

# 博士学位論文

(内容の要旨及び論文審査の結果の要旨)

	TAWARA Michikazu
氏名	俵 道和
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博 乙 第 32 号
学位授与	令和 6 年 3 月 23 日
学位授与条件	学位規程第 3 条第 4 項該当
論文題目	プレストレストコンクリートの耐久性向上を目指した $\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ 系塩素固定化材の適用性に 関する研究
論文審査委員	(主査) 教授 呉 承寧 <sup>1</sup> (審査委員) 教授 岩月 栄治 <sup>1</sup> 教授 小池 則満 <sup>1</sup> 教授 鈴木 森晶 <sup>1</sup> 教授 瀬古 繁喜 <sup>2</sup>

## 論文内容の要旨

### プレストレストコンクリートの耐久性向上を目指した $\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ 系塩素固定化材の適用性に関する研究

プレストレストコンクリート(以下、PC と略す)構造物はインフラの重要性や優先度が高く、耐久性確保が重要な課題となっている。また、道路橋示方書では平成 29 年度の改定に伴い適切な維持管理を行うことを前提に設計供用期間として 100 年を標準とすることが規定され長期供用が求められる中で、既存の耐久性向上技術や対策では不十分な場合が見受けられ、さらなるコンクリート自体の耐久性向上技術に関する研究開発が望まれている。また、地球温暖化を緩和するために二酸化炭素排出量の少ない低炭素社会の構築が世界的な課題となっており、コンクリート部門においても二酸化炭素排出量を削減するための対策を講じることが期待されている。その対策のひとつとして、副産物である高炉スラグ微粉末や高炉スラグ細骨材を積極的に用いることが期待されている。また、 $\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$  (以下、 $\text{CA}_2$  と略す)は塩害対策用混和材として開発されたものであるが、鉄筋コンクリートを想定した検討は行われているが、PC 構造物を想定した配合や高炉スラグ微粉末や高炉スラグ細骨材と組み合わせた際の効果について明らかとなっていない。

そこで本研究では、PC 構造物に一般的に使用される早強ポルトランドセメントと耐久性向上および低炭素に寄与すると考えられる高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材、さらに  $\text{CA}_2$  を混合した場合の耐塩害性に着目した評価を行った。その他にも強度特性や中性化、凍結融解およびアルカリシリカ骨材反応などの耐久性、ヤング係数やクリープなどの変形特性、乾燥収縮や自己収縮などの体積変化におよぼす影響を評価し  $\text{CA}_2$  を適用することによる PC 構造物の長寿命化を目指した検討を行った。本論文は 8 章の構成であり、各章の内容を以下に示す。

第 1 章は序論であり、社会環境を踏まえた本研究の目的および論文構成について示した。

第 2 章では、 $\text{CA}_2$  について反応のメカニズムや塩化物イオンの固定化に関する既往の研究成果について整理した。さらに、耐久性向上および環境負荷低減を念頭に置いて  $\text{CA}_2$  と組み合わせる材料として選定した高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材の特性についても整理をするとともに、 $\text{CA}_2$  の新規材料として検討すべき課題についてまとめた。

第 3 章ではペースト、第 4 章ではモルタルを用いて塩素固定化材の塩分浸透抵抗性の向上効果を化学的効果と物

<sup>1</sup> 愛知工業大学 工学部 土木工学科 (豊田市)

<sup>2</sup> 愛知工業大学 工学部 建築学科 (豊田市)

理的効果の両面について評価を行い、その効果を明らかにすることと、CA<sub>2</sub>を用いて固定化された塩化物イオンについて中性化の影響を受けた際の分解現象に着目した検討を行った。

その結果、化学的効果については、X線回折により水和生成物を同定し、熱分析により水酸化カルシウムを定量的に分析することで、CA<sub>2</sub>と水酸化カルシウムが反応しハイドロカルマイト族に分類される水和生成物を生成し塩化物イオンを固定化する現象を明らかにした。また物理的効果については、細孔構造による評価を行い、CA<sub>2</sub>を添加することでセメント硬化体の内部組織を緻密化させる効果が明らかとなった。さらに、CA<sub>2</sub>を混和した配合について中性化の影響を受けた際の影響についてEPMAを用いてCA<sub>2</sub>の有無による塩化物イオン濃度の変化について評価を行ったが、CA<sub>2</sub>で固定化された塩化物イオンについて分解現象が進展するような現象は認められなかった。

第5章では、コンクリートを用いてフレッシュ性状、硬化性状、体積変化および塩分浸透抵抗性およびそれ以外の耐久性についてCA<sub>2</sub>を添加した際の影響を評価した。

