

三軸応力下におけるコンクリート中の水分の影響 を考慮した動的破壊基準の定式化について

森 孝二*1, 中山 淳*2, 藤掛一典*2, 大野友則*2

*1 航空自衛隊 西部航空施設隊 第2作業隊

*2 防衛大学校 システム工学群 建設環境工学科

衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリート構造物の耐衝撃設計法を確立するためには、その構成材料であるコンクリートの力学的特性を把握することが重要である。著者らは、既往の研究において、コンクリートの相対含水率および載荷速度をパラメータとする急速割裂載荷試験ならびに急速一軸圧縮載荷試験を行い、動的引張および一軸圧縮強度に水分が及ぼす影響について定量的な評価を行った。しかしながら、実構造物は、種々の荷重の作用や鉄筋等の拘束によって複雑な多軸応力状態にあると考えられることから、多軸応力下におけるコンクリートの力学的特性に水分が及ぼす影響について調べる必要があると言える。そこで本研究では、相対含水率、側圧および載荷速度をパラメータとする急速三軸圧縮載荷試験を行い、水分の影響を考慮した動的破壊基準を定式化することを目的としている。

キーワード：急速三軸圧縮載荷試験，相対含水率，有効応力，間隙圧，動的破壊基準

1. はじめに

衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリート構造物の安全性を調べ、耐衝撃設計法を確立するためには、まずはその基礎的データとなる高ひずみ速度下におけるコンクリート材料の力学的特性を定性的・定量的に把握することが重要である。この観点から著者ら¹⁾は、コンクリート中の水分に着目し、相対含水率および載荷速度をパラメータとする急速割裂載荷試験ならびに急速一軸圧縮載荷試験を行い、①コンクリートのひずみ速度効果による圧縮強度および引張強度の増加率は、コンクリート中の水分量に大きく依存する。また、②載荷速度や水分量が及ぼす影響は、圧縮強度に比べて引張強度の方が顕著である。さらに、③コンクリート中の水分の影響を考慮した動的圧縮および引張強度増加率とひずみ速度の関係を定式化し、定量的な評価を行ったことを報告している。

しかしながら、実際の鉄筋コンクリート構造物中の内部応力が一軸応力状態にあることは極めて特殊な場合であり、自重による死荷重だけでなく種々の荷重の作用を受け、しかも帯鉄筋やせん断補強鉄筋などの拘束によ

てコンクリートは複雑な多軸応力状態に置かれていると考えられる。多軸応力下におけるコンクリートの力学的特性にひずみ速度が及ぼす影響を調べた研究は、特殊な試験装置を必要とするために極めて少なく、山口ら²⁾、藤掛ら³⁾による研究があるに過ぎない。藤掛らは、既往の研究においてコンクリートの圧縮強度、側圧、ひずみ速度をパラメータとする急速三軸圧縮載荷試験を行い、ひずみ速度が三軸応力下の最大応力に及ぼす影響は作用応力状態によって大きく異なり、必ずしもひずみ速度のみが最大応力を増加させる要因ではないことを指摘している。しかし、高ひずみ速度・三軸応力下のコンクリートの力学的特性もコンクリート中の水分によって大きく影響を受けると考えられるが、その影響について把握するには至っていない。

したがって、三軸応力下における破壊曲面にひずみ速度が及ぼす効果に関する力学的メカニズムの解明や動的構成モデルによってコンクリートの挙動を適切にあらわすためには、コンクリート中の水分が、高ひずみ速度ならびに三軸応力下における破壊基準に及ぼす影響を定性的・定量的に調べることが重要であると考えられる。

表-1 コンクリートの配合

水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					空気量 (%)	スランプ (cm)
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE 減水剤 (cc)		
65	55	205	315	926	781	945	4.4	19.5

