

論文 コンクリート細孔に存在する凝縮水の圧力変動と移動による材料動的応答

鍛冶 哲理*1・藤山 知加子*2

要旨: 本研究ではコンクリート細孔中の凝縮水の水压変化が構造物の動的応答に及ぼす影響を定量的に明らかにすることを目的に、細孔構造の異なるコンクリート供試体を用いて、含水率および載荷速度の異なる一軸圧縮試験を実施した。湿潤状態は載荷速度にかかわらず乾燥状態よりも強度およびヤング係数の値が増加する傾向にあることが明らかになった。湿潤状態において載荷速度が速いほど強度の増加が顕著に表れている。一方、ヤング係数は載荷速度にかかわらず、ほぼ等しい値となった。以上より、細孔中の凝縮水の水压変化が構造物の動的応答に及ぼす影響を示すモデルを提案した。

キーワード: 細孔構造, 載荷速度, 含水率, ひずみ速度

1. はじめに

1.1 目的

本研究の目的は、コンクリート細孔中の凝縮水の水压変化が構造物の動的応答に及ぼす影響を明らかにすることである。

1.2 背景

含水状態で動的荷重を受ける橋梁床版は早期に疲労破壊にいたることが知られている¹⁾。このため、水が存在する場合のコンクリート材料の静的強度、疲労強度の低下は設計時に材料係数の低減によって考慮されている²⁾。このような含水床版の早期劣化メカニズムのひとつとして、水などの媒質中ではコンクリートのような多孔質体の強度が低下することはよく知られている³⁾。また、水中ではコンクリートの損傷メカニズムが気中と異なることが強度低下の要因であるとの指摘もある⁴⁾。

一方で、衝撃に近い高速荷重を載荷すると、湿潤コン

クリートであっても強度が上昇するという報告がある⁵⁾。これは、コンクリート微細空隙中の間隙水压の急激な上昇が一時的な強度増進に寄与したと考えられる。

そこで本研究は、コンクリート細孔中の水の挙動が載荷速度に依存することに着目し、既存のコンクリートの応力-ひずみモデルに、細孔径の分布と各細孔中で発生する間隙水压の効果を追加したモデルを提案するものとした。

2. 実験概要

2.1 検討項目と実験ケース

試験パラメータを表-1に示す。パラメータは、水セメント比、含水率、載荷速度の3項目とした。

水セメント比は、コンクリート内の細孔構造を変えるために設定しており、30%、40%、50%、60%、70%の5種類である。コンクリートの動的応答における速度依存性の発現は、コンクリート骨格の変形に伴い発生・消散する細孔中の水压に起因すると考えられるためである。含水率は、乾燥状態と湿潤状態の2種類とした。また、載荷速度はひずみ速度を指標とし静的、動的の2種類とした。

2.2 材料および打設・養生条件

試験に用いる円柱供試体は、φ100×200mmである。本試験で使用したコンクリートの配合の例を表-2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を使用し、細骨材には大井川水系陸砂(表乾密度 2.57g/cm³, 吸水率 2.64%)を、粗骨材には青梅産硬質砂岩(表乾密度 2.66 g/cm³, 吸水率 0.58%)を使用した。供試体は打設後1日で脱型、その後28日間水中養生を行った。その後、乾燥状態を再現するものは、温度 60℃、湿度 20%の乾燥炉に入れて乾燥させた。マイクロスケール (10⁻⁶[m]) 程

表-1 試験パラメータ

W/C	供試体名	供試体数	乾湿状態		載荷速度	
			湿潤	乾燥	静的	動的
30%	Ws-30	3	○	-	○	-
	Wd-30	3	○	-	-	○
	Ds-30	3	-	○	○	-
	Dd-30	3	-	○	-	○
40%	Ws-40	3	○	-	○	-
	Wd-40	3	○	-	-	○
	Ds-40	3	-	○	○	-
	Dd-40	3	-	○	-	○
50%	Ws-50	3	○	-	○	-
	Wd-50	3	○	-	-	○
	Ds-50	3	-	○	○	-
	Dd-50	3	-	○	-	○
60%	Ws-60	3	○	-	○	-
	Wd-60	3	○	-	-	○
	Ds-60	3	-	○	○	-
	Dd-60	3	-	○	-	○
70%	Ws-70	3	○	-	○	-
	Wd-70	3	○	-	-	○
	Ds-70	3	-	○	○	-
	Dd-70	3	-	○	-	○

