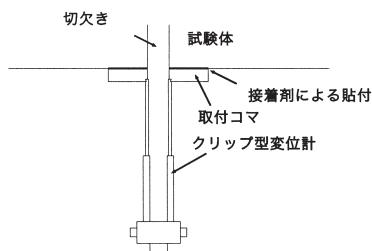


図-5 切欠き幅の計測

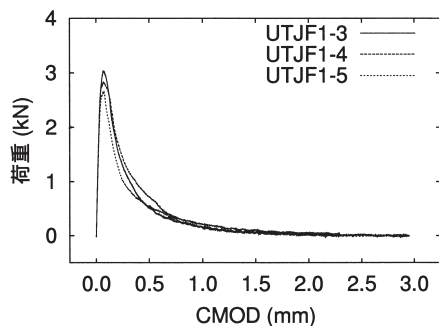


図-6 荷重-CMOD関係

表-5 実験結果一覧

試験体名	最大荷重(kN)	破断(mm)
UTJF1-3	3.03	(3.0)*
UTJF1-4	2.83	2.5
UTJF1-5	2.64	2.3

*試験体UTJF1-3では計測範囲を越えたので計測上の最大値としている

でもストローク変位の偏差は±0.01mm以内となり、軟化挙動の際にも安定した载荷制御が行われたことが確認された。

3.3 ひび割れ開口変位 (CMOD)

図-7に経過時間に対するひび割れ開口変位 (CMOD) の状況を示した。150秒付近は最大荷重点に相当する。载荷開始から最大荷重に至るまでの間のストローク変位とCMODとは非線形の関係にあるが、最大荷重以後は線形関係にあったことがわかる。このことは、最大荷重以後の変形が主に試験体中央断面で生じており、それ以外の部位はほとんど変形していないと考えられる。

4. 破壊エネルギー

4.1 破壊エネルギーの導出

図-8に破壊エネルギー算定の概念を表した。X-軸は载荷点の下降変位を表し、Y-軸は载荷点で計測される荷重を表す。実線で表した曲線が実験で得られる荷重-変形関係であり、この曲線とX-軸とで囲まれる領域の面積 W_0 がアクチュエータが試験体に対して行った仕事に相当する。

また、試験体には自重や载荷治具の重さによる一定の

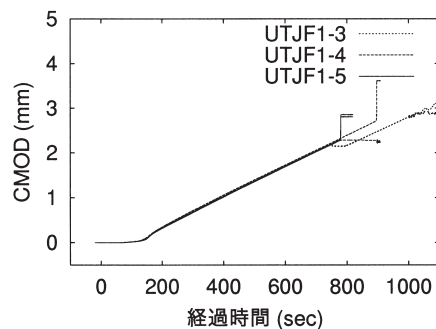


図-7 CMODの推移

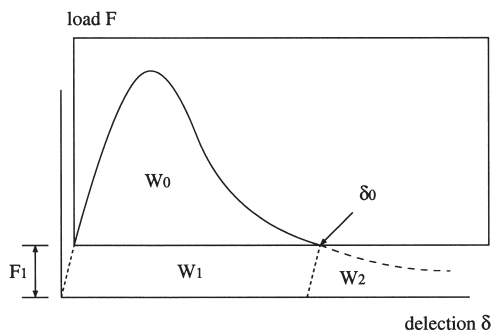


図-8 破壊エネルギー

荷重が生じているため、実際の破壊曲線は図の点線および破線部分を加えたものであると考えられる。試験体破断 (変位 δ_0) までにこれらの荷重が行った仕事は面積 W_1 に相当する。 δ_0 以降の荷重-変形関係は実験では得られないが、Petersonによれば $W_2 \approx W_1$ である。したがって、試験体の破壊エネルギーの総計を W とすると下式のようなになる。

$$W = W_0 + W_1 + W_2 \approx W_0 + 2W_1 \quad (1)$$

さらに W_1 は下式によって求められる。ただし、 m_1 は载荷スパン内側部分の試験体の質量、 m_2 は载荷治具の質量、 g は重力加速度を表す。

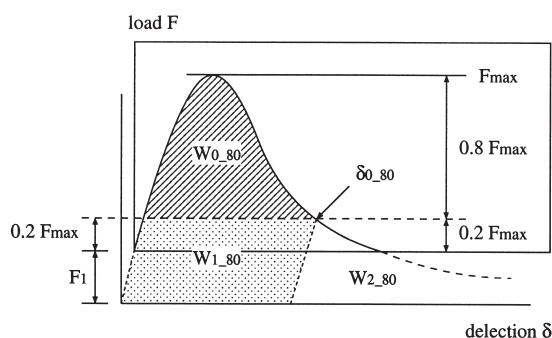
$$W_1 = \left(\frac{1}{2} m_1 + m_2 \right) g \delta_0 \quad (2)$$

コンクリートの破壊エネルギー G_f は W をリガメントの面積 A_{lg} で除いたものであり、式(2)を代入するとRILEMの算定式が導かれる。

$$G_f = \frac{W_0 + 2W_1}{A_{lg}} = \frac{W_0 + (m_1 + 2m_2)g\delta_0}{A_{lg}} \quad (3)$$