表-2 試験パラメータ

相対含水率 (%)	0 (35)		50 (6)		100 (0)	
載荷速度 (1/sec)	静的 (1.2×10 ⁵)		低速 (3.7×10 ²)		中速 (3.2×10 ¹)	
設定側圧 (N/mm ²)	レベル0 (0)		レベル1 (5)		レベル2 (25)	
					レベル3 (45 or 60)	

そこで本研究では、相対含水率、側圧、載荷速度(ひずみ速度)をパラメータとする急速三軸圧縮載荷試験を行い、コンクリート中の水分が動的圧縮強度特性に及ぼす影響を定量的に評価し、水分の影響を考慮した動的破壊基準を定式化することを目的としている。

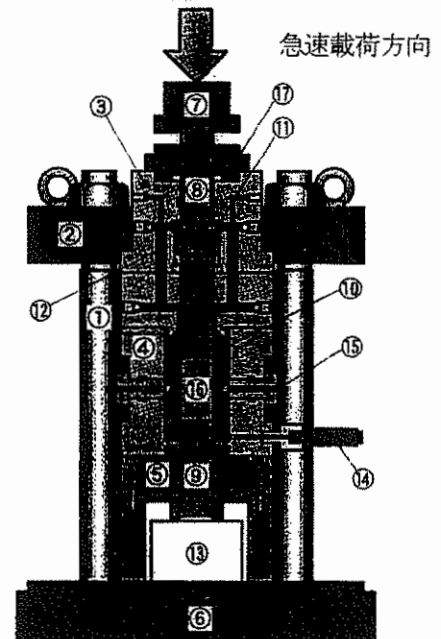
2. 急速三軸圧縮載荷試験概要

(1) 試験パラメータ

本試験に使用した供試体の水セメント比は 65% であり、寸法は直径 50mm、高さ 100mm である。今回の配合を表-1 に示す。コンクリートの材料は、普通ポルトランドセメント(密度 3.16 g/cm³)を使用し、細骨材には山砂(岩井寺産、密度 2.57 g/cm³、吸水率 2.02%)を、粗骨材には最大粗骨材寸法 10(mm)の硬質砂岩砕石(青梅産、密度 2.65 g/cm³、吸水率 0.54%)をそれぞれ使用した。

試験パラメータを表-2 に示す。相対含水率は 0% (完全乾燥供試体)、50% (半乾燥供試体)、100% (湿潤供試体) の 3 種類であり、()内の数値は各相対含水率を設定するために必要な乾燥時間である。既往の研究¹⁾と同様に、相対含水率は水中養生した供試体を 105±3°C の乾燥炉に入れ、完全乾燥させることにより失われる脱水重量を求め、任意の乾燥時間における水分量の割合を相対含水率として評価している。載荷速度は、静的、低速、中速、高速の 4 種類であり、()内の数値は各載荷速度に対応して得られた本試験におけるひずみ速度 (1/sec) の平均値である。ひずみ速度は、載荷軸方向の供試体変形量から求まるひずみを用いて、載荷開始点から最大圧縮応力点を結ぶ直線の勾配でひずみ速度を用いている。また側圧は、レベル 0 からレベル 3 の 4 種類であり、()内の数値をそれぞれ設定した。なお、レベル 0 は、単純一軸圧縮載荷試験を意味する。

各試験における試験ケースは、(相対含水率の種類)×(載荷速度の数)×(設定側圧の数)=3×4×4=48 ケースである。試験は、一軸圧縮載荷試験については 6 回、その他のケースについては 3 回づつ行っている。試験時の材



番号	名称	番号	名称
①	耐圧ロッド	⑩	メインチャンバー
②	耐圧プレート	⑪	上部チャンバー
③	上部セル	⑫	連結管
④	中央部セル	⑬	ロードセル
⑤	下部セル	⑭	高圧用圧力変換器
⑥	ベースプレート	⑮	SG用取出し端子
⑦	加圧板	⑯	供試体
⑧	上部載荷棒	⑰	緩衝材
⑨	下部載荷棒		

