

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 27 日現在

機関番号：51303

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25871028

研究課題名(和文) 応力場を考慮した構造体コンクリートの耐久性照査・劣化予測システムの構築

研究課題名(英文) Development of "durability check and deterioration prediction system" for concrete structures considering stress field

研究代表者

権代 由範 (Gondai, Yoshinori)

仙台高等専門学校・建築デザイン学科・准教授

研究者番号：00553520

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：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らかにするため、圧縮応力場におけるコンクリートの各種物性値や耐久性の変化に着目し検討を行った。その結果、作用応力レベルの相違は劣化進行速度に影響を及ぼすとともに、劣化前後において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、劣化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。さらに、応力レベルの違いによるひび割れの発生性状や変形挙動を評価し、圧縮応力場におけるコンクリートの変形挙動をモデル化することで応力と耐久性との関連性について検討した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we focus on the compressive stress field of concrete and clarify the relationship between stress strength ratio and durability for concrete. As a result, we clarified that the difference in stress level influences the degree of progression of deterioration, and the pore size distribution differs before and after deterioration. These results suggested that the compressive stress corresponding to the elastic region of concrete may suppress degradation progression. Furthermore, we evaluated the occurrence distribution and deformation of cracks due to the difference in stress level, and modeled the deformation behavior of concrete in compressive stress field. From these results, we were able to obtain basic knowledge for constructing a reasonable "durability check / deterioration prediction system".

研究分野：建築材料学, コンクリート工学

キーワード：コンクリート 圧縮応力 常時荷重 応力強度比 耐久性 耐凍害性 スケーリング 透過性

1. 研究開始当初の背景

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。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・物理的变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。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能を直接的に関連付けた研究事例は極めて少ないという現状にある。

2. 研究の目的

構造体コンクリートが曝される種々の荷重条件下で生ずる「応力」が、耐久性(劣化進行速度)に及ぼす影響を明らかにし、定量的かつ合理的な「耐久性照査・劣化予測システム」の確立に寄与する知見の蓄積を目的とする。本研究では、特に構造体コンクリートに作用する圧縮応力に着目し、次に示す5項目について検討する。

- (1) コンクリート供試体に圧縮応力を導入する簡易型荷重システムの構築
- (2) コンクリートのクリープに起因する初期導入応力の継時変化(減衰)の把握
- (3) 導入応力の違いによる各種物性・耐久性(劣化進行速度)の変化の把握
- (4) 応力導入によるミクロ的組織構造の変化と耐久性(劣化進行速度)への影響
- (5) 荷重状態を保持したコンクリートのひび割れ発生性状および変形挙動の把握

3. 研究の方法

- (1) コンクリート供試体に圧縮応力を導入する簡易型荷重フレームの構築

図1に本研究に先駆けて試作した応力導入荷重フレームを示す。本フレームは、簡易に供試体に圧縮応力を導入できるものの荷重軸に偏心が生じ、供試体に均質な応力を伝播させるには技術的経験が必要であった。そこで、荷重時における供試体の歪挙動を正確に把握し、汎用性や再現性を有する簡易型荷重フレームを検討する。

- (2) コンクリートのクリープに起因する初期導入応力の継時変化(減衰)の把握

コンクリートのクリープによる初期導入応力の継時変化(減衰)を把握することで、各

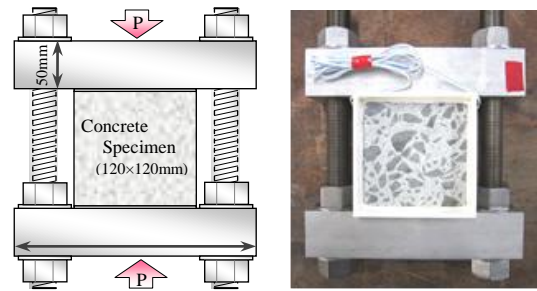


図1 試作型の応力導入荷重フレーム

種耐久試験時の導入応力の制御方法を決定するとともに、各種耐久性の変化に及ぼす影響を明らかにする。

- (3) 導入応力レベルの違いによる各種物性・耐久性(劣化進行速度)の変化の把握
導入応力レベルの違いによる物性の変化を、物質透過性試験(透気および透水試験)を実施し、マクロ的視点から評価する。さらに、耐久性については、耐凍害性(スケーリング)試験により導入応力レベルの違いが凍害の劣化進行速度に及ぼす影響を明らかにする。
- (4) 応力導入によるミクロ的組織構造の変化と耐久性(劣化進行速度)への影響