*1 法政大学 デザイン工学部 都市環境デザイン工学科 (学生会員)

*2 法政大学 デザイン工学部 都市環境デザイン工学科 専任講師 工博 (正会員)

表-2 コンクリート示方配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スラブの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 w/c (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
					水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤	AE剤
					W	C	S	G	(C×%)	(C×%)
20	12	4.5	50	44.00	158	318	786	1037	*0.01	*0.003

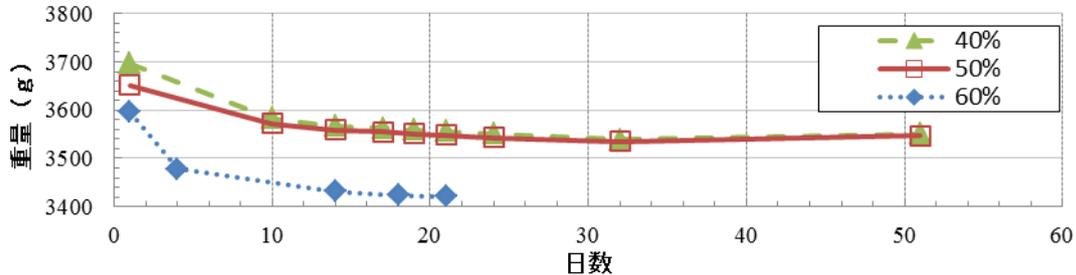


図-1 供試体の重量変化

表-3 湿潤と乾燥の強度の比較 (静的載荷)

W/C	圧縮強度(N/mm ²)				
	30%	40%	50%	60%	70%
湿潤	85.8	56.9	45.1	36.0	15.7
乾燥	93.6	62.9	45.1	34.2	13.3

表-4 湿潤と乾燥のヤング係数の比較 (静的載荷)

W/C	ヤング係数(kN/mm ²)				
	30%	40%	50%	60%	70%
湿潤	38	36	31	33	20
乾燥	33	31	28	29	14

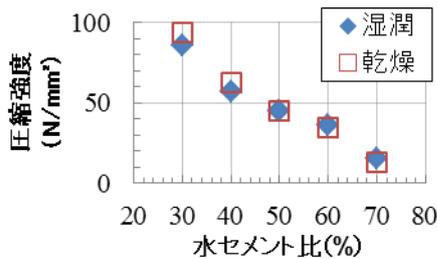


図-2 湿潤と乾燥の強度の比較 (静的載荷)

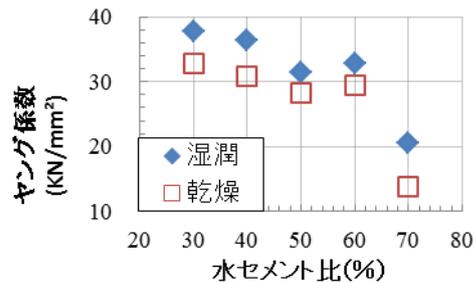


図-3 湿潤と乾燥のヤング係数の比較 (静的載荷)

度以上の空隙に存在する水に着目して検討を行うためである。60℃では、ナノスケールのゲル空隙や層間空隙の水は逸散しないことが知られている。

白井ら⁶⁾の乾燥方法を参考に各水セメント比の乾燥を行った供試体の重量変化を図-1に示す。本研究では、一日あたりの重量変化が2g以下になった場合を乾燥とした。W/C=60%は21日間乾燥,W/C=50%,40%は51日間乾燥させた。W/C=50%,40%では31日以降,乾燥炉の不具合により一時的に湿度が上昇したため重量が増加したが,乾燥開始時に比べ最終的には100g以上の重量変化が確認された。湿潤状態のものは試験直前まで水中にあり,表面を軽く拭き試験を行った。