図-1 三軸圧縮セルの断面図

齢は、35~43 日であり 100%、50%、0% の順で各相対含水率毎に試験を行った。

(2) 試験方法

急速三軸圧縮載荷試験は、サーボ制御式急速載荷装置(最大載荷力 980kN、最大載荷速度 4m/sec) に三軸圧縮載荷装置を組み込んで行っている。図-1 に三軸圧縮セルの断面図を示す。載荷は、三軸圧縮セル内のオイルチャン

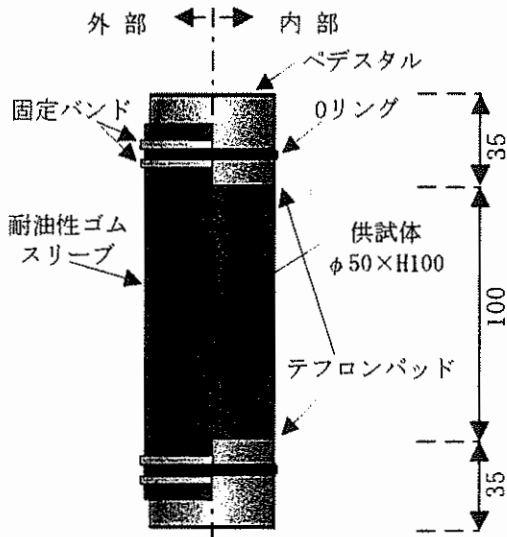


図-2 供試体の概略図 (数値:mm)

パー油圧を側圧一定保持装置のポンプユニットによって所定の側圧まで静水圧載荷し、所定の側圧に達した後は、側圧を一定に保持した状態で速やかに急速載荷装置によって各設定速度で軸方向載荷を行っている。試験にあたっては、供試体内部にオイルが侵入することを防止するために、図-2の概略図に示すように、供試体を耐油性ゴムスリーブ(厚さ2.0mm、内径50mm、長さ150mm)で被覆した。さらに、ゴムスリーブ両端は上下の鋼製ペDESTAL(供試体受け皿)まで覆って、耐油性固定バンドで締め付けている。また、上下の鋼製ペDESTALにはオイルの侵入を防ぐためのOリングを設置している。供試体と上下の鋼製ペDESTALの間には、端面摩擦を極力小さくする目的からテフロンシート($t=0.05\text{mm}$)2枚の間にシリコングリースを塗布したテフロンパッドを挿入している。

本試験における計測項目は、供試体に作用する軸方向荷重および側圧、ならびに供試体の軸方向の変形量である。軸方向荷重は三軸圧縮セル下部に設置したロードセル(図-1⑬)で、側圧はオイルチャンバー内に取り付けられている高圧用圧力変換器(⑭)で、供試体の軸方向変形量は耐圧プレート(②)上に設置したレーザー式非接触変位計でそれぞれ計測している。

3. 試験結果および考察

(1) 水分の影響を考慮した静的破壊基準の定式化

多軸応力下の応力空間で、最大耐力に達する点の集合は破壊曲面と呼ばれ、破壊曲面を応力状態の関数として定義したものが破壊基準である⁴⁾。ここでは、本試験結果を基に水分の影響を考慮した静的破壊基準の定式化に

