

博士学位論文

(内容の要旨及び論文審査の結果の要旨)

ISHII Tsuyoshi
氏名 石井 豪
学位の種類 博士 (工学)
学位記番号 博 甲 第 67 号
学位授与 令和 7 年 3 月 23 日
学位授与条件 学位規程第 3 条第 3 項該当
論文題目 混和材を用いた耐酸性を有するプレキャストプレストレストコンクリート構造物の構築に関する研究
論文審査委員 (主査) 教授 岩月 栄治¹
(審査委員) 客員教授 呉 承寧¹ 教授 小池 則満¹ 教授 瀬古 繁喜²
教授 山本 義幸¹

論文内容の要旨

混和材を用いた耐酸性を有するプレキャストプレストレストコンクリート構造物の構築に関する研究

我が国における社会的な課題の一つに持続的な電力供給の確保を目的とした再生可能エネルギーの拡充がある。再生可能エネルギーのうち、一般廃棄物を発酵させた際に発生するメタンガスを利用するバイオマス発電は、火力発電に比べ温室効果ガスの排出が少ないことや、風力や太陽光発電などと比べ安定的に発電できることなどから、今後の普及が期待される発電方法である。しかしながら、現状のバイオマス発電施設は比較的短期間の運用を想定した鋼製の容器構造物の選定例が多く、我が国特有の自然災害リスク、特に地震による損壊や津波による流出に対する潜在的な課題がある。また、建設産業の課題である、建設就労者の減少や、セメント製造由来のCO₂排出量の抑制への対応が急務である。

これらの課題に対し、過去の大地震や津波等の自然災害被災地域において損傷がほとんど見られなかったプレストレストコンクリート (以下 PC) 製の容器構造物のプレキャスト (以下 PCa) 化と、これに適用するコンクリ

ートのセメントの一部を積極的に混和材に置き換えた、CO₂ 排出量を抑制したコンクリートの適用が解決策の一つであると考えられる。

しかしながら、高い初期強度が要求される PCaPC に着目した混和材利用時の耐酸性能に関する知見は少ない。また、混和材を積極的に利用した PCaPC 部材の力学性能に関する知見は少ない。

そこで、本研究では、PCaPC 部材に混和材を積極利用した PCaPC 容器構造物の実現に必要な知見を得ることを目的に、耐酸性の向上効果や各種のコンクリートの特性の把握を行い、実構造部材適用時の力学性能、CO₂ 排出量抑制効果を検討した。また、PCaPC 部材製造時の早期に硫酸腐食抵抗性を評価可能な方法を検討した。

研究の結果から、PCaPC 部材の製造段階に適用可能な硫酸腐食抵抗性の評価方法を見出し提案した。また、PCaPC 部材の耐酸性能と初期強度の両立は可能な混和材種類と置換率を見出し、部材製造後の養生条件による影響を明らかにした。さらには、上記結果から選定したコンクリートを用いた PCaPC 部材が PCaPC 構造物へ適用可能な力学特性を有すること、構造物構築時の CO₂ 排出量に一定の抑制効果があることを明らかにした。本論分は全 8 章で構成される。各章の内容を下記に示す。

1 愛知工業大学 工学部 社会基盤学科 (豊田市)

2 愛知工業大学 工学部 建築学科 (豊田市)

第1章「序論」では、研究の社会的意義として「エネルギー分野の課題」、「建設分野の課題」の解決の必要性を示したうえで、研究対象である「PC 製容器構造物」、「プレキャスト構造」、「混和材の積極利用」の組合せの実現を目的として示し、本論文の構成を示した。

第2章「研究の課題と方針」では、先行研究を整理し、本論文が解決を目指した超えるべき課題を示した。具体的には、部材製造段階での耐酸性能補評価が可能であること、混和材を積極利用した場合の耐酸性と初期強度の両立可能なコンクリートの配合を見出すこと、これらのコンクリートのうち PCaPC 部材の製造が可能な配合を見出すこと、製造された PCaPC 部材の力学性能を明らかにすること、最後に、これらを満足するコンクリートの配合を PCaPC 部材に適用した際の構造物構築時の CO₂ 排出量を把握することである。これらの課題を解決するための本研究における研究の方針を示した。

第3章「耐酸性の評価方法」では、PCaPC 部材の製造時に製造部材表面の耐酸性の評価を簡便に行うことのできる方法について提案を行った。本研究の対象となる気層部の腐食環境に着目した試みに、硫酸を滴下したモルタル片の腐食面の形状変化をノギスにより測定する事例がある。これをもとに、腐食形状を3D 画像として詳細に取得することにより、すり鉢状の腐食形状の勾配の違いが耐酸性の評価指標となることを見出した。この結果から、モルタル表層の硫酸腐食抵抗性の定量的な評価方法を示した。

