論文 圧縮応力場におけるコンクリートのスケーリング特性に関する研究

工藤 めい*1・権代 由範*2

要旨:構造体コンクリートの耐久性を議論する場合,室内試験により得られる評価値が重視され,構造体に 常時作用する応力の影響は考慮されないのが一般的であり,応力と耐久性を直接関連付けた研究例も極めて 少ない。そこで本研究では,構造体に作用する応力レベルの相違が劣化進行機構に及ぼす影響を明かにする ため,圧縮応力場におけるスケーリング特性に着目し検討を行った。その結果,作用応力の相違はスケーリ ングの進行速度に影響を及ぼし,劣化前後で細孔径分布が異なることを明らかにした。また,コンクリート の弾性域に相当する圧縮応力は,スケーリングの進行を抑制する特異的な作用を持つ可能性を示唆した。 キーワード:コンクリート,圧縮応力場,スケーリング,細孔構造特性,変形挙動

1. はじめに

構造体コンクリートは,自重やプレストレス等に起因 する複雑な応力が常に作用する環境下にある。しかし, コンクリートの耐久性は、一般的に無載荷の供試体を対 象とした室内試験から得られる評価値、或いは、その評 価値から導いた予測式により検討され、構造体に常時作 用する応力の影響は考慮されていない。実環境における コンクリートは、作用する応力の程度で微細ひび割れの 発生性状や細孔構造が異なることが指摘されている¹⁾。 加えて、コンクリートの耐久性はセメントペーストの化 学的・物理的変化に多大な影響を受け、特に、硬化セメ ントペーストの細孔構造の変化に依存する²⁾。したがっ て,構造体コンクリートに作用する応力は,構造計算上, 許容応力度以下という条件で設計されているが、外的劣 化因子の浸透・拡散に起因する種々の劣化に対する抵抗 性を厳密に照査・予測しようとする場合、各部材に生じ る応力の影響を無視することはできない。何れにせよ, 常時応力作用下における組織変質と耐久性を直接的に関 連付けた研究は極めて少ないのが現状である^{例えば3,4)}。

そこで本研究では、圧縮応力場におけるコンクリート の耐久性、特に、塩化物と凍結融解の複合作用により生 じるスケーリングに着目し、作用する応力レベルの相違 がスケーリング進行速度に及ぼす影響について実験的に 検討を行った。また、応力作用下における劣化進行メカ ニズムの解明に向け、スケーリング劣化前後の微視的組 織構造の変化、遷移帯やセメントマトリクスに生じるひ び割れの発生性状および変形挙動について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調(配)合

結合材には、市販の普通ポルトランドセメント(密度: 3.16g/cm³)を用いた。粗骨材には硬質砂岩砕石(Gmax: 20mm,表乾密度:2.70g/cm³,実績率:61%),細骨材に は陸砂(表乾密度:2.55g/cm³,Symbol:S1)および硬質砂 岩砕砂(表乾密度:2.65g/cm³,Symbol:S2)を使用した。 また,混和剤として、リグニンスルホン酸化合物を主成 分とする AE 減水剤およびロジン酸化合物系陰イオン界 面活性剤を主成分とする AE 助剤を使用した。**Table 1** に 調(配)合、フレッシュ性状および材齢 28 日圧縮強度を示 す。なお、水セメント比は 55%の1水準とし、目標スラ ンプは 150±20mm、目標空気量は 4.5±0.5%とした。

2.2 供試体作製および養生方法

曲げ試験用鋼製型枠(100×100×400mm)を二分する ように長辺方向に塩化ビニル製の仕切板(100×400mm, t:20mm)を設け,平板供試体(100×400×t:40mm)を作製 した。供試体は,応力導入時に載荷面となる打ち込み面 と打ち込み底面の平行度を得るため材齢1日にセメント ペーストによるキャッピングを行い,材齢2日に脱型し た。脱型後は材齢7日まで標準養生(水中・20℃)を行い, 以降は材齢28日まで気中養生(20℃・60%R.H.)を行った。 各養生終了後,後述する応力導入載荷フレーム(Fig. 1) に設置可能な寸法である100×100×t:40mmに湿式コン クリートカッターを用いて切断成形した。なお,平板供 試体(100×400×t:40mm)の両端部は破棄することとし, その中央部より上記寸法の供試体を3体切り出した。