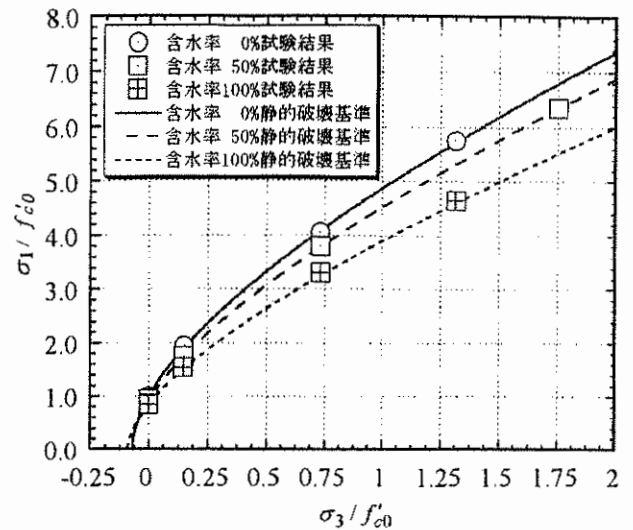


図-3 静的三軸試験結果と破壊基準

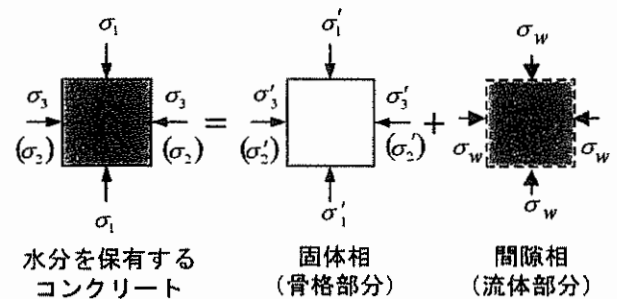


図-4 固体相と間隙相に分割した模式図

ついて検討を行う。

各相対含水率に対する静的三軸圧縮載荷試験で得られた最大圧縮応力点での応力状態($\sigma_1, \sigma_2 = \sigma_3$)を、相対含水率0%の静的一軸圧縮強度 $f_{c0} = 34.2\text{N/mm}^2$ で割って無次元化した結果を図-3に示す。図中に示した試験結果は各ケースの平均値である。

これより、①側圧($\sigma_2 = \sigma_3$)が大きくなるほど最大圧縮応力(σ_1)が大きくなること、②同じレベルの側圧下においては相対含水率が大きくなるほど最大圧縮応力が低下することからコンクリート中の水分が最大圧縮応力の大小に大きな影響を及ぼしていることが分かる。

Imranら⁵⁾も水セメント比が40%、55%、75%の3種類の円柱供試体(寸法:直径54mm、高さ108mm)に対し、供試体中の水分量を乾燥、湿潤の2種類の状態に設定した静的三軸圧縮載荷試験を行い、本試験結果と同様に乾燥状態にあるものよりも湿潤状態にあるものの方が水セメント比の大小に関わらず各側圧で最大圧縮応力が低下することを報告している。

ここで、図-4に示すように水分を保有するコンクリートを、固体相(骨格部分)と間隙相(水分や空気等の流体部

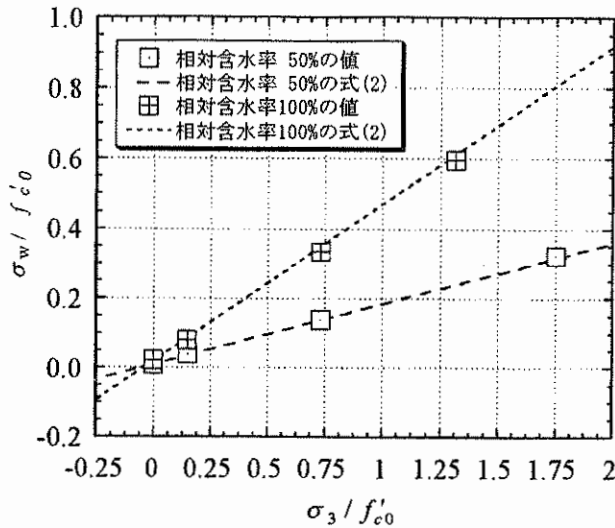


図-5 間隙圧と側圧の関係

分)からなる 2 相体に分割してモデル化する。また、全応力 σ に対して固体相には有効応力 σ' 、間隙相には間隙圧 σ_w がそれぞれ作用すると考える。

さらに水分を保有するコンクリートの破壊基準は、有効応力による骨格部分の破壊基準で決定されると考え、また骨格部分の破壊基準は相対含水率 0%の破壊基準で表されると考える。すなわち、骨格部分の強度は、周辺に存在する水分によって変わらないと仮定する。