JCI委員会案では、試験体について破断面以外の部分は剛体であると仮定し、下式のように幾何学的にひび割れ開口変位(CMOD) d と载荷点の下降変位 δ との関係を定めている。(ただし载荷スパン S は試験体の高さ D の3倍と規定している。 $S/D=3.0$)

$$\delta = \frac{1}{4} \frac{S}{D} d = \frac{3}{4} d \quad (4)$$



図－9 荷重閾値を設定した場合の破壊エネルギー

4.2 破断時のひび割れ開口変位 (CMOD_c) の定義

試験体が自重によって落下した時点を経済破断の定義とした場合、破断時の変位 δ_0 が試験体の荷重－変形関係と独立に観測される値となる問題がある。UTJF1－3について、荷重が0となった後も試験体が落下しないという現象が見られたように、荷重－変形関係から予想される最終破断と、試験体が落下する時期が一致しない場合がある。

そこで、荷重の低下した割合に関連付けた最終破断の定義を試みた。図－9 は荷重 F が最大荷重 F_{max} に対して80%低下した時点を経済破断と定義した場合の破壊エネルギーの算定方法である。

同様の定義により、90%、95%、98%、99.9% 低下時を経済破断とした場合の CMOD_c および各エネルギーを算定し、その結果を表－6 に示した。試験体落下時を経済とした場合の算定結果も最終として併記した。いずれの試験体も、荷重の閾値を99.9%とした場合と最終の場合についても W_1 の値には差異が見られる。

図－10に各算定条件での破壊エネルギーの総計を示す。図中黒の印は閾値を設定しない場合の算定結果である。図からわかるように、閾値を設定した場合の破壊エネルギーの算定結果は変動が少なく、Peterson による仮定が妥当であることを示している。それに対し、閾値を設定しない場合の破壊エネルギーの値は閾値を設定した場合に比べて大きく上回っており、破断時の最終変位が過大評価となっていると考えられる。

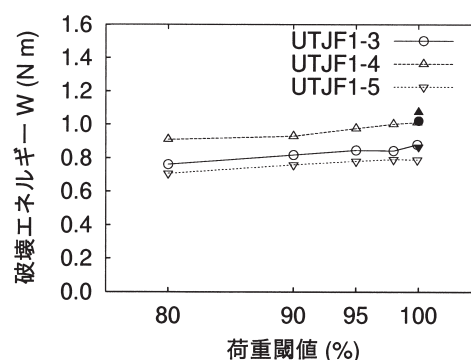
5. まとめ

コンクリートの破壊エネルギーを算定するため、JCI委員会案に基づいた実験を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) CMOD による制御ではなく、アクチュエータのストローク変位による制御を行った場合でも安定した荷重－CMOD 関係を得ることができる。
- (2) 試験体が自重により落下した時点の CMOD は、ば

表－6 荷重閾値と算定された破壊エネルギー

UTJF1－3	80%	90%	95%	98%	99.9%	最終
CMOD _c (mm)	0.45	0.70	1.00	1.32	2.16	(3.00)
W_0 (Nm)	0.526	0.607	0.656	0.682	0.709	0.714
W_1 (Nm)	0.118	0.106	0.095	0.081	0.086	0.154
W (Nm)	0.761	0.818	0.846	0.843	0.880	1.022
G_f (N/m)	146	157	162	162	169	196
UTJF1－4	80%	90%	95%	98%	99.9%	最終
CMOD _c (mm)	0.58	0.82	1.21	1.74	2.47	2.51
W_0 (Nm)	0.622	0.694	0.756	0.796	0.820	0.821
W_1 (Nm)	0.144	0.118	0.110	0.103	0.096	0.127
W (Nm)	0.910	0.930	0.976	1.002	1.013	1.075
G_f (N/m)	174	178	187	192	194	206
UTJF1－5	80%	90%	95%	98%	99.9%	最終
CMOD _c (mm)	0.51	0.77	1.08	1.49	2.00	2.29
W_0 (Nm)	0.468	0.548	0.593	0.620	0.632	0.635
W_1 (Nm)	0.120	0.106	0.094	0.086	0.078	0.116
W (Nm)	0.707	0.759	0.781	0.792	0.789	0.867
G_f (N/m)	135	145	150	152	151	166



図－10 荷重閾値と算出される破壊エネルギー

らつきが大きく、破壊エネルギー算定のための CMOD_c とするのは適当ではない。

破壊エネルギー算定のためには荷重-変形関係に関連付けた CMOD_c の数値的な定義が必要だと思われるため、今後、検討を行っていく予定である。

[参考文献]

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの破壊特性の試験方法に関する調査研究委員会報告書，2001年5月
- 2) 土木学会：コンクリートの寸法効果と引張軟化曲線，平成9年
- 3) RILEM: Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams, 1985
- 4) Van Mier, J.G.M.: Fracture Process of Concrete, CRC Press, 1997
- 5) Peterson, P.-E.: Crack growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials, Report TVBM-1006, Lund Institute of Technology, Sweden, 1981