第4章「耐酸性と初期強度を両立する材料設計」では、早強ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末 6000 (以下、BFS)、フライアッシュ II 種 (以下、FA) を結合材として選定し、これらの組合せと置換率の影響について実験的検討を示した。この結果、耐酸性について、混和材置換率を高炉セメント C 種相当の 70% 以上とすることで耐酸性の向上が見られ、特に BFS と FA の併用効果が高いことを明らかにした。また、コンクリートの耐酸性は腐食面表層の組織の緻密さとの関係が大きいことを明らかとした。次に、初期強度について、上記の耐酸性確保の可能性があると考えられた材料の組合せと混和材置換率における初期強度の発現性について、耐酸性能と初期強度の両立が可能な混和材置換率と水結合材比を見出した。また、BFS と FA 併用による初期強度発現への温度依存

性を明らかとした。

第5章「コンクリートの材料特性」では第4章の結果を受けて選定したコンクリートの材料特性を実験的に確認し、PCaPC 部材の製造に必要な特性である、初期強度発現性、クリープ特性、収縮特性、中性化抵抗性を有することを示した。また、混和材を高置換とすることにより、クリープ係数が大きく低減されること、乾燥収縮が小さくなる傾向が確認されたことから、導入プレストレスの経時的な低下が低減される可能性を示した。

第6章「PCaPC 部材の力学特性」では、第5章で PCaPC 部材への適用が可能であることを確認したコンクリートを用いた、容器構造物の側壁部材を模擬した実物大の PCaPC 部材を製造し、これを用いた曲げ載荷試験による力学特性の確認結果を示した。本研究で選定したコンクリートを用いた PCaPC 部材は、従来のコンクリートを用いた場合と同様の性状を示したことから、現行の設計方法の容器構造物への適用の可能性を示した。また、混和材を用いることにより曲げひび割れが分散する傾向が見られ、想定外の災害等による損傷後の耐久性面における優位性を示した。このひび割れ分散性の要因について、既往の検討例を参考に、混和材を用いたコンクリートの付着強度向上の可能性やクリープ係数低減の影響について言及し、今後の検討課題として示した。

第7章「環境負荷低減効果の試算」では、既往の PCaPC 容器構造物の実例をモデルとして、従来から適用されているコンクリートを用いた場合と、本研究で提案するコンクリートを用いた場合の、構造物建設時に発生する CO₂ 排出量の試算結果を示した。本研究で提案するコンクリートを PCaPC 部材として用いることで、一定の CO₂ 排出量の抑制が可能であることを示した。

第8章「結論」では、本研究で得られた知見を総括し結論をまとめるとともに、混和材を用いた耐酸性を有する PCaPC 構造物の構築に関する今後の課題に関する見解を述べた。以上のように、混和材を積極利用したコンクリートを用いた、耐酸性を有する PCaPC 構造物の構築に関する有用な知見が得られた。

論文審査の結果の要旨

我が国における社会的な課題の一つに持続的な電力供給の確保を目的とした再生可能エネルギーの拡充がある。再生可能エネルギーのうち、一般廃棄物を発酵させた際に発生するメタンガスを利用するバイオマス発電は、火力発電に比べ温室効果ガスの排出が少ないことや、風力や太陽光発電などと比べ安定的に発電できることなどから、今後の普及が期待される発電方法である。しかしながら、現状のバイオマス発電施設は比較的短期間の運用を想定した鋼製の容器構造物の選定例が多く、我が国特有の自然災害リスク、特に地震による損壊や津波による流出に対する潜在的な課題がある。また、建設産業の課題である、建設就労者の減少や、セメント製造由来のCO₂排出量の抑制への対応が急務である。

これらの課題に対し、過去の大地震や津波等の自然災害被災地域において損傷がほとんど見られなかったプレストレストコンクリート（以下 PC）製の容器構造物のプレキャスト（以下 PCa）化と、これに適用するコンクリートのセメントの一部を積極的に混和材に置き換えた、CO₂排出量を抑制したコンクリートの適用が解決策の一つであると考えられる。

しかしながら、高い初期強度が要求される PCaPC に着目した混和材利用時の耐酸性能に関する知見は少ない。また、混和材を積極的に利用した PCaPC 部材の力学性能に関する知見は少ない。

そこで、本研究では、PCaPC 部材に混和材を積極利用した PCaPC 容器構造物の実現に必要な知見を得ることを目的に、耐酸性の向上効果や各種のコンクリートの特性の把握を行い、実構造部材適用時の力学性能、CO₂排出量抑制効果を検討した。また、PCaPC 部材製造時の早期に硫酸腐食抵抗性を評価可能な方法を検討した。

研究の結果から、PCaPC 部材の製造段階に適用可能な硫酸腐食抵抗性の評価方法を見出し提案した。また、PCaPC 部材の耐酸性能と初期強度の両立は可能な混和材種類と置換率を見出し、部材製造後の養生条件による影響を明らかにした。さらには、上記結果から選定したコンクリートを用いた PCaPC 部材が PCaPC 構造物へ適用可能な力学特性を有すること、構造物構築時の CO₂ 排出量に一定の抑制効果があることを明らかにした。本論文は