このように考えると、任意の相対含水率における破壊基準は、コンクリートや岩石のような静水圧依存性材料に対する慣用の破壊基準である Leon モデル⁶⁾を有効応力表示することによって、次式で与えられる。

$$f(\sigma_1, \sigma_3, \sigma_w) = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{f'_{c0}} \right)^2 - m \left(\frac{\sigma_3 - \sigma_w}{f'_{c0}} \right) - 1 = 0 \quad (1)$$

(1)式中で、 $m = (1 - h^2)/h$ 、 $h = f_t/f'_c$ である。なお、間隙圧の影響を考慮しない相対含水率 0%は、 $h = 0.071$ で試験結果とよく適合した。

次に、相対含水率 50%、100%の試験結果を(1)式に代入し、相対含水率 w をパラメータとして間隙圧と側圧の関係を求めたところ、次式を得た。

$$\frac{\sigma_w}{f_{c0}} = \left(2.0 \times 10^{-5} w + 2.5 \times 10^{-3} \right) w \left(\frac{\sigma_3}{f_{c0}} \right) + 2.0 \times 10^{-4} w \quad (2)$$

試験結果および(2)式から求めた間隙圧と側圧の関係を相対含水率毎に図-5に示す。これより、間隙圧は側圧の増加に伴い直線的に増加することがわかる。また、そ

の増加する割合は相対含水率が大きくなるほど大きくなっている。これは、側圧が増加するほど空隙の体積が収縮するために間隙圧が増加するためであると考えられる。

次に、(2)式の関係をも(1)式に代入して与えられる静的破壊基準を図-3中に相対含水率毎に示す。本提案式は、試験結果と良い一致を示していることがわかる。すなわち、任意の相対含水率に対する静的破壊基準は、骨格に作用する有効応力に基づく破壊基準によって表すことができるといえる。

(2) 水分の影響を考慮した動的破壊基準の定式化

相対含水率 0%、50%、100%の急速三軸圧縮載荷試験で得られた最大圧縮応力点での応力状態を f'_{c0} で割って無次元化した関係を図-6、7、8に示す。各図中に示した試験結果は各ケースの平均値である。

これより、相対含水率 0%では側圧および載荷速度が大きくなるほど最大圧縮強度は大きくなる傾向が認められる。一方、相対含水率 50%および 100%では載荷速度およびその時の応力状態に依存して、静的載荷時における最大圧縮応力と比較して大小異なる状態が存在している。すなわち、低側圧の領域においては相対含水率 0%と同様の傾向を示すが、高側圧になるにしたがって静的三軸圧縮載荷試験結果と比較して軸方向最大圧縮応力が小さくなる傾向を示している。

三軸応力下におけるコンクリートの力学的特性にひずみ速度が及ぼす影響について調べた山口ら²⁾は、圧縮強度が 24.5(N/mm²)のコンクリートを用い、最大ひずみ速度 2.5×10^{-1} (1/sec)までの急速三軸圧縮載荷試験を行った結果から、動的な破壊曲面はひずみ速度に応じて等方的に拡大すると報告しており、本試験結果における相対含水率 0%と同様の傾向であるといえる。一方藤掛ら³⁾は、圧縮強度が 37.4、46.2、85.6(N/mm²)のコンクリートを用い、最大ひずみ速度 2.0×10^0 (1/sec)までの急速三軸圧縮載荷試験を行った結果から、最大圧縮応力は載荷速度およびその時の応力状態に依存して静的載荷時の最大圧縮応力の比較して大小異なる状態が存在することを報告しており、本試験結果における相対含水率 50%、100%と同様の傾向であるといえる。