構造体コンクリートの応力場を再現した供試体のミクロ的組織構造(細孔構造特性)を評価し、導入応力レベルの違いが組織構造の変化に及ぼす影響を明らかにする。組織構造の変化は、応力の作用状態により異なるであろう各種劣化機構を解明する重要な要素となり得る。

- (5) 荷重状態を保持したコンクリートのひび割れ発生性状および変形挙動の把握

応力導入荷重フレームにより荷重状態を保持したコンクリートのひび割れ発生性状および発生分布をマイクロSCOPEにより観察するとともに、導入応力の異なるコンクリートの変形挙動の把握し、コンクリートの劣化進行機構解明のための検討材料とする。

4. 研究成果

- (1) コンクリート供試体に圧縮応力を導入する簡易型荷重システムの構築

室内試験において構造体コンクリートに生じる圧縮応力場を再現するため、図2に示す改良型の応力導入荷重フレーム(SUS304)を作製した。応力導入荷重フレーム(以下、荷重フレーム)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、各種耐久試験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荷重する方式を採用することとした。なお、荷重時における偏心を軽減するため、可動フレーム(図中上部のフレーム)とフレーム軸の接触部分にテフロン製のブッシュを設け、荷重時に生じる摩擦抵抗を減少させた。

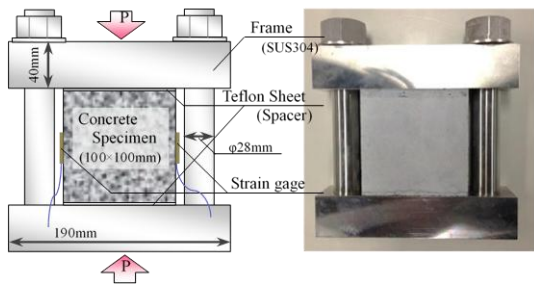


図2 改良型の応力導入载荷フレーム

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 $f \cdot c$ [N/mm²] の割合を応力強度比 f/σ [%] と定義する。次式に応力強度比の算定式を示す。

$$f/\sigma [\%] = f \cdot c / \sigma_c \cdot 100 \quad (1)$$

本研究では、 $f/\sigma=0, 10, 20, 30, 40, 60\%$ の6水準を設定し、供試体への応力導入を行い各物性試験および耐久性試験を実施した。

(2) コンクリートのクリープに起因する初期導入応力の継時変化(減衰)の把握

応力作用下で実施する各種試験期間において、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、応力導入後のひずみ計測を行った。図3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、 $f/\sigma=20\%, 40\%, 60\%$ において、それぞれ $233\mu\epsilon, 446\mu\epsilon, 706\mu\epsilon$ 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(本研究で行う試験の最長期間に相当)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、本研究の範囲では、耐久性評価におけるクリープの影響は比較的小さいものと判断して、以降の実験および考察を行った。

(3) 導入応力レベルの違いによる各種物性・耐久性(劣化進行速度)変化の把握

① 透気性試験 (Torrent Permeability Test)

万能試験機により $f/\sigma=0\%$ から $f/\sigma=70\%$ まで10%刻みで断続的に導入応力を変化・保持させた供試体を対象とし、各応力強度比における透気係数(kT)の測定を行った。ここで、著者の経験則から同一箇所連続で透気試験を適用した際の2回目以降の測定において透気係数が低下する可能性が懸念されたため、トレント透気試験の連続測定における適正測定間隔に関する予備実験を実施した。

