

京都大学	博士 (工学)	氏名	柴山 淳
論文題目	環境配慮型コンクリートの開発と鉄筋コンクリート建物への適用		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>ジオポリマーコンクリート(GPC)は、フライアッシュや高炉スラグ微粉末等の産業副産物を主材料とするセメント不使用型コンクリートである。GPCは産業副産物の有効利用が可能であるとともに、製造時のCO₂排出量を従来のセメントコンクリート(OPC)と比べて大幅に削減することができる環境配慮型コンクリートとして注目されている。しかしながら、GPCの力学特性に関する研究は極めて少ない。このため、鉄筋コンクリート(RC)部材としての設計法は確立されておらず、また、建物としての構造特性は明らかにされていない。</p> <p>本論文では、フライアッシュをベースとするGPCの材料力学特性およびRC部材としての力学性能を実験的に把握し、構造部材としての適用性を検討するとともに、設計に必要な部材の耐力および復元力特性などの評価法を提案することを目的としている。また、GPCを建物に用いた場合の構造特性を把握することも目的である。論文は以下の9章から構成される。</p> <p>第1章では、研究背景および目的についてまとめている。</p> <p>第2章では、GPCの材料力学特性および部材としての構造性能に関する既往の関連研究を調査し、検討すべき課題を整理することで、本研究の目的を明確にしている。</p> <p>第3章では、GPCの圧縮特性、引張強度、鉄筋との付着性状およびクリープ性状を実験的に検討している。高剛性試験機を用いて圧縮試験を行い、応力下降域を含めたGPCの応力-ひずみ関係を計測した。GPCの圧縮特性は、OPCと比べてヤング係数が3割程度低く、また応力-ひずみ曲線において応力上昇域の直線性が強いこと、および応力下降域の軟化挙動が顕著であることを明らかにした。実験結果に基づき、GPCのヤング係数評価式および応力-ひずみ関係モデルを提案した。さらに、GPCの割裂および曲げ引張強度はOPCと同程度であることも示している。鉄筋との付着性状については、付着応力-すべり関係の概形がOPCと同様であり、OPC用に提案された従来の付着応力-すべり関係モデルが適用可能であることを示し、また、圧縮強度が同じ場合、GPCの付着強度はOPCよりも2割程度高いことを報告している。</p> <p>さらに、材齢約1年までのGPCのクリープ性状を調査し、圧縮強度が同程度の場合、材齢約1年時のGPCのクリープ係数はOPCより小さいことを明らかにした。</p> <p>第4章では、横拘束筋によるGPCの圧縮靱性の改善効果を実験的に検討している。実験変数は、横補強筋体積比である。横拘束されていないGPCは圧縮軟化挙動がOPCより顕著であるが、横拘束筋を配置することで最大強度が上昇するとともに、応力下降域の傾きが緩やかになり圧縮靱性能が大きく向上することを示し、さらに、実験結果に基づき横拘束されたGPCの応力-ひずみ関係モデルを提案した。</p> <p>第5章では、GPCとOPCを用いた鉄筋コンクリート梁に対して4点曲げ載荷試験を行い、曲げ部材としての適用性を検討している。まず、コンクリート強度を実験変数として、GPC梁の曲げ性状を把握する載荷実験を実施した。実験結果から、許容曲げモーメント作用時のGPC梁のたわみ、ひび割れ性状はOPC梁と同様であり、許容応力度設計の範囲においてGPC梁は曲げ部材として適用可能であることを示した。また、GPC</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	柴山 淳
<p>梁の曲げひび割れ本数, 幅, 間隔は, OPC 部材の設計に用いられている日本建築学会「鉄筋コンクリート計算規準・同解説」に記載されている計算法で評価可能であることを明らかにし, また, GPC 梁の曲げひび割れ点から曲げ降伏点までの曲げモーメント-たわみ関係の傾きは OPC 梁と同程度であるという結果も得た。</p> <p>次に, コンクリート圧縮強度と複筋比を実験変数とする GPC 梁の載荷実験を行い, GPC 梁の曲げ終局耐力および復元力特性を把握した。GPC は応力-ひずみ関係における圧縮軟化挙動が OPC より顕著であるため, 曲げ部材に用いた際にコンクリート圧壊後の靱性能が OPC より劣る。実験においても圧縮鉄筋が配置されていない GPC 梁試験体では急激な耐力低下が確認された。しかしながら, 圧縮鉄筋を配置すると, コンクリート圧壊後も急激な耐力低下は発生せず, 靱性的な曲げモーメント-たわみ関係を示すため, GPC 梁は二次設計の範囲においても曲げ部材として適用可能である。</p> <p>また, GPC と OPC のストレスブロック係数の値には差があるものの, 梁の曲げ終局耐力は, ストレスブロックに対する感度が高くないため, ACI のストレスブロック係数を用いて GPC 梁の曲げ終局耐力を評価可能であることを明らかにし, さらに, 部材の設計を行う際に必要となる曲げ復元力特性のモデル化も行った。</p> <p>第 6 章では, GPC 梁に対して地震荷重を想定した逆対称曲げ載荷試験を行い, 破壊性状, せん断ひび割れ耐力, せん断終局耐力および GPC の許容せん断応力度を検討している。実験で確認された GPC 梁のひび割れパターンや破壊モードは, OPC 梁と同様であり, また, 逆対称曲げを受ける OPC 梁に用いられているせん断ひび割れおよびせん断終局耐力算定式は, GPC 梁にそのまま適用可能であることを明らかにした。さらに, OPC 部材の許容応力度設計に用いられている許容せん断応力度は, GPC 梁にそのまま適用可能であることも示した。</p> <p>第 7 章では, 第 3 章~6 章までで得られた知見を整理し, 設計に必要な材料定数および許容応力度を定め, また梁部材の曲げとせん断耐力, および曲げ復元力特性の計算法を提案した。</p> <p>第 8 章では, 6 階建て柱梁骨組建物を対象として, GPC を建物に用いた場合の構造特性を立体骨組解析により検討するとともに, 環境負荷低減効果を試算している。まず, 第 7 章で提案した各種の構造計算法を用いて GPC 建物をモデル化し, OPC 建物との構造特性の違いを解析的に検討している。そこから, 標準層せん断力係数 0.2 の一次設計用地震力が作用した際の GPC 建物の層間変形角は, コンクリートのヤング係数の違いにより OPC 建物よりも大きくなるものの, 検討対象建物においては, 断面寸法を変更せずとも層間変形角が 1/200 以内という設計上の規定を満足することが可能であるという結果を得ている。また, 保有水平耐力の検討を行った結果, GPC 建物の必要保有水平耐力に達するときの層間変形角は, OPC 建物より大きくなるものの検討対象建物においては, 1/100 以内に収まるという結果を得ている。次に, 検討対象とした 6 階建て純ラーメン構造 RC 造建物のコンクリートを OPC から GPC へ置換した場合の, プレキャスト部材製造時点の CO₂ 排出量削減率を試算した結果, 削減率が約 60%となることを示している。</p> <p>第 9 章では, 上記の研究をまとめるとともに, 今後の研究の方向性について述べている。</p>			

