

学位論文の要旨

氏名	松元淳一
学位論文題目	高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート構造物の複合劣化環境における耐久性に関する研究

鉄筋コンクリート構造物の塩害、炭酸化、化学的侵食などの単独劣化については、劣化機構がある程度明らかとなってきており、2007年制定のコンクリート標準示方書「維持管理編」では、各劣化機構別に点検手法から補修、補強方法まで詳細に説明がされている。しかしながら、実際のコンクリート構造物では「塩害と炭酸化」、「酸性雨と炭酸化」などの複数の劣化機構の相互作用による複合劣化が生じている場合も多く、これらについては、十分な検討がなされていないのが現状である。

一方、製鉄所の高炉において銑鉄を精製する際の副産物、すなわち、産業廃棄物である高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの耐久性についても既にある程度の知見が得られており、コンクリート構造物の塩害対策やアルカリシリカ反応（以下、ASR）対策の一つとして広く使用されているものの、複合劣化環境における性能については、未だ不明な点が多い。

そこで、本論文では、高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリートあるいはモルタルが複合劣化環境に曝された場合における耐久性について定量的に明らかにすることを試み、複合環境下における劣化の相互関係を明確にするとともに、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの適切な使用方法および評価方法について提言した。

本論文は以下に示すように8章からなる。

第1章では、今までの鉄筋コンクリート構造物の設計手法の流れを示し、現行の性能照査型の設計手法では対応できない複合劣化や高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの有効性あるいは問題点を挙げた上で、本研究の背景と目的について概説した。

第2章では、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの物性や性能に関する既往の研究および近年実施されている研究について取りまとめた。また、鉄筋コンクリート構造物の劣化現象である塩害、炭酸化、アルカリシリカ反応などの単独劣化メカニズムを、最近の研究動向を含めて、明らかになっている点と不明な点を整理した。さらに、コンクリート構造物の複合劣化の概念について記した。

第3章では、高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート構造物の塩害と炭酸化の複合環境下における主要な劣化現象、すなわち、塩分浸透、炭酸化、鉄筋腐食について定量的に把握するため、各種要因をパラメータとした実験的検討を試み、以下の点を明らかとした。

- ・高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、水結合材比やスラグ置換率の如何に拘らず、複合劣化環境においても塩化物イオンの浸透に対する抵抗性は極めて高い。
- ・炭酸化の進行は、炭酸化単独の場合と同様にスラグ混入量が増加するに従って増大する。ただし、スラグ置換率が40%以上になると炭酸化単独よりもかえって抑制される傾向にある。
- ・スラグ置換率40%から50%の間で鉄筋腐食抑制効果が顕著となるのに対し、スラグ置換率が30%以下の場合あるいは60%になると、必ずしも鉄筋腐食抑制効果が高いとは限らない。
- ・高炉スラグ微粉末でセメントの一部を置換したモルタルならびにコンクリートにおいても内部鉄筋の腐食性は、自由塩化物イオン濃度と水酸化物イオン濃度の比 ($[Cl^-]/[OH^-]$ の比) によって決まり、

別記様式第3号-2

この比が0.3以下では鉄筋腐食はほぼ抑制され、0.6以上では顕著となる。

第4章では、酸性雨と炭酸化の複合劣化環境に高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート構造物が曝された場合における主要な劣化現象、すなわち、表面劣化性状、炭酸化、鉄筋腐食について定量的に把握するため、実験的に検討を行い、その結果、以下の点を明確にした。

- ・表面劣化性状については、セメント質量の50%以上を高炉スラグ微粉末で置換することによって、酸性雨による表面の赤褐色化が弱まる結果を示した。
- ・セメントの一部を高炉スラグ微粉末に置換して用いた場合は、普通ポルトランドセメント単独の場合よりも酸性雨によるコンクリートの炭酸化および鉄筋腐食の進行が速くなる傾向にある。
- ・スラグ置換率が大きくなるにつれて、コンクリートの炭酸化や鉄筋腐食が大きくなる傾向を示した。
- ・高炉スラグ微粉末を使用した場合でも、初期養生を十分に行うことで、炭酸化や、鉄筋腐食の増加をある程度抑制することができるが、普通セメントのみの場合と同程度となるまでには至らない。