2.3 載荷方法

圧縮試験は2000KN万能試験機を用いて行う。載荷方法は、静的載荷・動的載荷の2パターンで、静的は 4.17×10^{-5} /sec、動的は 4.17×10^{-3} /secである。なお、ここで言う載荷速度とは、載荷軸方向の変位量から求まるひずみを用いて算出した、載荷開始から最大圧縮強度点までの平均ひずみ速度である。

2.4 測定項目

本試験における計測項目は、供試体に作用する荷重ならびに供試体の軸方向のひずみ量である。軸方向ひずみゲージを対角線上に4枚貼ることでひずみ量を計測、ひずみ速度を算出した。ひずみと荷重はいずれも0.05秒間隔で計測した。なお、ロードセルはローパスフィルター10Hzを設定した。

3. 実験結果

3.1 含水が及ぼす影響

3.1.1 静的載荷

静的載荷において含水率ごとの強度の結果を表-3,図-2に示す。以降,図-2~図-11,表-3~表-9は3個の試験体の平均値である。乾燥状態に対する湿潤状態の強度の変化の割合はW/C=30%,40%,50%,60%,70%の順に-8.4%,-9.5%,0.2%,5.1%,18.1%であった。W/C=30%,40%では乾燥より湿潤の方が低い,W/C=50%,60%,70%では湿潤の方が高い強度を示した。

また、含水率ごとのヤング係数算出の結果を表-4、図-3に示す。乾燥状態に対する湿潤状態のヤング係数の割合はW/C=30%,40%,50%,60%,70%の順に15.2%,18%,11.5%,11.7%,48.8%であった。各水セメント比、乾燥より、湿潤のヤング係数の方が10%以上増加していることが分かる。

以上より静的載荷においては、乾燥状態よりも湿潤状態は強度、ヤング係数ともに増加の傾向があった。

3.1.2 動的載荷

動的載荷において含水率ごとの強度の結果を表-5、図-4に示す。乾燥状態に対する湿潤状態の強度の割合はW/C=30%,40%,50%,60%,70%の順に-12.6%,12%,11.3%,9.1%,24.8%であった。W/C=30%以外のすべてケースで乾燥状態より湿潤状態の方が強度が10%程度以上高い。

また、含水率ごとのヤング係数の結果を表-6、図-5に示す。これらは3個の試験体の平均値である。乾燥状態に対する湿潤状態のヤング係数の割合はW/C=30%,40%,50%,60%,70%の順に21.8%,22.2%,30.7%,29.8%,130.3%であった。各水セメント比において、湿潤のヤング係数の方が20%以上増加しており静的載荷と比較してより顕著な違いが表れている。動的載荷では同じ傾向だが、湿潤状態は乾燥状態よりも強度及びヤング係数の顕著に増加が表れた。

なお、W/C=70%ではデータが正確に計測できなかった可能性がある。

3.2 含水コンクリートの速度依存応答

次に、湿潤状態のみに着目した静的載荷と動的載荷の強度の結果を表-7、図-6に示す。静的載荷に対する動的載荷の強度の割合は、W/C=30%,40%,50%,60%,70%の順に23%,18.9%,11.2%,13.7%,36.8%であった。動的載荷によって各水セメント比、強度に10%以上の差が表れることが分かる。

ヤング係数についても表-8、図-7に示す。静的載荷に対する動的載荷のヤング係数の割合は、W/C=30%,40%,50%,60%,70%の順に-2.6%,0.5%,3.7%,-5.4%,-13.1%であった。W/C=70%のケース以外は、水セメント比によってヤング係数に大きな差は見られなかった。

各水セメント比ごとに応力-ひずみ曲線を図-8に示す。動的載荷と静的載荷ではヤング係数に顕著な差は見られないが、強度は動的載荷の方が大きくなっていることが分かる。これは、動的載荷によって急激な間隙水圧がコンクリート細孔内に発生し、一時的に応力を負担したためと考えられる。一方、静的載荷では、水圧が一定に達した後は徐々に分散し、最終強度への寄与が小さかったと推察される。

3.3 実験結果のまとめ

以上をまとめると、強度については、乾燥状態よりも湿潤状態の方が静的載荷では10%未満、動的載荷では約

表-5 湿潤と乾燥の強度の比較（動的載荷）

圧縮強度(N/mm ²)					
W/C	30%	40%	50%	60%	70%
湿潤	84.7	67.6	53.3	40.9	21.5
乾燥	96.8	60.3	47.9	37.5	17.2