全 8 章で構成される。各章の内容を下記に示す。

第 1 章「序論」では、研究の社会的意義として「エネルギー分野の課題」、「建設分野の課題」の解決の必要性を示したうえで、研究対象である「PC 製容器構造物」、「プレキャスト構造」、「混和材の積極利用」の組合せの実現を目的として示し、本論文の構成を示した。

第 2 章「研究の課題と方針」では、先行研究を整理し、本論文が解決を目指した超えるべき課題を示した。具体的には、部材製造段階での耐酸性能補評価が可能であること、混和材を積極利用した場合の耐酸性と初期強度の両立可能なコンクリートの配合を見出すこと、これらのコンクリートのうち PCaPC 部材の製造が可能な配合を見出すこと、製造された PCaPC 部材の力学性能を明らかにすること、最後に、これらを満足するコンクリートの配合を PCaPC 部材に適用した際の構造物構築時の CO₂ 排出量を把握することである。これらの課題を解決するための本研究における研究の方針を示した。

第 3 章「耐酸性の評価方法」では、PCaPC 部材の製造時に製造部材表面の耐酸性の評価を簡便に行うことのできる方法について提案を行った。本研究の対象となる気層部の腐食環境に着目した試みに、硫酸を滴下したモルタル片の腐食面の形状変化をノギスにより測定する事例がある。これをもとに、腐食形状を 3D 画像として詳細に取得することにより、すり鉢状の腐食形状の勾配の違いが耐酸性の評価指標となることを見出した。この結果から、モルタル表層の硫酸腐食抵抗性の定量的な評価方法を示した。

第 4 章「耐酸性と初期強度を両立する材料設計」では、早強ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末 6000（以下、BFS）、フライアッシュ II 種（以下、FA）を結合材として選定し、これらの組合せと置換率の影響について実験的検討を示した。この結果、耐酸性について、混和材置換率を高炉セメント C 種相当の 70%以上とすることで耐酸性の向上が見られ、特に BFS と FA の併用効果が高いことを明らかにした。また、コンクリートの耐酸性は腐食面表層の組織の緻密さとの関係が大きいことを明らかとした。次に、初期強度について、上記の耐酸性確保の可能性があると考えられた材料の組合せと混和材置換率における初期強度の発現性について、耐酸性能と初期強

度の両立が可能な混和材置換率と水結合材比を見出した。また、BFSとFA併用による初期強度発現への温度依存性を明らかとした。

第5章「コンクリートの材料特性」では第4章の結果を受けて選定したコンクリートの材料特性を実験的に確認し、PCaPC部材の製造に必要な特性である、初期強度発現性、クリープ特性、収縮特性、中性化抵抗性を有することを示した。また、混和材を高置換とすることにより、クリープ係数が大きく低減されること、乾燥収縮が小さくなる傾向が確認されたことから、導入プレストレスの経時的な低下が低減される可能性を示した。

第6章「PCaPC部材の力学特性」では、第5章でPCaPC部材への適用が可能であることを確認したコンクリートを用いた、容器構造物の側壁部材を模擬した実物大のPCaPC部材を製造し、これを用いた曲げ載荷試験による力学特性の確認結果を示した。本研究で選定したコンクリートを用いたPCaPC部材は、従来のコンクリートを用いた場合と同様の性状を示したことから、現行の設計方法の容器構造物への適用の可能性を示した。また、混和材を用いることにより曲げひび割れが分散する傾向が見られ、想定外の災害等による損傷後の耐久性面における優位性を示した。このひび割れ分散性の要因について、既往の検討例を参考に、混和材を用いたコンクリートの付着強度向上の可能性やクリープ係数低減の影響について言及し、今後の検討課題として示した。

第7章「環境負荷低減効果の試算」では、既往のPCaPC容器構造物の実例をモデルとして、従来から適用されているコンクリートを用いた場合と、本研究で提案するコンクリートを用いた場合の、構造物建設時に発生するCO₂排出量の試算結果を示した。本研究で提案するコンクリートをPCaPC部材として用いることで、一定のCO₂排出量の抑制が可能であることを示した。

第8章「結論」では、本研究で得られた知見を総括し結論をまとめるとともに、混和材を用いた耐酸性を有するPCaPC構造物の構築に関する今後の課題に関する見解を述べた。以上のように、混和材を積極利用したコンクリートを用いた、耐酸性を有するPCaPC構造物の構築に関する有用な知見が得られた。

本研究で得られた混和材を用いた耐酸性を有するプレキャストプレストレストコンクリート構造物の構築に関する知見は、バイオマス発電施設にPCaPC容器構造物の耐酸性向上、および産業副産物・廃棄物である高炉スラグ微粉末とフライアッシュの有効利用による環境負荷低減において工学的に高い価値が認められる。以上のことから当該論文が生産・建設工学専攻の博士論文の水準に十分に達していると判定する。