第5章では、塩害とASRの複合劣化の進行に及ぼす高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの有効性を、①モルタルに予めNaClを混入したモルタルバー試験、②実際に外部からの塩化物イオンの浸透する状況を模擬した塩水乾湿繰返し試験、の2つの実験から定量的に把握することを試み、以下の点を明らかとした。

- ・同じNa⁺を含むNaClとNaOHではASRに与える影響は異なり、普通セメントを使用した場合にはNaClの方がASRをより進行させるのに対し、高炉スラグ微粉末使用の場合にはこの傾向は明確には認められず、むしろ、NaOHの影響の方が大きいようであった。
- ・モルタルに予めNaClを添加したモルタルバー法の結果からでは、NaClの添加量が増加するに従ってASRによる膨張量も増大する傾向が認められた。
- ・コンクリートに外部からNaClが浸透する環境に高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートが曝された場合、コンクリート表層部に高濃度のNaClが蓄積してもASRの発生は抑制されており、モルタルに予めNaClを混入したモルタルバー法の結果とは異なるものとなった。
- ・反応性骨材を使用した場合でも高炉スラグ微粉末でセメント質量の50%を置換したコンクリートは、塩化物イオンの浸透に対する抵抗性および防食効果のいずれも塩害単独の環境と同じく高い。

第6章では、高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート構造物に塩害、炭酸化およびASRの3種類の劣化が複合的に作用した場合の主要な劣化現象の主従関係を明確にするため、各種要因をパラメータとした実験的検討を試み、以下の点を明らかとした。

- ・セメント質量の一部を高炉スラグ微粉末で置換することで、3種類の劣化が作用するような複合劣化環境においてもASR抑制効果は極めて高い。
- ・炭酸化の進行は、炭酸化単独の環境とほぼ同程度である。
- ・塩分浸透に関しては、塩害単独の環境と同様に顕著な抑制効果である。
- ・スラグ置換率50%コンクリート中の鉄筋の腐食は、塩害および炭酸化の複合環境と同様であった。

第7章では、第3章から第6章までの結果を基に、任意の劣化現象が複合した場合の劣化の進行について考察を加えた。

第8章は、本論文の結論として、これら一連の検討内容と得られた成果を総括した。

論文審査の要旨

報告番号	理工研 第295号	氏名	松元 淳一
審査委員	主査	武若 耕司	
	副査	松本 進	徳富 久二
		山口 明伸	

学位論文題目 高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート構造物の
複合劣化環境における耐久性に関する研究

(A Study on Durability of Concrete Structures Using Ground Granulated Blast-Furnace Slag
under the Complex Deterioration Condition)

審査要旨

提出された学位論文および論文目録等を基に学位論文審査を実施した。本論文は、8章より構成されている。第1章は、序論であり、本研究の背景と目的について概説している。

第2章では、セメントの一部を高炉スラグ微粉末で置換したコンクリート（以下、高炉スラグコンクリート）の物性や性能に関する既往の研究、ならびにコンクリート構造物の劣化現象に関する最近の研究動向を整理するとともに、コンクリート構造物の複合劣化の概念について記している。

第3章では、高炉スラグコンクリートの「塩害」と「炭酸化」の複合環境下における主要な劣化現象についての定量的に把握するための実験的検討を試み、①複合劣化環境においても塩化物イオンの浸透に対する抵抗性が極めて高い、②炭酸化の進行は、スラグ置換量の増加とともに早くなるが、スラグ置換率が40%以上になると炭酸化単独よりもかえってその速度は抑制される、③スラグ置換率40%から50%の間で鉄筋腐食抑制効果が顕著となり、その理由は、コンクリート中の鉄筋の腐食性が細孔溶液中の $[Cl^-]/[OH^-]$ の比によって決まり、この比が0.3以下では鉄筋腐食はほぼ抑制され、0.6以上では顕著となることによる、等を明らかにしている。