これらのことから、コンクリート中の水分の相違は、とくに高ひずみ速度・高側圧下におけるコンクリートの挙動に大きな影響を及ぼすといえる。

ここで、静的破壊基準と同様に水分を保有するコンクリートを固体相と間隙相の 2 相体に分割して動的破壊基準を検討する。定式化には Leon モデルを準用して、骨格部分に相当する相対含水率 0%の動的破壊基準は、動的な一軸圧縮強度点および動的引張強度点を必ず通るといふ条件を与え、また流体部分の間隙圧は、ひずみ速度の

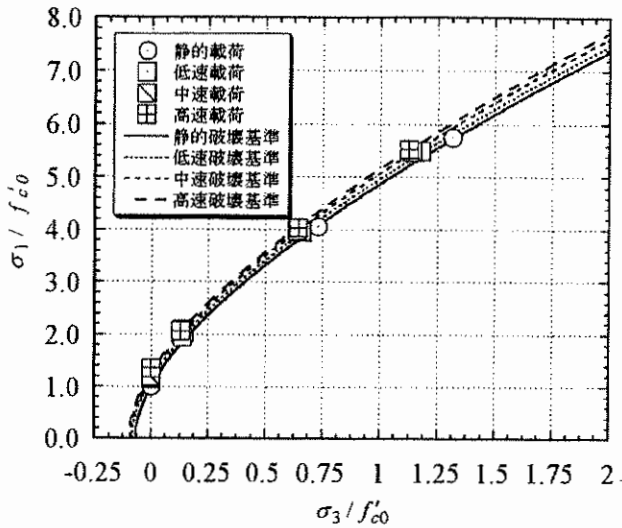


図-6 相対含水率0%の試験結果と動的破壊基準

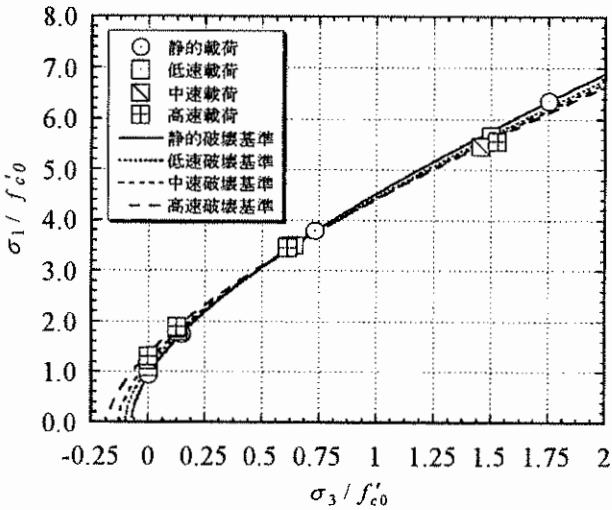


図-7 相対含水率50%の試験結果と動的破壊基準

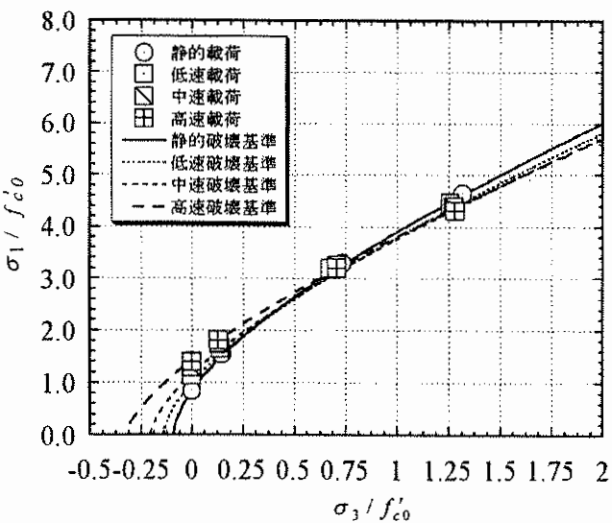


図-8 相対含水率100%の試験結果と動的破壊基準

影響を受け、動的間隙圧 σ_{wd} が作用すると考える。また、水分を有する相対含水率 w % のコンクリートの動的破壊基準は、有効応力による骨格部分(水分の有無によらず相対含水率 0%)の動的破壊基準によって決定されるものとする次式で与えられる。

$$F(\sigma_1, \sigma_3, \sigma_{wd}, \dot{\epsilon}) = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{f'_{c0}} \right)^2 - \left[\frac{1 - h^2 \left(\frac{\eta_0}{\xi_0} \right)^2}{h \left(\frac{\eta_0}{\xi_0} \right)} \right] \xi_0 \left(\frac{\sigma_3 - \sigma_{wd}}{f'_{c0}} \right) - \xi_0^2 = 0 \quad (3)$$