表-6 湿潤と乾燥のヤング係数の比較（動的載荷）

ヤング係数(KN/mm ²)					
W/C	30%	40%	50%	60%	70%
湿潤	37	36	33	31	18
乾燥	30	30	26	24	8

表-7 湿潤状態 静的と動的の強度比較

圧縮強度(N/mm ²)					
W/C	30%	40%	50%	60%	70%
動的	105.5	67.7	50.2	40.9	21.5
静的	85.8	56.9	45.1	36.0	15.7

表-8 湿潤状態 静的と動的のヤング係数

ヤング係数(KN/mm ²)					
W/C	30%	40%	50%	60%	70%
動的	36.8	36.5	32.6	31.0	18.3
静的	37.8	36.3	31.5	32.8	21.1

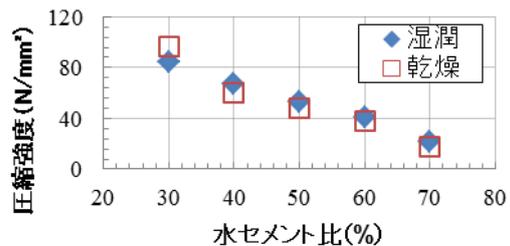


図-4 湿潤と乾燥の強度の比較（動的載荷）

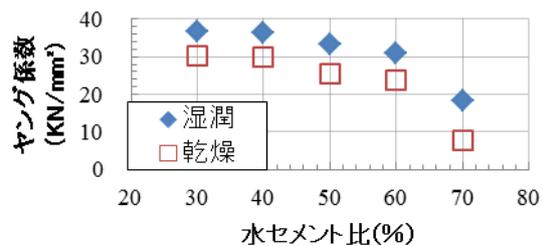


図-5 湿潤と乾燥のヤング係数の比較（動的載荷）

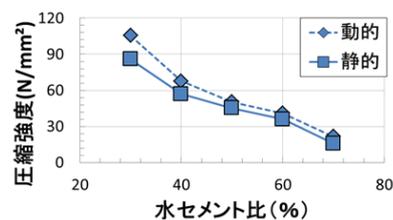


図-6 湿潤状態 静的と動的の強度比較

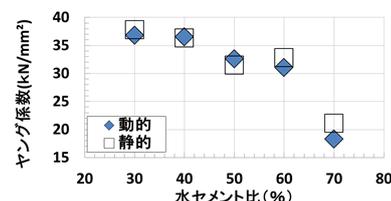


図-7 湿潤状態 静的と動的のヤング係数比較

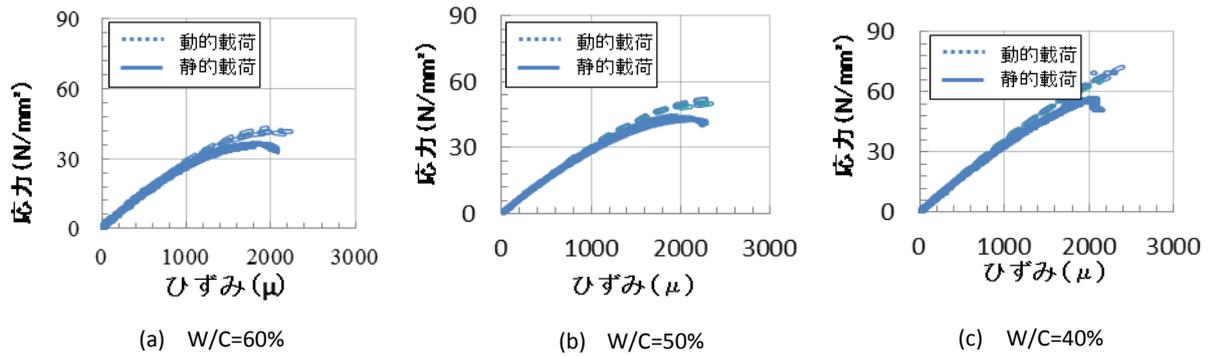


図-8 湿潤状態 動的と静的の比較