 Table 1
 Mix Proportion of Concrete and Compressive Strength in the Age 28 days

W/C	s/a	Unit Contents (kg/m ³)					Water-Reducing	Air-Entraining	Slump*	Air**	Compressive
(%)	(%)	W	С	S 1	S2	G	Admixture (C×wt%)	Admixture (C×wt%)	(mm)	(%)	$Strength\left(MPa\right)$
55	44.8	178	324	540	240	1005	1.00	0.02	160	4.1	39.1
* Target Slump : 150mm±20mm, ** Target Air : 4.5%±0.5%											

*1 仙台高等専門学校専攻科 生産システムデザイン工学専攻 (学生会員)

*2 仙台高等専門学校 建築デザイン学科・准教授 博士(工学) (正会員)

2.3 試験方法および項目

(1) 応力導入方法 [圧縮応力場の再現]

室内試験において圧縮応力場を再現するため, Fig. 1 に示す応力導入載荷フレーム(SUS304)を作製した。応力 導入載荷フレーム(以下,載荷フレーム)とは、フレーム 軸上のナットの締め付けにより供試体に圧縮応力を導入 し、スケーリング試験期間中も常に圧縮応力が作用する 状態を保持するものである。導入応力の制御は、所定の 応力が作用した際に生じる供試体のひずみを、事前に作 成した応力ひずみ曲線から求め、供試体のひずみが求め た値に達するまでナットの締め付けにより載荷する方式 とした。なお、スケーリング試験の性質上、試験対象面 以外からの吸水を防止するため、フレームに接しない 2 側面にブチルゴム付きアルミテープで防水処理を施した。

ここで、圧縮強度試験より求めた供試体の最大圧縮応 力度 σ_c [N/mm²]に対する導入応力 f'_c [N/mm²]の割合を 応力強度比 $f'\sigma$ [%]と定義する。式(1)に算定式を示す。

$$f/\sigma[\%] = f' c/\sigma c \cdot 100 \tag{1}$$

本研究では, f/σ=0, 10, 20, 30, 40, 60%の6水準を 設定し,養生終了後に応力を導入した。

載荷フレームを用いた耐久性試験の実施に際して,ク リープひずみによる初期導入応力の減衰が懸念された。 そこで,予備実験として,応力導入後の供試体を恒温恒 湿室(20±2℃・R.H.60±5%)に静置し,クリープひずみ (軸ひずみ)の計測を行った。なお,ひずみ計測の対象を f/σ=20,40,60%に限定し,供試体の両側面に貼り付けた ゲージ長 60mmの単軸ひずみゲージにより計測した。 (2) スケーリング抵抗性評価

応力強度比(6 水準)毎に3 体,計18 体の供試体を対象 に RILEM CDF ⁵⁾によるスケーリング抵抗性評価を実施 した。試験概要を Fig. 2 に示す。養生終了後,導入した 応力を保持した状態で,試験対象面が試験溶液(NaCl: 3%)に深さ5mmまで浸かるように試験容器に設置し,毛 管浸透による7日間の事前吸水を実施した。吸水終了後, RILEM CDF の凍結融解条件(-20℃±0.5K~20℃±0.5K の温度移行,最低温度保持時間:3h,凍結・融解温度勾 配:10℃/h,最高温度保持時間:1h)に従い,1サイクル12 時間とし,30サイクルまで実施した。評価項目は,事前 吸水による質量変化(%)および凍結融解工程におけるス ケーリング量(kg/m²)とした。なお,試験装置にはJIS A 1148(A)で用いる水中凍結水中融解試験機を利用した。 (3)水銀圧入法(MIP)による細孔構造特性評価

細孔構造特性評価は、スケーリング劣化後に応力を除 去した供試体に、材齢 28 日までの養生のみ実施した健全 供試体(以下, Non Damage)を加えた計7体について実施 した。これらについて、劣化面から深さ 20mm までを評



