（ 様式D－２ ）
（ 別　　紙 ）

令和５年度　海外派遣研究員研究報告書

令和７年　３月　１日

日本大学理事長　　殿
日 本 大 学 学 長　　殿

所　　属　　理工学部（理工学研究所）
資格・氏名　　准教授・齊藤　準平

■本報告書の内容を公表することは，了承しております。
□本報告書の内容を公表することは，差し控えください。
※いずれかにチェックし（■）提出すること

令和５年度海外派遣研究員（　長期　）の研究実績を，下記のとおり報告いたします。

記

１　区　　分　　長期

２　研 究 課 題

分子動力学的解析を用いたコンクリート部材の破壊挙動に関する研究

３　派 遣 期 間　　西暦　2024 年　3 月　1 日　～　2025 年　2 月　28 日

４　派　遣　先　　英国

５　研 究 目 的

コンクリートに力を与えることによってコンクリート内部に微視的ひび割れが発生し，その後そのひび割れが進展し破壊するまでの段階的な進行挙動を視覚的に直接把握することは実験では容易ではなく，国内外の研究実績は極めて少ないのが現状である。そのため，加力の大きさごとに物理的実験や化学的実験を用いて間接的にその把握を試みているのが実状である。

実験的手法を用いて直接リアルな挙動を取得する方法は真実性が高い。しかしその一方で結果の精度や信頼を得るために多くの個体数を作製する必要があることから，パラメータの設定数が限られるというデメリットがある。その点において，計算力学による解析的手法は，真実性の高い結果が得られる解析手法を習得した後は，解析の設定条件を細かく変化させた多くのパラメータ下の解析結果を得ることができるというメリットを持っている。

本研究の目的は，計算力学を用いた解析的手法によるアプローチから，コンクリートの加力による破壊の進行挙動を解明することである。コンクリートは骨材やセメントや水など性質の異なる材料を複合した材料のため，その破壊挙動は単一材料である鋼材に比較し複雑な破壊挙動を示すため，その挙動の解明は容易ではない。そこで本研究では

骨材に関する条件(骨材寸法,複数骨材の位置関係等)や施工欠陥に伴う空隙に関する条件(骨材下部のブリーディングによる空隙，一般的な空隙)を主なパラメータとし，構造解析によって,圧縮作用下のコンクリートの骨材周辺の応力やひずみに関する基礎的な検討を行う。

６　研　究　概　要

本研究テーマは計算力学の分野であり，その手段はコンピュータを用いた解析的検討となる。ストラスクライド大学ペリダイナミクス研究センターに属し，当該施設のコンピュータを用いて,研究対象であるコンクリート部材の破壊挙動を視覚的に解明することにある。

①研究活動

滞在したストラスクライド大学はグラスゴー市内中心部にある 1796 年に設立された歴史のある大学である。ペリダイナミクス研究センター（PDRC）は，様々な材料の構造部材の破壊に至るまでの挙動の分析をコンピュータによる計算によって解明することに取り組んでいる研究機関である。滞在中は，研究センター長の Erkan Oterkus 教授と Selda Oterkus 教授より，計算力学に関する理論や手法を学び，研究指導を受けた。さらに，PDRC の研究者同士の定期的な研究議論を通じ，当該研究分野の研究動向についての理解や交流を深めた。

1)分子動力学的解析の理論の習得

分子動力学的解析は理論の習得とプログラミング技術を要するため,複数年単位の長期的な研究の継続を要することから，1 年間ではなく長期戦略的に当該解析手法を学ぶことになる。当研究期間においては，分子動力学的解析の理論の理解を中心に取り組んだ。Erkan Oterkus 教授と Selda Oterkus 教授からの指導は基より，研究資料からの学習と研究者同士のディスカッションなどもその理解を助けた。派遣期間中は，週 1 回の全体ミーティングと個別ミーティングが行われた。なお，派遣期間終了後も当該研究機関と継続して研究活動を行う予定である。

2)有限要素解析によるコンクリート部材の破壊挙動の視覚的解明

コンクリート部材の破壊挙動を視覚的に解明する目的を果たすため,且つ計算力学の理論を学ぶため，有限要素解析ソフトウェア(ANSYS Mechanical)を用いて研究を行った。ANSYS Mechanical は構造解析を行うことを可能とし，解析対象は鋼材やコンクリートだけでなくその他の各種材料にも適用でき,構造解析以外にも使用できる汎用性が高いという特徴がある。本ソフトウェアを用いることで,応力やひずみの視覚化から概ね本目的を果たすことが可能となる。