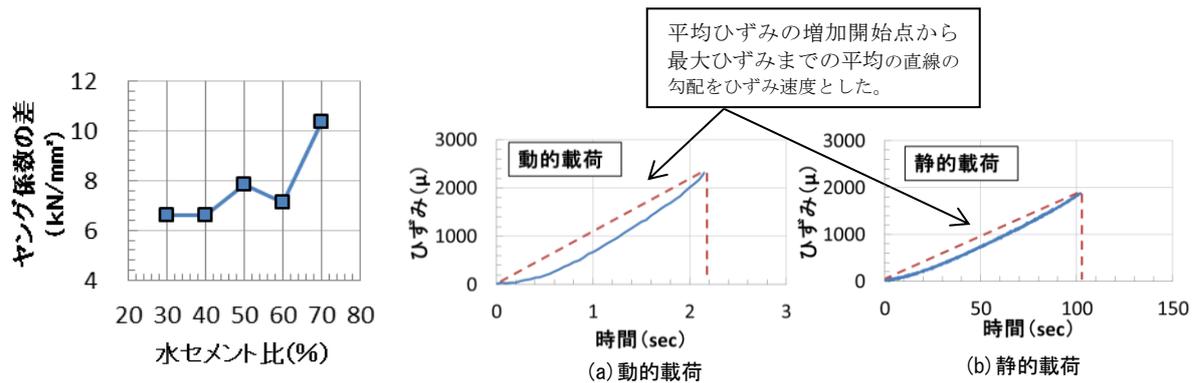


図-9 湿潤と乾燥のヤング係数の差

図-10 ひずみ速度

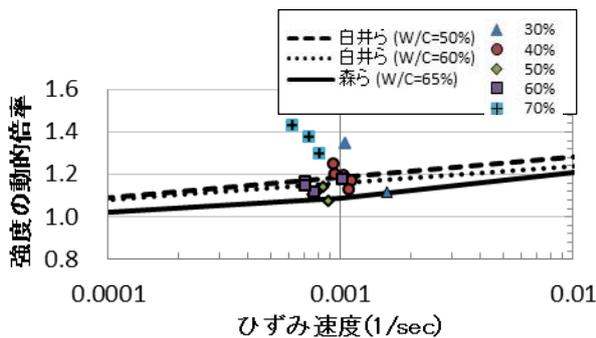


図-11 既往の研究と比較 (強度)

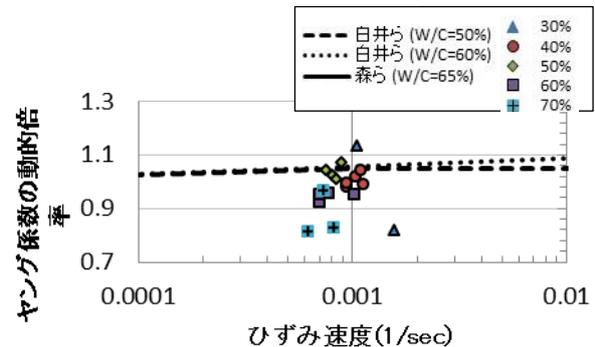


図-12 既往の研究と比較 (ヤング係数)

10%以上大きかった。また、湿潤状態では、荷重速度が速い方が強度も大きくなる傾向が示された。

ヤング係数については、異なる傾向を示す W/C=70%を除くと乾燥状態よりも湿潤状態の方が静的荷重では11%~18%程度、動的荷重では21%~30%程度大きかった。しかし、湿潤状態では、静的荷重、動的荷重に関わらず、ほぼ等しい値となった。

4. 含水コンクリートの動的応答特性に関する考察

4.1 細孔構造からの分析

コンクリート細孔中に存在する水が、コンクリートの強度やヤング係数へ影響を及ぼしていることは明らかである。本研究で着目しているのは $10^2 \sim 10[\mu\text{m}]$ のキャピラリー空隙以上の、比較的大きな空隙である。胡桃澤ら⁷⁾によると、水銀圧入法では、反射電子像による細孔構

造測定に比べ、 $1[\mu\text{m}]$ 以上の空隙が精度よく測定できないという報告もある。そこで、本研究では、反射電子像による細孔構造測定の結果を参考にし、細孔構造の分布の違いと間隙水圧の発生について考察を行った。