図4はトレント透気試験の同一箇所連続測定における測定間隔と透気係数の関係を初回測定における透気係数を基準とする比率で示したものである。測定間隔15min とすることで2回目以降の測定値の変動が初回測定値の5%以内になることを確認した。15min.未満の場合、透気試験による真空度の上昇に伴い、供試体表層の連続空隙内の真空度も上

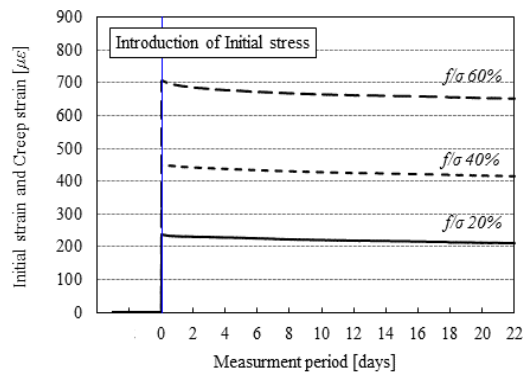


図3 導入応力レベルの異なるコンクリートのクリープ性状

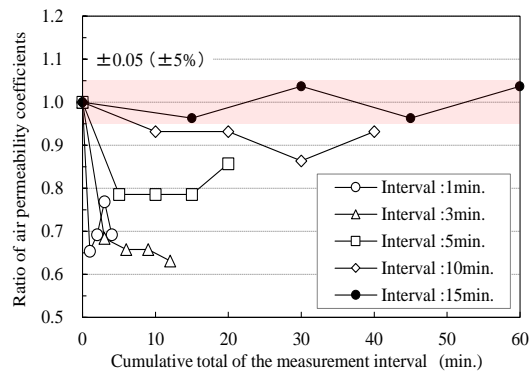


図4 トレント透気試験における連続測定間隔の違いが透気性指標値に及ぼす影響

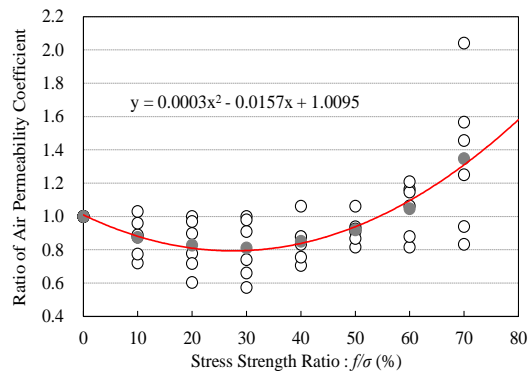


図5 応力強度比と透気性指標値の関係

昇すると共に自由水の引き寄せ作用が生じ、初回測定時の状態に復帰するまでに時間を要するものと思われる。図5は応力強度比と透気係数の関係を、 $f/\sigma=0\%$ の透気係数を基準とする比率で示したものである。ばらつきがあるものの、無载荷状態から応力強度比の増加に伴い透気係数は減少し、 $f/\sigma=30\%$ を境に増加に転じる様相を示した。 $f/\sigma=60\%$ 以上となると無载荷の $f/\sigma=0\%$ と比較して、透気係数は増加する傾向を示した。

② 透水量試験 (JIS A 6909)

透水量評価は、 $f/\sigma=0, 10, 20, 30, 40$ および 60% の圧縮応力を導入、保持した供試体を対象とした。試験面にシリコン樹脂を用いて設置した透水器具に水道水を試験面から250mmの高さまで注水し、7日後の水頭差から透水量(ml)を求めた。

図6は透水期間7日間における透水量の推移を示したものである。これによると $f/\sigma=10\sim 20\%$ の透水量は、無載荷の $f/\sigma=0\%$ と比較して同程度か、或いは、僅かに減少する様相が確認された。 $f/\sigma=30\%$ 以降の実験ケースについては、一部順序が逆転するものの応力強度比の増加に伴い透水量も増加する傾向を示した。無載荷を含む $f/\sigma=0\sim 40\%$ 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 $f/\sigma=60\%$ 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。静的圧縮荷重により生じる微細ひび割れは、 $f/\sigma=50\%$ 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、 $f/\sigma=50\sim 60\%$ の領域ではひび割れがマトリクス中にも形成され始めるとされている。このメカニズムから評価すると、 $f/\sigma=60\%$ 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 応力強度比の違いが凍結融解抵抗性(スケーリング特性)に及ぼす影響