CA<sub>2</sub>を添加したコンクリートのフレッシュ性状に与える影響について、可使時間および凝結時間が短くなる傾向が確認され、さらに、ブリーディングが減少する効果が認められた。可使時間および凝結時間が短くなる効果について、施工サイクルを短縮できる可能性があるためPCaPC部材の製造に関しては有利に働くことが示唆された。また、CA<sub>2</sub>を用いることでブリーディングが減少する効果についても、耐久性向上に寄与することが明らかとなった。

CA<sub>2</sub>を用いた場合のコンクリートの塩分浸透抑制効果について、硝酸銀溶液噴霧法、実効拡散係数および見かけの拡散係数で比較を行った。その結果、配合種類およびCA<sub>2</sub>の添加量を変化させた場合においても試験方法ごとの相関性が確認された。また、アルカリシリカ骨材反応に対するCA<sub>2</sub>の影響を確認したところ、CA<sub>2</sub>を用いることで緻密化する効果、さらに水酸化カルシウムなどのアルカリ分を消費する効果によってアルカリシリカ骨材反応を抑制する効果が解明された。さらに、PC構造物の設計の際に必要な乾燥収縮やクリープについてはCA<sub>2</sub>による大きな影響は確認されなかったが、高炉スラグ微粉末に添加された石こうとCA<sub>2</sub>が反応することで自己収縮が低減される効果が明らかとなった。

第6章では、室内試験で確認した項目について、実際にプレストレストを導入した大型のコンクリート試験体を作製し、屋外の環境で塩水浸漬乾燥繰返しの暴露試験を行った際の耐久性および耐荷性能について検証を行った。

塩分浸透抵抗性に関して、硝酸銀噴霧法、非定常・電気抵抗率試験およびEPMAを用いて測定した見かけの拡散係数については、CA<sub>2</sub>を用いることによる明確な塩分浸透抑制効果が確認された。しかしながら非破壊試験として実施した電気抵抗率試験および表層透気係数については、CA<sub>2</sub>の有無による明確な差は認められなかったため今後より詳細な検討が必要である。

PC部材の曲げ耐力については、実験値を計算値で除した値は1.2以上の値を示しており、CA<sub>2</sub>を混和した配合についても十分な曲げ性能を有していることが明らかとなった。

第7章では、得られた実験結果とFEM塩分浸透解析ソフトを用いて、CA<sub>2</sub>の影響によるPC構造物の耐用年数の評価を行い、さらに結合材種類およびCA<sub>2</sub>の添加率を変化させた場合の見かけの拡散係数の低減係数の計算方法を提案し、FEM解析などにCA<sub>2</sub>の効果を組み込むことでCA<sub>2</sub>の効果をより汎用的に検討できる方法を提案した。

第8章は結論であり、本研究で得られた知見を総括し結論をまとめ、CA<sub>2</sub>を用いたコンクリートの耐久性向上効果の今後の課題に関して見解を述べた。以上より、CA<sub>2</sub>を用いることによるPC構造物の耐久性向上に関して有用な知見が得られた。

#### 論文審査の結果の要旨

プレストレストコンクリート（以下、PCと略す）構造物はインフラの重要性や優先度が高く、耐久性確保が重要な課題となっている。また、道路橋示方書では平成29年度の改定に伴い適切な維持管理を行うことを前提に設計供用期間として100年を標準とすることが規定され長期供用が求められる中で、既存の耐久性向上技術や対策では不十分な場合が見受けられ、さらなるコンクリート自体の耐久性向上技術に関する研究開発が望まれている。また、地球温暖化を緩和するために二酸化炭素排出量の少ない低炭素社会の構築が世界的な課題となっており、コンクリート部門においても二酸化炭素排出量を削減するための

対策を講じることが期待されている。その対策のひとつとして、副産物である高炉スラグ微粉末や高炉スラグ細骨材を積極的に用いることが期待されている。また、 $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ （以下、 $\text{CA}_2$ と略す）は塩害対策用混和材として開発されたものであるが、鉄筋コンクリートを想定した検討は行われているが、PC 構造物を想定した配合や高炉スラグ微粉末や高炉スラグ細骨材と組み合わせた際の効果について明らかとなっていない。

そこで本研究では、PC 構造物に一般的に使用される早強ポルトランドセメントと耐久性向上および低炭素に寄与すると考えられる高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材、さらに  $\text{CA}_2$  を混和した場合の耐塩害性に着目した評価を行った。その他にも強度特性や中性化、凍結融解およびアルカリシリカ骨材反応などの耐久性、ヤング係数やクリープなどの変形特性、乾燥収縮や自己収縮などの体積変化におよぼす影響を評価し  $\text{CA}_2$  を適用することによる PC 構造物の長寿命化を目指した検討を行った。本論文は 8 章の構成であり、各章の内容を以下に示す。