Fig. 1 Outline of Compressive Stress Loading Frame



Fig. 2 Test Specimen and Test shape for RILEM CDF



Fig. 3 Evaluation of Cracking characteristic for concrete

価範囲とし、5mm 厚のサンプルを複数枚採取した。その 後、アセトン置換による水和停止と D-dry を行い、水銀 圧入ポロシメータ(Quantachrome Instruments: PM-60GT) を用いて水銀圧入試験を行った。なお、測定開始圧力は 1.5kPa、終了圧力は 420MPa とし、細孔径分布を導出す る際に用いる水銀の表面張力 σ および接触角 θ は、それ ぞれ 480.00(N/m)および 140.00(°)とした。

(4) 応力導入に伴うひび割れ発生性状の観察

各応力強度比におけるひび割れの発生性状を把握す るため、養生終了後に圧縮応力を導入した供試体を対象 にマイクロスコープによる表面ひび割れの観察を行った。 観察の概要を Fig. 3 に示す。f/σ=0, 20, 40 および 60% の供試体について、測定対象面に 30×30mm のグリッド を 9 つ作成し、各グリッドに 5mm 幅のトラバースを組 んだ。そのトラバース線と交わるひび割れの本数および 幅をグリッド毎に測定した。なお、遷移帯に生じるひび 割れも観察対象とするために、粗骨材が視認できる切断 面を有するコンクリート供試体を測定対象とした。 (5) 圧縮載荷試験によるコンクリートのひずみ計測

コンクリートのマクロ的変形挙動とひび割れの発生 性状の関係から、応力強度比の違いが耐久性に及ぼす影 響を検討するため、静的圧縮載荷試験によるひずみ計測 を行った。100×100×40mmのコンクリートおよびモル タル供試体を対象とし、測定対象面(100×100mm、表・ 裏)の中心にゲージ長 60mmの2軸ひずみゲージを貼り 付け、縦ひずみおよび横ひずみを計測した。載荷速度は 毎秒 0.4N/mm²で制御し、供試体と載荷板の間には載荷 フレーム設置時と同様に厚さ 0.8mmのテフロンシート を設けた。なお、モルタル供試体は、コンクリート供試 体と同調合のフレッシュコンクリートからウェットスク リーニングにより採取したモルタルにより作製した。

3. 実験結果および考察

3.1 各応力強度比におけるクリープ挙動(予備実験)

応力作用下で実施するスケーリング試験期間中に,供 試体に生じるであろうクリープの挙動を把握するため, 応力導入後 22 日間(事前吸水を含む試験期間に相当)の ひずみ計測を行った。Fig. 4 に各応力強度比におけるク リープ挙動を示す。応力導入時の初期ひずみは, f/σ=20%, 40%, 60%において,それぞれ 233µε,446µε,706µε で あったが,クリープにより徐々に減少する様相が確認さ れた。しかし,応力導入後 22 日間で生じたクリープひず みは,何れの応力強度比においても初期ひずみの 5~6% 程度にとどまり,クリープによる初期導入応力の減衰は 比較的小さいと思われる。以上より,試験期間が比較的 短期間であること,導入応力の減衰が比較的小さいこと などから,耐久性評価におけるクリープの影響は少ない ものと判断して,以降の実験および考察を行った。

3.2 事前吸水 (RILEM CDF) における吸水特性

Fig. 5 に、事前吸水時の質量変化から求めた各応力強 度比における吸水率を示す。各応力強度比の吸水率を比 較すると、無載荷を含む f/σ=0~40%では、吸水率の明確 な差異は認められず、応力強度比の大きさに起因する序 列関係も不明確であった。また、この範囲において、事 前吸水7日目での吸水量の差が最も大きいf/g=0%と30% を比較しても、その差は0.2mg/mm²程度であり有意な差 は認められなかった。以上より、これらの範囲では、概 ね同様の吸水特性を示すと思われるが、事前吸水時にお ける質量の計測精度(表面水の拭取り等)や有意差の観点 から、改めて詳細な検討が必要であると思われる。これ に対して,応力レベルが最も大きい f/o=60%においては, 他と比較して吸水率が増加する傾向を確認できる。静的 圧縮載荷により生じる微細ひび割れは、f/σ=50%程度まで の領域において、その多くが遷移帯中に安定組織として 存在し, f/σ=50~60%の領域ではひび割れがマトリクス