(3)式中の $\eta_0(\dot{\epsilon})$ 、 $\xi_0(\dot{\epsilon})$ は、相対含水率 0% の動的引張および動的一軸圧縮強度の増加率とひずみ速度の関係を表したものであり、既往の研究¹⁾で定式化した式を、それぞれ次式で与えている。

$$\eta_0(\dot{\epsilon}) = \frac{f'_{ld}}{f'_{l0}} = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{st}} \right)^{4.8 \times 10^{-3} \log \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{st}} \right)} \quad (4)$$

$$\xi_0(\dot{\epsilon}) = \frac{f'_{cd}}{f'_{c0}} = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{sc}} \right)^{4.2 \times 10^{-3} \log \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{sc}} \right)} \quad (5)$$

ここで、(4)、(5)式中の $\dot{\epsilon}_{st}$ [2.0×10^{-6} (1/sec)]、 $\dot{\epsilon}_{sc}$ [1.2×10^{-6} (1/sec)] は静的載荷時のひずみ速度、 $\dot{\epsilon}$ は急速載荷時のひずみ速度である。これらは、相対含水率 0% の各静的強度に対する任意のひずみ速度で載荷した場合の各動的強度の比を評価したものである。

さらに、試験結果を(3)式に代入し、相対含水率およびひずみ速度をパラメータとして動的間隙圧と側圧の関係を求めたところ、次式を得た。

$$\frac{\sigma_{wd}}{f'_{c0}} = \left(2.0 \times 10^{-5} w + 2.5 \times 10^{-3} \right) w \left(\frac{\dot{\epsilon}_d}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{\left(2.0 \times 10^{-2} - 1.46 \times 10^{-4} w \right) \log \left(\frac{\dot{\epsilon}_d}{\dot{\epsilon}_s} \right)} \times \left(\frac{\sigma_3}{f'_{c0}} \right) + \left(2.0 \times 10^{-4} - 4.0^{-4} \dot{\epsilon} \right) w \quad (6)$$

試験結果および(6)式から求めた相対含水率 50%、100%における動的間隙圧と側圧の関係を図-9、10に示す。これより、動的間隙圧も側圧の増加とともに直線的に増加し、その直線の傾きは載荷速度が大きくなるほど増加することがわかる。このような、特に高側圧の領域で顕著に見られる動的間隙圧の増加が最大圧縮応力を低下させる要因であると考えられることができる。