図7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。透水量試験において、最も大きい吸水率を示した $f/\sigma=60\%$ 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と、 $f/\sigma=60\% > f/\sigma=40\% > f/\sigma=0\% \geq f/\sigma=30\% > f/\sigma=10\% > f/\sigma=20\%$ という序列関係を示した。その差は僅かであるが、 $f/\sigma=10\%$ および 20% においては、無載荷の $f/\sigma=0\%$ 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 $f/\sigma=20\%$ においては、無載荷の $f/\sigma=0\%$ 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、吸水率の違いが要因の一つとして考えられるが、 $f/\sigma=40\%$ 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、 $f/\sigma=30\%$ 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 $f/\sigma=30\%$ 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、 $f/\sigma=30\%$ 以上の範囲では作用応力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、

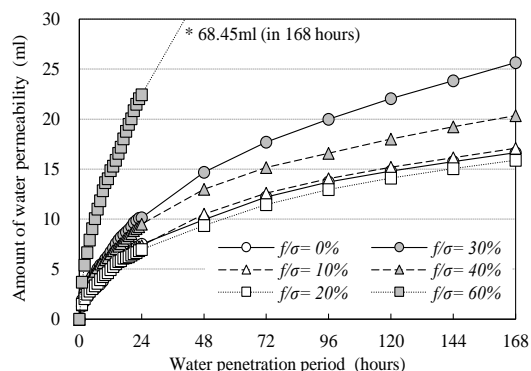


図6 応力強度比の違いによる透水量の変化

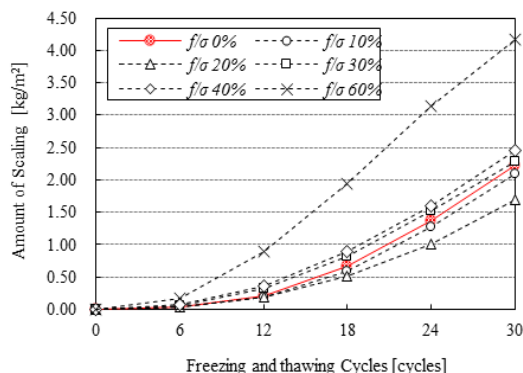


図7 応力強度比の違いがスケーリングの発生性状に及ぼす影響

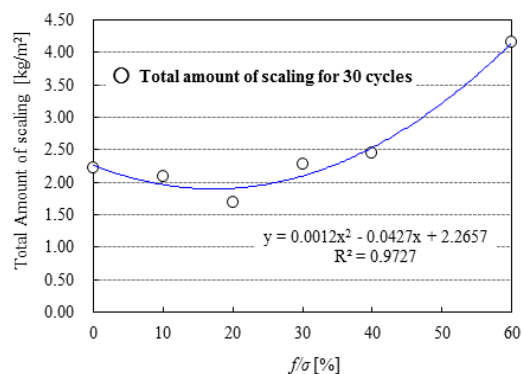


図8 応力強度比と累計スケーリング量

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。

図8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。 $f/\sigma=0\%$ から $f/\sigma=20\%$ にかけてスケーリング量が減少する傾向にあり、 $f/\sigma=20\%$ 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 $f/\sigma=30\%$ 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 $f/\sigma=20\%$ 付近で顕著となることが明らかとなった。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。

(4) 応力導入によるミクロ的組織構造変化

促進凍結融解試験(スケーリング試験)を実施した供試体について、促進試験前後における細孔構造特性の変化を水銀圧入ポロシメーターにより評価した。図9は、スケーリング試験後における $f/\sigma=20\%$ 、 40% および 60% の細孔径分布にスケーリング試験前の細孔径分布(Non Damage)を併せて示したものである。スケーリング試験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。また、図10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 $200\sim 4000\text{nm}$ の領域に着目すると、健全供試体と比較して、 $f/\sigma=60\%$ は細孔量が最も増加しており、 $f/\sigma=0\%$ および $f/\sigma=40\%$ は中程度の増加が確認できる。それに対し、 $f/\sigma=20\%$ 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。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、その変化は耐久性(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。