Fig. 4 Creep strain of concrete in each stress strength ratio



Fig. 5 Relationship between the Measurment Period and Amount of Water Absorption Coefficient



Fig. 6 Relationship between the Freezing and thawing Cycles and Amount of Scaling

中にも形成され始めるとされている¹⁾。このメカニズム から評価すると, *f/o*=60%では供試体内のひび割れ組織が 連続的になり,吸水率が増加したものと推察される。 3.3 応力強度比の違いによるスケーリング特性

Fig. 6は、各応力強度比における凍結融解サイクル数と スケーリング量の関係を示したものである。事前吸水に おいて、最も大きい吸水率を示したf/σ=60%は、スケーリ ング量も同様に増加する傾向を示した。応力作用下にあ る供試体は、導入応力の大きさに起因してスケーリング 量も増加するように思われたが、各応力強度比における 凍結融解30サイクル時の累計スケーリング量を比較する



Fig. 7 Relationship between the Stress Strength Ratio (f/σ) and Total Amount of Scaling for 30Cycles

 \geq , $f/\sigma=60\% > f/\sigma=40\% > f/\sigma=0\% \ge f/\sigma=30\% > f/\sigma=10\% >$ ƒ/σ=20%という序列関係を示した。その差は僅かであるが、 f/σ=10%および20%においては、無載荷のf/σ=0%よりスケ ーリング量が少なくなる様相を示した。特に、全ケース の中で最もスケーリング量が少ないf/σ=20%においては, 無載荷のff/σ=0%と比較して,2割程度のスケーリングの抑 制が確認された。スケーリング量の差は、事前吸水時に おける吸水率の違いが要因の一つとして考えられるが, f/σ=40%以下では吸水率に大きな差はなかった。また,塩 化物イオンの浸透性も凍結融解との複合作用によりスケ ーリング量に影響を及ぼす要因となり得る。圧縮応力下 での塩分浸透性状について検討した迫井らは³⁾, f/o=30% 以下の圧縮応力においては無載荷時よりも塩化物イオン 拡散係数が低下する傾向にあると指摘しており、本研究 においても同様の傾向が認められた。以上より、コンク リートの弾性域に相当するff/σ=30%未満の応力が作用し た場合、導入応力がマトリクス中に存在する空隙や細孔 を閉塞させる方向に働くことで、塩化物イオン等の劣化 因子の浸透や拡散を抑制し、耐久性上有利に作用する可 能性が示唆された。また、 ƒ/σ=30%以上の範囲では作用応 カレベルが上昇するにつれ, 組織内部に生じるひび割れ が増加し、さらに、それが拡張・進展することにより、 スケーリング量が増加したものと推察する。これらのメ カニズムに関する検討ついては、「3.6」で述べる。

Fig.7は、各応力強度比と凍結融解30サイクル時の累 計スケーリング量の関係を示したものである。f/o=0%か らf/o=20%にかけてスケーリング量が減少する傾向にあ り、f/o=20%を境に増加に転じ、その後は応力強度比の増 加に伴ってスケーリング量も増加する傾向を示した。応 力強度比とスケーリング量について、二次的な相関性を 持つ可能性が示された。これより、コンクリートの弾性 域に相当する f/o=30%以下の圧縮応力下において、スケ ーリングの進行を抑制する作用が働く可能性が示唆され、 その傾向は、特に f/o=20%付近で顕著となることが明ら



Fig. 8 Relationship between the Pore Diameter and Volume



Fig. 9 Relationship between the Pore Diameter and Differential Pore Volume



Fig. 10 Relationship between the Total Pore Volume and Amount of Scaling for 30 Cycles

かとなった。これらの傾向に関しては、複数回の再現実 験においても同様の傾向が得られることを確認している。 3.4 凍害(スケーリング)劣化による細孔構造の変化

Fig. 8 にスケーリング試験後における f/σ=20%,40%および 60%の細孔径分布とスケーリング劣化前の細孔径分布(Non Damage)を併せて示す。スケーリング劣化後のコンクリートは、何れの応力強度比においても健全状態のコンクリートと比較し、細孔量のピークが直径 100nm 付近から 80nm 付近へとシフトしている。この現象は、スケーリング試験の過程において供給される試験溶液によ