動的荷重時の湿潤と乾燥のヤング係数の差を図-9に示す。W/C=70%では 10kN/mm^2 、W/C=30~60%では $7 \sim 8\text{ kN/mm}^2$ の上昇が見られた。また、胡桃澤らの細孔分布によると $10^{-1} \sim 10^2 [\mu\text{m}]$ の細孔率は W/C=70%は約0.26%に対し W/C=30~60%は約0.01~0.1%である。W/C=70%において $10^{-1} \sim 10^2 [\mu\text{m}]$ の細孔が急激に増加した⁸⁾ことがヤング係数に影響を及ぼしたと考えられる。

本研究の条件からは、湿潤コンクリートの動的応答における速度依存性は、 $10^{-1} \sim 10^2 [\mu\text{m}]$ 程度のキャピラリー空隙やエントレインドエアによる空隙に支配⁹⁾されていると推察された。

4.2 ひずみ速度による分析

圧縮試験で計測した4つのひずみの平均したものを平均ひずみとした。森ら⁵⁾のひずみ速度の定義を参考に本研究では、動的載荷、静的載荷ともに、平均ひずみの増加開始点から最大ひずみまでの平均の勾配をひずみ速度として定義した。本研究で得られたひずみ速度を図-10に示す。

次に、白井ら森らの研究を参考に、圧縮強度およびヤング係数の動的倍率とひずみ速度の関係を図-11、図-12に示す。ここで動的倍率とは、動的試験で得られた最大強度を、標準養生供試体を用いた静的試験で得られた値で除して得られる無次元の指標である。

本研究のW/C=60%と白井らのW/C=60%は、ほぼ一致した。乾燥状態のものは本研究と既往の研究では乾燥方法が異なるため、比較対象としなかった。

以上より、本研究の湿潤状態供試体の結果は、ひずみ速度によって整理された既往の研究と概ね一致することがわかった。

4.3 弾塑性バネモデルに基づく機構の考察

4.3.1 細孔中の水圧に関する仮定

前節までの検討により、湿潤コンクリートでは、様々なスケールの空隙に存在する凝縮水の体積剛性の集合が、コンクリートに強度とヤング係数の増加をもたらした¹⁰⁾と考えられる。そこで、本研究では、細孔中の凝縮水の水圧を直接モデル化することを試みる。

簡単のため、空隙の形状は球形とし、空隙は水で飽和されていると考える。コンクリート骨格が軸方向にひずみ ε で圧縮されたとき(圧縮方向を正とする)に横方向に生じるひずみを考慮して、細孔内に生じる水圧 σ'_w を、以下で算出する。

$$\sigma'_w = f(\varepsilon) \quad (1a)$$

$$f(\varepsilon) = K_w \cdot \Delta V / V \quad (1b)$$

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{4\pi(r^3 - \bar{r}^3)/3}{4\pi r^3/3} = -(\alpha^3 \varepsilon^3 + 3\alpha^2 \varepsilon^2 + 3\alpha \varepsilon) \quad (1c)$$

$$\bar{r} = \frac{r(1-\varepsilon) + r(1+\nu\varepsilon) + r(1+\nu\varepsilon)}{3} = r(1 + \alpha\varepsilon) \quad (1d)$$

$$\alpha = \frac{2\nu-1}{3} \quad (1e)$$

K_w は水の体積剛性、 ΔV は空隙の体積変化、 V は空隙の体積、 ν はコンクリートのポアソン比で本研究では0.17とする。 r は仮想空隙の半径である。空隙に生じる水圧は、供試体コンクリート軸方向ひずみの3乗の関数となった。

4.3.2 湿潤コンクリート中の水の存在に関する仮定

湿潤供試体の空隙を飽和していた凝縮水は、 $10^{-1} \sim 10^2 \mu\text{m}$ 程度の微小な半径 r_j mmをもつとすると、すべての微小空隙が円柱供試体にもたらす単位面積あたりの強度増分 σ_w N/mm²は、微小空隙1か所あたりの耐荷力 σ_{wi} Nを