次に、(6)式の関係を(3)式に代入して与えられる動的破

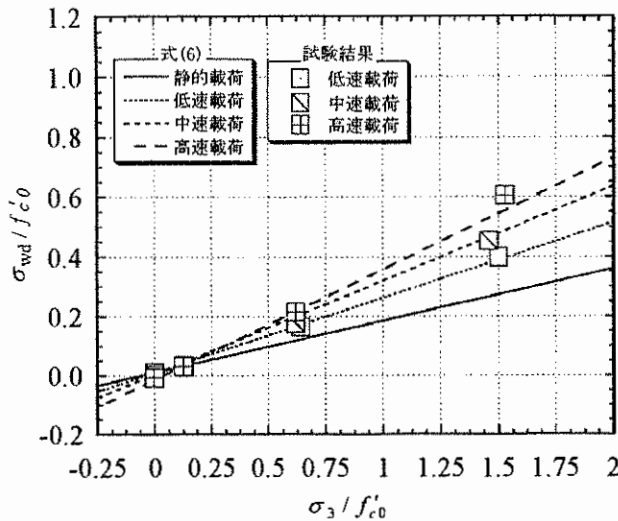


図-9 相対含水率50%の動的間隙圧と側圧の関係

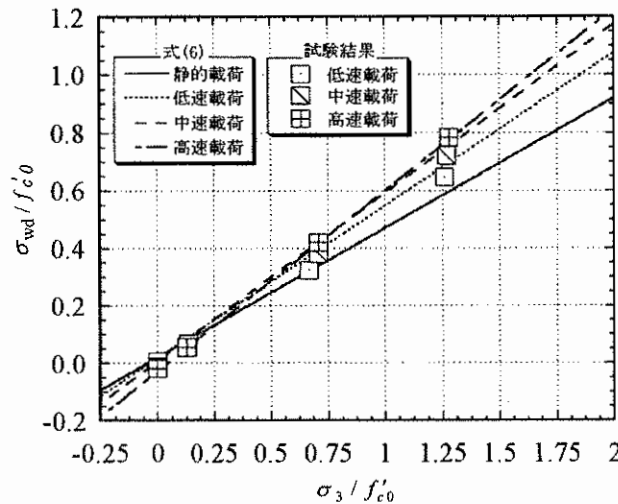


図-10 相対含水率100%の動的間隙圧と側圧の関係

壊基準を相対含水率毎に図-6, 7, 8に示す。各載荷速度に対する動的破壊基準は、動的間隙圧を考慮することで試験結果と良い一致を示している。すなわち、任意の相対含水率および載荷速度に対する動的破壊基準は、骨格に作用する有効応力に基づく破壊基準によって表すことができるといえる。

4. まとめ

本研究は、コンクリートの相対含水率、側圧および載荷速度をパラメータとする急速三軸圧縮載荷試験を行い、コンクリート中の水分が動的圧縮強度特性に及ぼす影響を調べ、三軸応力下における破壊基準を定式化したものである。本研究の範囲内において得られた結果を、まとめて以下に示す。

- (1) 静的三軸圧縮応力下におけるコンクリート中の水分は、最大圧縮応力を低下させる要因であるといえる。
- (2) 動的三軸圧縮応力下におけるコンクリート中の水分は、載荷速度およびその時の応力状態に依存して最大圧縮応力の大小に大きな影響を及ぼす。
- (3) 水分の影響を考慮した静的・動的破壊基準は、骨格部分に作用する有効応力に基づく破壊基準で表すことができる。

参考文献

- 1) 森孝二, 藤掛一典, 大野友則: コンクリートの含水率が動的圧縮および引張強度特性に及ぼす影響について, 防衛施設技術研究報告集, 第1号, pp.23-28, 2001.2.
- 2) 山口弘, 藤本一男, 野村設郎: 高圧三軸圧縮応力下におけるコンクリートの応力-ひずみ関係 その2 高速載荷, 日本建築学会構造系論文報告集, 第396号, pp.50-59, 1989.2.
- 3) 藤掛一典, 上林勝敏, 大野友則, 水野淳, 鈴木篤: ひずみ速度効果を考慮した三軸応力下におけるコンクリートの直交異方性構成モデルの定式化, 土木学会論文集, No.699/V-50, pp.109-123, 2001.3.
- 4) Chen, W. H.: Plasticity in Reinforced Concrete, McGraw-Hill (色部 誠, 河角 誠, 安達 洋監訳) コンクリート構造物の塑性解析, 丸善, 1985.
- 5) Imran, I. and Pantazopoulou, J.: Experimental Study of Plain Concrete under Triaxial Stress, ACI Materials Journal, Vol.93, No.6, Nov-Dec, 1996.
- 6) Pramono, E. and Willman, K. Fracture energy-based plasticity formulation of plain concrete, Journal of Engineering Mechanics, Vol.115, No.6, pp.1183-1204, June 1989.