派遣期間中は,本研究の対象となるコンクリートモデルの構造解析に移行する前に当該ソフトウェアの理解と基本操作の取得のための演習に 2.5 か月を費やした。その後，本研究への適用条件や機能選定等の検討のための予備解析に 2 か月,そして本解析に半年間を費やした。解析条件は骨材に関する条件が 840case，施工欠陥に伴う空隙に関する条件が 545case であった。なお，本ソフトウェアは非常に高機能な解析を可能とし，且つ高価なため本研究センターのような特別な機関でのみ使用できる希少なものであり，それを使用できたことはとても幸運であった。

②研究の概要

構造解析によるコンクリート部材の破壊挙動の解明に関する概要(解析条件)を以下に示す。ここでは速報的に外部発表(第 52 回土木学会関東支部技術研究発表会(令和 7 年 3 月 10～11 日開催(群馬工業高等専門学校)))の内容（骨材の条件の違いに関する検討）を中心に記させていただく。

1)解析ソフトウェア

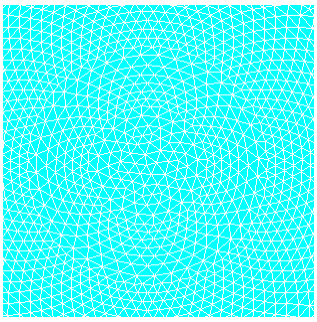
・Ansys Mechanical APDL 2022[1)](有限要素解析)

2)モデル(図-1)

a)骨材の影響に関する解析的検討(解析数:全 840case)

・寸法:全体部=矩形(1 辺 160mm(骨材 1，2 個)，1 辺 170mm(骨材 3 個))，骨材=円形

・メッシュ：形状=triangle(Free)，1 辺サイズ=0.4mm



メッシュ(骨材部拡大)

・骨材の材料特性:ヤング係数=60kN/mm^2, ポアソン比=0.2

・モルタルの材料特性:ヤング係数=20.1kN/mm^2, ポアソン比=0.2, 圧縮強 f'$_c$=37.1N/mm^2, 応力ひずみ関係(σ=5, 10, 15, 20, 25, 30, 35N/mm^2 の各応力時, ひずみ ε=249, 520, 819, 1157, 1558, 2077, 3101 μ)，引張強度 f$_t$=3.71N/mm^2

・応力付与：方向=鉛直および水平，圧縮応力 σ=f'$_c$×0.15，0.3，0.4，0.625，0.875
引張応力 σ=f'$_t$×0.15，0.3，0.4，0.625，0.875

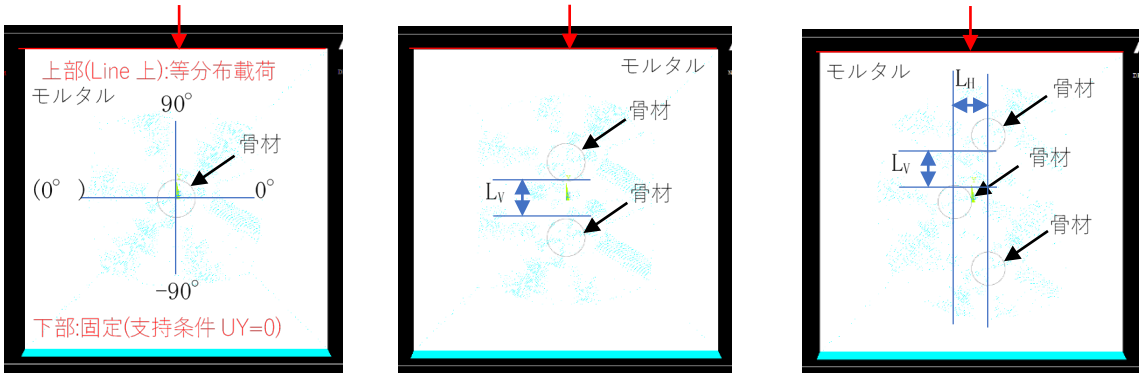
・骨材の配置：1 個(寸法=φ20mm，10mm，5mm，2.5mm)，2 個(寸法=φ20mm，10mm，5mm，2.5mm)(骨材間隔 L$_V$(縦列配置)=40, 20, 10, 5, 0, 1mm)，3 個(寸法=φ20mm)(骨材間隔 L$_V$(縦列配置(上，中，下))=20, 10, 5, 0, 1mm)(上下段骨材の鉛直中心軸と中段骨材の鉛直中心軸の横列距離 L$_H$=40, 20, 10, 5, 0mm)