氏名	柴山 淳
----	------

(論文審査の結果の要旨)

ジオポリマーコンクリート(GPC)はフライアッシュや高炉スラグ微粉末等の産業副産物を主材料とするセメント不使用型コンクリートである。GPCは産業副産物の有効利用が可能であるとともに、製造時のCO₂排出量を従来のセメントコンクリート(OPC)と比べて大幅に削減することができる環境配慮型コンクリートである。しかしながら、GPCの力学特性に関する研究は極めて少なく、実用化には、材料としての力学特性の把握、鉄筋コンクリート部材としての利用に対する設計法の提案、さらには、建物への利用時の問題点の把握とその解決法の提示が不可欠である。

本論文では、フライアッシュをベースとしたGPCの材料力学特性および鉄筋コンクリート部材に利用した際の部材力学性能を実験的に把握し、構造部材としての適用性を示している。また、設計に必要な部材の耐力および復元力特性などの評価法を提案している。さらには、GPCを適用した建物の構造特性を立体骨組弾塑性解析により把握し、CO₂削減効果をOPCと比べて定量的に示した。得られた主な成果は以下の通りである。

1. GPCの圧縮特性、引張強度、鉄筋との付着およびクリープ性状を実験的に明らかにし、GPCのヤング係数評価式および応力-ひずみ関係モデルを提案した。
2. 横拘束筋によるGPCの圧縮靱性の改善効果を実験により検討し、その結果、横拘束されたGPCの応力-ひずみ関係モデルを提案した。
3. 曲げ部材としての適用性を検討するためGPC梁の曲げ載荷試験を行い、許容曲げモーメント作用時のGPC梁のたわみ、ひび割れ性状がOPC梁と同等であり、許容応力度設計の範囲においてGPC梁は曲げ部材として実構造物に適用可能であることを示した。
4. せん断破壊性状、せん断ひび割れ耐力、せん断終局耐力および許容せん断応力度を検討するためGPC梁に対して地震荷重を想定した逆対称曲げ載荷試験を行い、OPCに適用している設計法がGPCにも利用可能なことを示した。
5. 建物設計に必要なとなるGPC曲げ部材の復元力特性を提案した。
6. 6階建て柱梁骨組建物を対象として、GPCを適用した際の構造特性を立体骨組解析により検討し、現行設計法の適用が可能であることを示した。また、環境負荷低減効果を試算し、OPCを使用した場合に比べてCO₂排出量削減率が約60%となることを示した。

本論文は、建設産業におけるCO₂排出量削減に大きく貢献するフライアッシュベースのGPCを普及させるため、基礎的力学特性から建物に利用した際の設計法までを検討しており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和4年2月21日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。