(5) 載荷状態を保持したコンクリートのひび割れ発生性状および変形挙動

① 圧縮応力場におけるひび割れの発生性状

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、圧縮応力を導入した供試体を対象にマイクロSCOPEによる表面ひび割れの観察を行った。ひび割れの観察は、各供試体の測定対象面に $30\times 30\text{mm}$ のグリッドを作成し、各グリッドに 5mm 幅のトラバースを組み、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するという手法を採用した。

図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、幅の一例を示す。各応力強度比におけるひび割れ本数を比較すると、 $f/\sigma=0\%$ および 20% ではひび割れの発生を確認できず、 $f/\sigma=40\%$ では4本、 $f/\sigma=60\%$ 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、 $f/\sigma=40\%$ および 60% において、それぞれ $7\sim 13\mu\text{m}$ および $4\sim 35\mu\text{m}$ 程度であった。また、 $f/\sigma=40\%$ 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、 $f/\sigma=60\%$ 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。

② 圧縮力によるコンクリートの変形挙動

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。

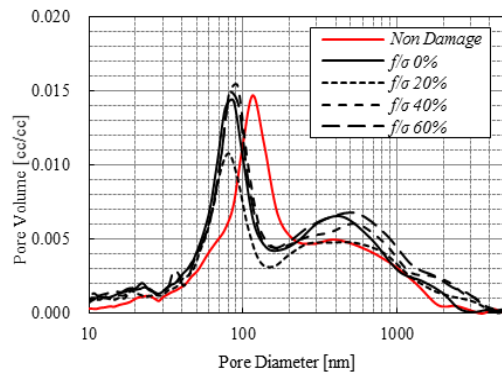


図9 応力強度比毎の細孔構造特性の変化

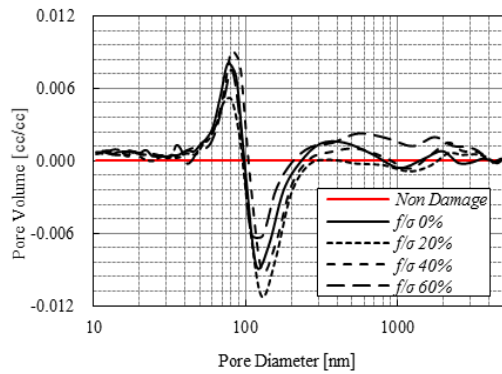


図10 劣化前後における細孔径分布の差分

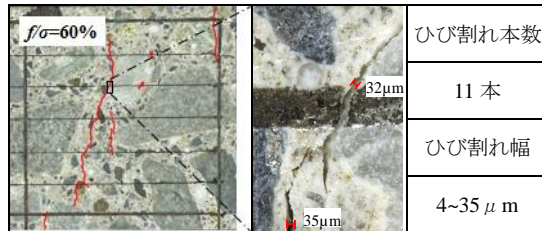


図11 応力強度比により異なるひび割れ発生性状の一例(分布・本数・幅)

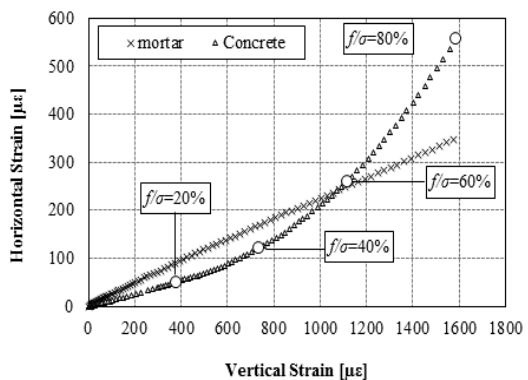


図12 縦ひずみと横ひずみの関係

測定対象面の中心にゲージ長 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。図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、 $f/\sigma=20, 40, 60, 80\%$ に対応する箇所を図中に示す。全体的な