・骨材とモルタルの境界部：付着あり(Glue 処理)，付着なし(contact-pair 処理，摩擦係数=0.6)

b)施工欠陥(ブリーディング，空隙)に関する解析的検討(外部未発表のため未公開)

3) 収束計算

・ニュートンラプソン法



(a) 骨材 1 個（モデル） (b) 骨材 2 個（L$_V$=20mm ） (c)骨材 3 個(L$_V$=20mm, L$_H$=20mm)

図-1 モデル例（φ=20mm)

７　研究結果・成果

①研究結果・成果

骨材の影響に関する解析的検討の結果は以下のとおりである。

1)骨材１個の場合

a)弾性限度内圧縮応力付与時

弾性限度内の付与応力=0.3f'c の付着あり時の φ=20mm と 5mm の鉛直(図-2)と水平(図-3)ひずみから，以下の知見を得た。

図-2(鉛直ひずみ)から，骨材寸法に関係なく以下の共通事項が認められた。ひずみは骨材周辺で大きいこと(骨材が大きい方がその影響範囲は広い)，骨材に近いほどひずみが大きくなる傾向があること，骨材から離れた広い範囲で骨材周辺より小さいひずみを示し，応力付与による材料の緻密化の要因と考えられる鉛直方向の圧縮ひずみ(-574μ)が存在すること等である。

図-3(水平ひずみ)より，両骨材において骨材周囲では±35～40° 付近で最大引張ひずみ(218μ，209μ)が示され，骨材よりわずかに離れたエリアで大きな引張ひずみ(±90° 方向(175μ，170μ)，0° 方向(162μ，170μ))が示された。なお，±35～40° 付近の最大引張ひずみは最初に骨材とモルタルの境界部の付着ひび割れが発生することが推察される。

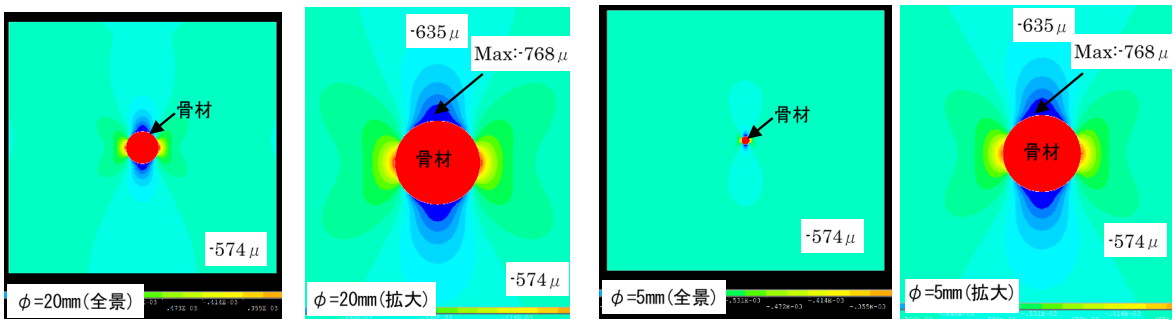


図-2　鉛直ひずみ（全景，拡大）（骨材=1 個）（σ=0.3f'c, 付着あり）（左：φ=20mm，右：φ=5mm）

b)弾性限度外圧縮応力付与時

弾性限度外の付与応力=0.875f'c の付着なしの時の Von-mises plastic ひずみ(図-4)から，以下の知見を得た。

両骨材において 0° 方向の付着ひび割れ(±35～40° 付近の間)と，骨材周辺部±90° 方向で三角形状のひずみ分布が示された。φ=20mm の方がひずみが大きく分布も明らかで破壊の進展が早い状況であるが，φ5mm も同傾向のひずみ分布を示し同破壊機構を追随していると考えられる。