Fig.11 Cracking characteristic of Concrete in Each Stress Strength Ratio

り水和が進行し、コンクリート内部の組織構造が緻密に なったことに起因するものと推察される^の。また, Fig.9 は健全供試体に対する劣化後の細孔径分布の差分を示し たものである。細孔径 200~4000nm の領域に着目すると, 健全供試体と比較して、f/σ=60%は細孔量が最も増加して おり、f/σ=0%および f/σ=40%は中程度の増加が確認でき る。それに対し、 f/σ=20%では健全供試体と同程度か僅か に減少する様相が見られ、応力強度比毎に細孔量の変化 に差異が生じることを確認した。Fig. 10 は、細孔径 200 ~4000nm の領域の細孔量とスケーリング量の関係を示 したものであるが、この領域における細孔量が多いほど、 スケーリング量も多いという傾向が確認された。既往研 究によると、凍結融解サイクルの増加に伴い半径 100nm ~1000nm 付近の細孔量が増加する事が知られており ⁷⁾, 半径 40nm~2000nm の範囲の細孔量は耐凍害性の低下に 影響すると指摘されている⁸⁾。本研究からも、両者には 概ね相関性が認められた。以上より, 凍結融解に伴う細 孔量の変化は,応力強度比の違いにより異なる傾向を示 し、その変化はスケーリングの発生量に影響を及ぼす可 能性が示唆された。しかし,応力導入から凍結融解試験 終了に至るプロセスのうち、どの段階で細孔構造に変化





が生じたのかは,現時点では明らかでない。そのため, 各段階における経時的な細孔構造評価が必要と考える。 3.5 静的圧縮載荷により発生するひび割れの観察

Fig. 11に各応力強度比において発生した微細ひび割れ の分布および遷移帯の画像とその本数,幅を示す。各応 力強度比におけるひび割れ本数を比較すると, f/o=0%お よび 20%ではひび割れの発生を確認できず, f/o=40%で は4本, f/o=60%では11本のひび割れが確認された。ま た,発生したひび割れの幅は, f/o=40%および 60%にお いて,それぞれ7~13µm および4~35µm 程度であった。 また, f/o=40%で発生したひび割れの多くは,その長さや 幅が小さく独立的で,主に遷移帯に分布しているのに対 して, f/o=60%ではひび割れ長さ,幅ともに増大し,マト リクス中に拡張・進展している様相が確認された。なお, ここでは試験対象面を9分割して実施した観察の一例を 示したが,その他の領域でもほぼ同様の傾向を示した。 3.6 静的圧縮荷重を受けたコンクリートの変形挙動

Fig. 12 は、コンクリートおよびモルタル供試体におけ る縦ひずみと横ひずみの関係を示したものである。なお、 コンクリート供試体について、f/σ=20, 40, 60, 80%に対 応する箇所を図中に示す。全体的な傾向として、モルタ ルは縦ひずみと横ひずみが一定割合で増加するのに対し, コンクリートは f/σ=20%程度まで縦ひずみに対する横ひ ずみの増加割合がモルタルより小さく一定で推移し、そ れ以降、徐々に横ひずみの増加割合が大きくなる傾向を 確認できる。このことから、 ffo=20%程度の応力では、組 織的安定性が失われず、軸方向の変形に対して、遷移帯 や空隙などといった弱層の緩衝効果により横ひずみが抑 制され、これに対し、f/σ=40%以上の応力が作用した場合、 遷移帯に生じるひび割れの拡張に起因して、横ひずみが 徐々に増加し始めるものと思われる。これらの見解は, f/σ=30%まで遷移帯組織は安定状態であり,導入応力が上 昇すると遷移帯に生じた微細ひび割れが拡張し始め, f/σ=60%を超過するとマトリクスにも連続性を持つひび 割れ組織が形成されるとする既往の知見 1)とも一致する。



Fig. 13 Relationship between the Stress Strength Ratio (f / σ) and Amount of displacement