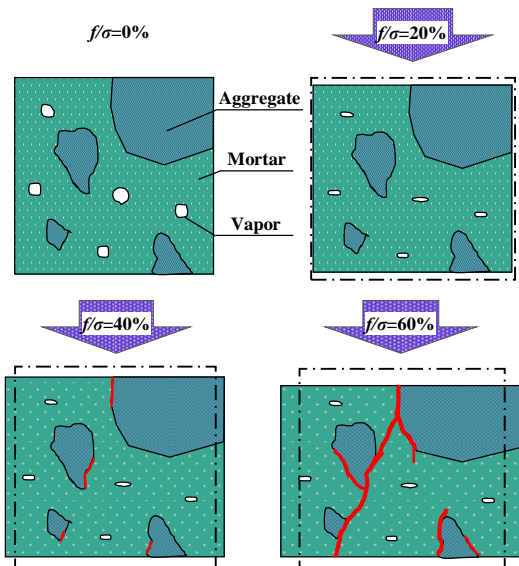


図 13 圧縮応力作用下におけるコンクリートの変形挙動モデル

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 $f/\sigma=20\%$ 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、 $f/\sigma=20\%$ 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、 $f/\sigma=40\%$ 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、 $f/\sigma=30\%$ 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、 $f/\sigma=60\%$ 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とも一致する。

図 11 のひび割れの発生性状、図 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考察し、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。本モデルを図 13 に示す。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 $f/\sigma=40\%$ 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誘導し、コンクリートの耐久性を低下させる。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、圧縮応力と耐久性の間には、大略このような関係性が見出せるものと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- ① 工藤めい, 榎代由範: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, (印刷中), 2017.7, 査読あり
- ② 迫井裕樹, 月永洋一, 阿波稔, 榎代由範: コンクリート表層部に形成される脆弱層の性状に及ぼすブリーディングの影響, コンクリートのブリーディング制御に関するシンポジウム論文集 (JCI-C89), pp.62-66, 2016.3, 査読あり

〔学会発表〕(計 8 件)

- ① 榎代由範, 工藤めい, 野村広道: 圧縮応力作用下における構造体コンクリートの耐久性に関する基礎的検討(その 1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2016.8.24, 福岡大学(福岡市)
- ② 工藤めい, 榎代由範, 野村広道: 圧縮応力作用下における構造体コンクリートの耐久性に関する基礎的検討(その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2016.8.24, 福岡大学(福岡市)
- ③ 工藤めい, 野村広道, 榎代由範: 圧縮応力場における構造体コンクリートのスケーリング抵抗性に関する検討, 日本建築学会東北支部研究報告会, 構造系, 2016.6.18, 東北大学(仙台市)
- ④ 野村広道, 工藤めい, 榎代由範: 常時応力が表層コンクリートの物質透過性および中性化抵抗性に及ぼす影響, 日本建築学会東北支部研究報告会, 構造系, 2016.6.18, 東北大学(仙台市)
- ⑤ 野村広道, 工藤めい, 榎代由範: 応力場を考慮した構造体コンクリートの耐久性評価に関する一考察, 第 20 回高専シンポジウム in 函館, 2015.1.10, 函館工業高等専門学校(函館市)
- ⑥ 佐藤裕, 榎代由範: 繊維補強セメント系材料の基礎物性および耐久性能評価に関する検討, 第 20 回高専シンポジウム in 函館, 2015.1.10, 函館工業高等専門学校(函館市)
- ⑦ 後藤忠平, 月永洋一, 阿波稔, 迫井裕樹, 榎代由範: コンクリート表層部の脆弱層の品質に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2014.9, 神戸大学国際文化学部(神戸市)
- ⑧ 佐藤裕, 榎代由範, 野村広道: 透気性を指標としたコンクリート構造物の耐久性評価手法の検討, 第 19 回高専シンポジウム in 久留米, 2014.1.25, 久留米工業高等専門学校(久留米市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

榎代 由範 (GONDAI, Yoshinori)

仙台高等専門学校・建築デザイン学科・准教授

研究者番号: 00553520