第 1 章は序論であり、社会環境を踏まえた本研究の目的および論文構成について示した。

第 2 章では、 $\text{CA}_2$  について反応のメカニズムや塩化物イオンの固定化に関する既往の研究成果について整理した。さらに、耐久性向上および環境負荷低減を念頭に置いて  $\text{CA}_2$  と組み合わせる材料として選定した高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材の特性についても整理するとともに、 $\text{CA}_2$  の新規材料として検討すべき課題についてまとめた。

第 3 章ではペースト、第 4 章ではモルタルを用いて  $\text{CA}_2$  の塩分浸透抵抗性の向上効果を化学的效果と物理的效果の両面について評価を行い、その効果を明らかにすると、 $\text{CA}_2$  を用いて固定化された塩化物イオンについて中性化の影響を受けた際の分解現象に着目した検討を行った。

その結果、化学的效果については、X 線回折により水和生成物を同定し、熱分析により水酸化カルシウムを定量的に分析することで、 $\text{CA}_2$  と水酸化カルシウムが反応し水酸カルシウム族に分類される水和生成物を生成し塩化物イオンを固定化する現象を明らかにした。また物理的效果については、細孔構造による評価を行い、 $\text{CA}_2$  を混和することでセメント硬化体の内部組織を緻密化させる効果が明らかとなった。さらに、 $\text{CA}_2$  を混和した配合について

中性化の影響を受けた際の影響について EPMA を用いて  $\text{CA}_2$  の有無による塩化物イオン濃度の変化について評価を行ったが、 $\text{CA}_2$  で固定化された塩化物イオンについて分解現象が進展するような現象は認められなかった。

第 5 章では、コンクリートを用いてフレッシュ性状、硬化性状、体積変化および塩分浸透抵抗性およびそれ以外の耐久性について  $\text{CA}_2$  を混和した際の影響を評価した。

$\text{CA}_2$  を混和したコンクリートのフレッシュ性状に与える影響について、可使用時間および凝結時間が短くなる傾向が確認され、さらに、ブリーディングが減少する効果が認められた。可使用時間および凝結時間が短くなる効果について、施工サイクルを短縮できる可能性があるため PCaPC 部材の製造に関しては有利に働くことが示唆された。また、 $\text{CA}_2$  を用いることでブリーディングが減少する効果についても、耐久性向上に寄与することが明らかとなった。

$\text{CA}_2$  を用いた場合のコンクリートの塩分浸透抑制効果について、硝酸銀溶液噴霧法、実効拡散係数および見かけの拡散係数で比較を行った。その結果、配合種類および  $\text{CA}_2$  の混和量を変化させた場合においても試験方法ごとの相関性が確認された。また、アルカリシリカ骨材反応に対する  $\text{CA}_2$  の影響を確認したところ、 $\text{CA}_2$  を用いることで緻密化する効果、さらに水酸化カルシウムなどのアルカリ分を消費する効果によってアルカリシリカ骨材反応を抑制する効果が解明された。さらに、PC 構造物の設計の際に必要な乾燥収縮やクリープについては  $\text{CA}_2$  による大きな影響は確認されなかったが、高炉スラグ微粉末に混和された石こうと  $\text{CA}_2$  が反応することで自己収縮が低減される効果が明らかとなった。

第 6 章では、室内試験で確認した項目について、実際にプレストレストを導入した大型のコンクリート試験体を作製し、屋外の環境で塩水浸漬乾燥繰返しの暴露試験を行った際の耐久性および耐荷性能について検証を行った。

塩分浸透抵抗性に関して、硝酸銀噴霧法、非定常・電気抵抗率試験および EPMA を用いて測定した見かけの拡散係数については、 $\text{CA}_2$  を用いることによる明確な塩分浸透抑制効果が確認された。しかしながら非破壊試験として実施した電気抵抗率試験およびトレント法による透気係数については、 $\text{CA}_2$  の有無による明確な差は認められなかったため今後より詳細な検討が必要である。

PC 部材の曲げ耐力については、実験値を計算値で除し

た値は 1.2 以上の値を示しており、 $CA_2$ を混和した配合についても十分な曲げ性能を有していることが明らかとなった。

第 7 章では、得られた実験結果と FEM 塩分浸透解析ソフトを用いて、 $CA_2$ の影響による PC 構造物の耐用年数の評価を行い、さらに結合材種類および  $CA_2$ の混和率を変化させた場合の見かけの拡散係数の低減係数の計算方法を提案し、FEM 解析などに  $CA_2$ の効果を組み込むことで  $CA_2$ の効果をより汎用的に検討できる方法を提案した。

第 8 章は結論であり、本研究で得られた知見を総括し結論をまとめ、 $CA_2$ を用いたコンクリートの耐久性向上効果の今後の課題に関して見解を述べた。以上より、 $CA_2$ を用いることによる PC 構造物の耐久性向上に関して有用な知見が得られた。

以上より、当該論文は本専攻における博士（工学）の学位水準を十分に満たしているものと判定する。