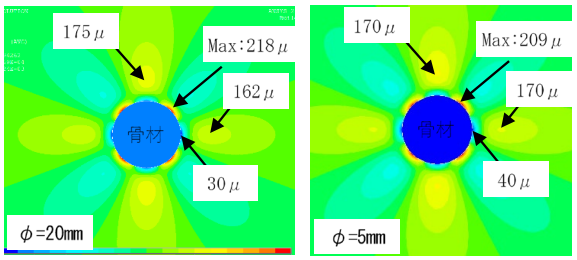


図-3　水平ひずみ（拡大）（骨材=1 個）
（付与応力=0.3f'c，付着あり（左：φ=20mm，右：φ=5mm））

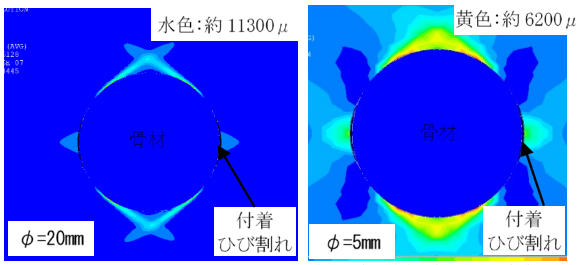


図-4　Von-mises plastic ひずみ（拡大）（骨材=1 個）
（σ=0.875f'c，付着なし（左：φ=20mm，右：φ=5mm））

和泉[2)]らは，初期の付着ひび割れが±45°付近の位置から発生し，その後 0°方向の付着ひび割れの発生，最終的に骨材頂底部の三角形状のひび割れに進展する実験結果を得ており，本解析結果は概ね同傾向を示した。

2)骨材 2，3 個(複数)の場合

骨材が複数のケース(図-5，6)より，複数の骨材が近距離にある場合は，骨材周辺のひずみはその位置関係によって異なる挙動を示した。図-5 のように縦断方向の骨材間隔が近い場合はその間のひずみは大きく，図-6 のように縦断方向の骨材が離れていてもその間に骨材が入り込んでくるとひび割れを類推するひずみが生じた。これは，コンクリート中の骨材が材料分離によって一範囲に偏って存在する場合や，コンクリート全体に骨材が極端に多い配合の場合は通常に比べ破壊しやすいことを示唆した。

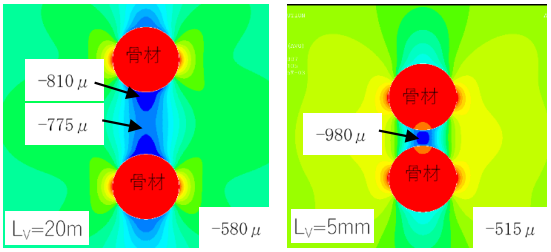


図-5 鉛直ひずみ（拡大）（骨材=2 個，φ=20mm）（σ=0.3f'c，付着あり）（左:LV=20mm，

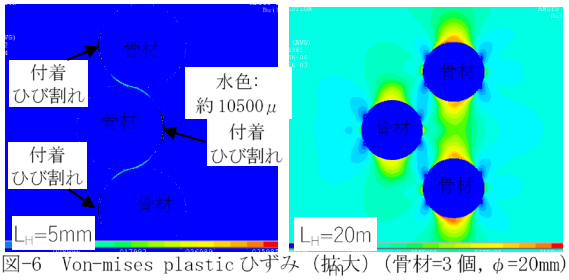


図-6 Von-mises plastic ひずみ（拡大）（骨材=3 個，φ=20mm））（σ=0.625f'c，付着なし）（LV=0.1mm）（左:LH=5mm，右:LH=20mm））

【参考文献】

1)ANSYS:https://www.ansys.com/ja-jp(2024.12.27 閲覧)

2)和泉，三橋ら:コンクリートの圧縮破壊発生機構に関する基礎的研究，日本建築学会論文報告集，pp.11-25，第 289 号，1980

②今後の展開・発展

計算力学による構造解析を学び研究したことによって当該分野をコンクリートに適用する手法の一端を得たことは，今後の自身の研究に活かすとともに，自身の研究フィールドの拡張に寄与する貴重な機会であった。また，当該派遣機関での研究者同士の交流は貴重な縁を育むことができた。今後は本解析で尽せていない条件の解析を含め計算力学を用いた研究を究めていきたいと思う。加えて，コンクリート内部の破壊挙動を視覚的に直接把握する直接的手法による実験の実施を目指しており，本研究結果は破壊現象の把握やその実験時の効率的なパラメータや計測項目とその箇所の設定のための十分な検討資料になる。

謝辞

派遣研究において，Erkan Oterkus 教授，Selda Oterkus 教授，PDRC の皆様には，表現できないほどのたくさんの親切をいただきました。とても幸せな時間を過ごすことができました。ここに付記し謝意を表します。最後に，この貴重な機会を与えていただいた日本大学，派遣期間に様々な協力をいただいた理工学部および交通システム工学科の関係者の皆様，多くの方々に支えられて本海外派遣研究員を勤め，そして無事終えることができました。ここに深く感謝申し上げます。

（ 様式D-２ ）



研究センターのメンバー（Meeting 時）
(Erkan Oterkus 教授(右 4 人目), Selda Oterkus 教授(右 5 人目)
齊藤本人(右 3 人目))



Computer Lab のある研究棟

2025 年 3 月 1 日

齊藤　準平