Fig. 11 のひび割れの発生性状, Fig. 12 の供試体の変形 挙動およびスケーリング試験の結果を含めて総合的に検 討し, 圧縮応力作用下におけるコンクリートの変形挙動 をモデル化した(Fig. 13)。これによると, コンクリート の弾性域に相当する応力は, 細孔や微細空隙を閉塞する 方向に作用し, 横ひずみの発生を抑制するとともに耐久 性上有利に働く。また, この応力領域で発生する可能性 があるひび割れは, 遷移帯に分布する独立性の高い微細 ひび割れに限定される。これに対し, 塑性域に相当する f/σ=40%や 60%の応力は, 遷移帯に生じた微細ひび割れ を拡張・進展させるとともに, マトリクス中へひび割れ を拡張・進展させるとともに, マトリクス中へひび割れ を誘導し, コンクリートの耐久性能を低下させる。これ らのメカニズムについては, あくまでも推察の域を脱し ないが, 圧縮応力と耐久性能の間には, 大略このような 関係性が見出せるものと考えている。

4. まとめ

本研究では、圧縮応力作用下におけるコンクリートを 対象に、作用応力レベルの相違がコンクリートの耐久性 に及ぼす影響について実験的に検討した。本実験の範囲 から得られた知見を以下に示す。

- (1) 圧縮応力作用下では、作用応力レベルによってスケ ーリングの発生性状が異なり、f/σ=30%未満の圧縮 応力が作用する場合、無載荷時と比較して、スケー リング量が抑制されることを明らかにした。
- (2) 凍結融解に伴う細孔径分布の変化は、応力強度比の 違いにより異なる傾向を示し、細孔径 200~4000nm の領域における細孔構造の変化は、スケーリングの 発生に影響を及ぼす可能性が示唆された。
- (3) コンクリートが静的圧縮載荷を受ける場合, f/σ=20%程度ではひび割れの発生は認められず, f/σ=40%程度で遷移帯に独立的なひび割れが確認さ れた。これ以降は,作用応力レベルの上昇に伴いひ び割れが拡張・進展する様相が確認された。
- (4) コンクリートの弾性域に相当する f/σ=30%未満では、導入応力が空隙や細孔を閉塞させる方向に働き、 劣化因子の浸透・拡散の観点から耐久性上有利に作用する可能性がある。また、この応力領域で生じる

ひび割れは遷移帯に独立して存在すると思われる。

(5) 塑性域に相当する f/σ=40%以上の応力は、遷移帯に 生じた微細ひび割れを拡張・進展させ、マトリクス 中に連続的なひび割れ組織を形成し、コンクリート の耐久性能を低下させるものと思われる。

謝辞:本研究は,日本学術振興会科学研究費補助金(若手研究(B),研究代表者:権代由範,JSPS KAKENHI Grant Number:25871028)の助成を受けて実施したものである。 ここに記して謝意を表す。

参考文献:

- 田沢榮一,佐伯昇(監訳):コンクリート工学 微 視構造と材料特性, p.82, 1998
- 2) 新大軌, 濱幸雄, 澁谷将, 青野義道:環境変化養生 によるモルタルの細孔構造と耐凍害性の変化, セメ ント・コンクリート論文集, No.63, pp.155-160, 2009
- 3) 迫井裕樹、川北昌宏、堀口敬:フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートの塩 分浸透性に及ぼす圧縮応力の影響、コンクリート工 学論文集, Vol.18, No.3, pp.1-8, 2007
- Framcois, R. and Maso, J.C.: Effect of Damaged in Reinforced Concrete on Carbonation or Chloride Penetration, Cement and Concrete Research, Vol.18, pp.961-970, 1988
- 5) 権代由範, 庄谷征美, 月永洋一, 子田康弘:塩化物 環境下におけるスケーリング抵抗性の評価試験法 に関する基礎的研究, コンクリート工学論文集, Vol.20, No.1, pp.59-70, 2009
- 6) 伊代田岳史,魚本健人:乾燥による水和停止後の水 分再供給による水和進行と細孔径分布の形成,生産 研究54巻6号,pp.70-73,2002
- 7) 王欣,鮎田耕一,小野定:海水と凍結融解の作用を 受けるモルタルの細孔構造と飽水度,コンクリート 工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.637-642, 2001
- 鎌田英治,千歩修,田畑雅幸,田中宏和:コンクリートの耐凍害性におよぼす細孔構造の役割についての統計的解析,日本建築学会構造系論文集,No.487, pp.1-9,1996