用いて表せる。

$$\sigma_w = \frac{\sum_{j=1}^m \sigma_{wj}}{A} \quad (2a)$$

$$\sigma_{wj} = \begin{cases} \sigma'_w \cdot \pi r_j^2, & \sigma_{wj} < f_t \\ f_t, & \sigma_{wj} \geq f_t \end{cases} \quad (2b)$$

$$\text{ただし, } V = \sum_{j=1}^m \frac{4}{3} \pi r_j^3 \quad (2c)$$

ここで、 A は円柱供試体の断面積 mm²、 m は空隙の総数、 V は空隙の総体積 mm³(本研究では101~220×10³mm³)、 f_t はコンクリートの引張強度である。空隙の径は、正規分布する¹¹⁾と仮定した(図-12)。

各空隙中に等方的に生じた水圧がコンクリートの引張強度を超えると、コンクリートに軸方向のひび割れを誘発するとともに、生じたひび割れによって水圧が消散すると考えられる。したがって、各空隙の水圧に上限値を設けた。

4.3.3 コンクリートの弾塑性破壊モデルとの重ね合せ

一軸圧縮コンクリートの応力-ひずみ関係は、既往の弾塑性モデル¹²⁾を参考に、以下で表すものとする。

$$\sigma_c = \sum_{i=1}^n \sigma_{ci} \quad (3a)$$

$$\sigma_{ci} = \begin{cases} \varepsilon \cdot E/n, & \sigma_{ci} < f_{ci} \\ f_{ci}, & \sigma_{ci} \geq f_{ci} \\ 0, & \varepsilon - \varepsilon_{yi} \geq \varepsilon_r \end{cases} \quad (3b)$$

$$f_{ci} = \frac{f_c}{n} \cdot \beta \cdot \left\{ \frac{1}{2\pi \left(\frac{n}{2s}\right)^2} \exp\left(-\frac{\left(i-\frac{n}{2}\right)^2}{2\left(\frac{n}{2s}\right)^2}\right) \right\} \quad (3c)$$

$$\varepsilon_{yi} = n f_{ci} / E \quad (3d)$$

ここで σ_c 、 f_c 、 E は、それぞれ供試体コンクリートの応力、強度、ヤング係数で、いずれも単位はN/mm²である。 σ_{ci} および f_{ci} は各単位要素あたりの応力と強度、 n は単位要素の総数で、 β および s は単位要素の強度の分布を調整する係数として、本研究では $\beta = 0.9$ 、 $s = 1.6$ とした。このコンクリートのモデルと、本研究で提案した細孔の水圧モデルを重ねあわせ、湿潤コンクリートの応力 σ N/mm²を求めることができる。

$$\sigma = \sigma_c + \sigma_w \quad (4)$$

図-13では、W/C=50%のケースを模擬して、 $f_c = 45$ N/mm²、 $f_t = 2.9$ N/mm²、 $E = 2.8 \times 10^4$ N/mm²、 $K_w = 2.2 \times 10^4$ N/mm²(20℃大気圧下)、 $V = 100 \times 10^3$ mm³($m = 4.0 \times 10^6$)、 $n = 100$ を与えた場合を示す。水の体積剛性を仮定しないモデル(乾燥モデル)に比べ、湿潤コンクリートのモデルでは初期剛性と強度がそれぞれ8.8kN/mm²、13N/mm²増加し、実験で得られた傾向を得た。コンクリート細孔中の水圧を、微小空隙の径やその分布をもとに直接計算し、湿潤材料の初期剛性と強度の増加を定量的に示す試みはできたが、本研究のモデルには今後実験で確認すべきパラメータが含まれているた

め、引き続き検討を続けたい。

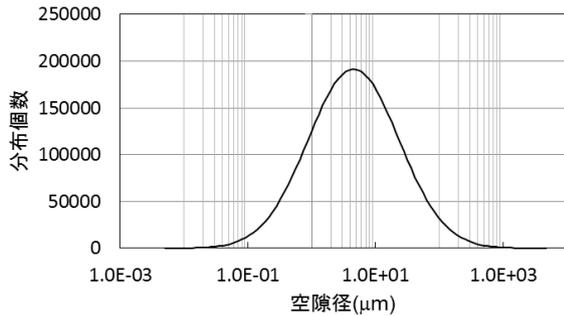


図-12 空隙径分布の仮定

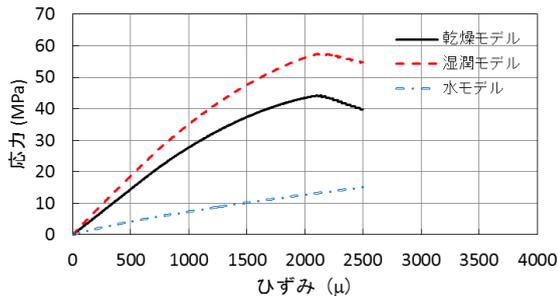


図-13 提案モデルによる応力-ひずみ関係

5. まとめ

本研究ではコンクリート細孔中の凝縮水の水圧変化が構造物の動的応答に及ぼす影響を定量的に明らかにすることを目的に、細孔構造の異なるコンクリート供試体を用いて、含水率および载荷速度の異なる一軸圧縮試験を実施した。以下に、本研究で得られた知見を列挙する。

- 1) 強度に関して、湿潤状態は乾燥状態よりも静的载荷では10%未満、動的载荷では約10%以上大きかった。また、载荷速度が速い程、強度も大きくなる傾向が示された。
- 2) ヤング係数に関して、異なる傾向を示す W/C=70%を除くと乾燥状態よりも湿潤状態の方が静的载荷では11%~18%程度、動的载荷では21%~30%程度大きかった。しかし、湿潤状態のみに着目すると静的载荷、動的载荷に関わらず、ほぼ等しい値となった。
- 3) 湿潤コンクリートの動的応答における速度依存性は、 $10^{-1} \sim 10^2$ [μm]程度のキャピラリー空隙やエントレインドエアによる空隙に支配されていると推察された。
- 4) 本研究の湿潤状態供試体の結果は、ひずみ速度によって整理された既往の研究と概ね一致することがわかった。

本研究では、圧縮試験の際、縦ひずみのみ計測を行ったが、間隙水圧は横方向に作用することを考慮すると横ひずみも計測したい。また、W/C=70%などばらつきの出たものについては今後も検討していきたい。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 24686054 の助成を受けた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 松井繁之：移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について，コンクリート工学年次論文報告集，9-2,pp.627-632,1987
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書（設計編）2007年制定
- 3) 堀素夫：表面エネルギーから見たセメント硬化体の強さ，窯業協会 70(799), C268-C273, 1962-07-01
- 4) 菅田紀之，尾崎昶：各種コンクリートの疲労強度および疲労破壊性状に関する研究，土木学会論文集 669, 1-16, 2001-02-20
- 5) 森孝二，上林勝敏，藤掛一典，大野友則，伊藤紘志：高ひずみ速度下におけるコンクリートの圧縮および引張強度特性に及ぼす含水率の影響，構造工学論文集，Vol.47A,pp.1673-1681,2001
- 6) 白井孝治，柳下拓也，広永道彦，伊藤千浩：コンクリートの高温下における材料強度のひずみ速度依存性，構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，pp.211-216,2000
- 7) 胡桃澤 清文，名和豊春：反射電子像と水銀圧入法によるセメント硬化体の空隙構造測定（組織構造，材料施工），学術講演梗概集，A-1，材料施工 2010, 1273-1274, 2010-07-20
- 8) James J Beaudoina, Basile Tamtsiaa, Jacques Marchandb, Heather R Myersa :Solvent exchange in partially saturated and saturated microporous systems: Length change anomalies
- 9) 松田拓，野口貴文，蓮尾孝一：超高強度硬化体の強度・変形特性における空隙構造と水分の働き，日本建築学会構造系論文集 77(682), 1829-1838, 2012-12
- 10) 浅本晋吾，石田哲也：微細空隙中の液体特性に着目したコンクリートの時間依存変形機構の検討，土木学会論文集，土木学会，No.760-V-63, pp.159-172, 2004.
- 11) K. Maekawa, R. Chaube and T. kishi; Modeling of concrete performance - Hydration, microstructure formation and transport, SponPress, 1999.
- 12) K. Maekawa, A. Pimanmas and H. Okamura; Nonlinear mechanics of reinforced concrete, SponPress, 2003.