第4章では、「酸性雨」と「炭酸化」の複合劣化環境に高炉スラグコンクリートが曝された場合の主要な劣化現象について定量的に把握するための実験的検討を行い、①セメント50%以上を高炉スラグ微粉末で置換することで酸性雨による表面の赤褐色化が弱まる、②高炉スラグ微粉末を混入することで普通セメント単独の場合よりも酸性雨によるコンクリートの炭酸化および鉄筋腐食の進行が速くなる、等を明らかにしている。

第5章では、「塩害」と「アルカリ骨材反応(ASR)」の複合劣化に対する高炉スラグコンクリートの有効性を実験的に定量評価することを試み、①高炉スラグコンクリートに予めNaClが添加されている場合、その添加量の増加とともにASRによる膨張量も増大するが、外部からコンクリートにNaClが侵入する場合には、コンクリート表層部に高濃度のNaClが蓄積しても必ずしもASRが発生するとは限らない、②高炉スラグ微粉末でセメントの50%を置換することで、塩害抵抗性は塩害単独の環境と同程度に高い、等を明らかにしている。

第6章では、高炉スラグコンクリートに「塩害」、「炭酸化」および「ASR」が複合的に作用した場合の主要な劣化現象を明確にするための実験的検討を試み、①このような複合劣化環境においても高炉スラグコンクリートのASR抑制効果は高い、②炭酸化の進行は炭酸化単独の環境と同程度である、③塩分浸透に関しては顕著な抑制効果があり、鉄筋腐食性は塩害と炭酸化の複合環境の場合と同様の傾向を示す、等が明らかにしている。

第7章では、第3～6章までの結果を踏まえ、任意の劣化現象が複合した場合の劣化進行過程について考察を加えている。

第8章は、結論として、以上の一連の検討内容と得られた成果を総括している。

以上、本論文は、産業副産物であり、近年有効活用が進められている高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート構造物を対象とし、さらに複合劣化という実現象の再現が困難な課題に対して果敢に挑み、多角的かつきめの細かな実験を行うことによって、複合劣化現象を定量的に解明するとともに、高炉スラグ微粉末の最適適用量等について提言を行っている。その成果は、高炉スラグ微粉末の有効活用に寄与するとともに、これを使用したコンクリート構造物の設計段階あるいは維持管理段階における耐久性の定量評価に大きく寄与する。よって、審査委員会は、本論文を学位（博士）の学位論文として合格と判定するものである。

最終試験結果の要旨

報告番号	理工研 第295号		氏名	松元 淳一
審査委員	主査	武若 耕司		
	副査	松本 進		徳富 久二
		山口 明伸		

平成21年2月17日（火）に論文発表会が開催され、1時間の説明の後、約40分間の活発な質疑応答が発表者と4名の審査委員を含む46名の参加者の間でなされ、的確な回答が得られた。主な質疑応答の内容を以下に記す。

【質問】供試体の作製において試験面をどのように設定したか。実構造物では、ブリージングの影響を受ける部分が最も劣化の影響を受けやすい部分となり、その様な部分を試験面として実験を行うのが妥当と考える。

【回答】今回の試験では、全ての実験において、コンクリートの品質のばらつきの最も少ない面をあえて選んだ。したがって、ブリージングの影響を受けるような部分はあえて試験面から外したが、これは、試験結果のばらつきを出来るだけ小さくするためのものである。その代わりに、構造物にブリージングなどによる品質低下部分があることも考慮し、水セメント比の高い低品質コンクリートを用いた試験も併せて実施した。

【質問】高炉スラグ微粉末をコンクリートに用いることで、塩化物イオンがコンクリート表面付近に濃縮し内部に侵入しないメカニズムは何か。また、スラグの粉末度を変えることによりこの状況に変化が生じるか。

【回答】高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは普通コンクリートに比べて塩化物イオンの固定化能力が高い。このことは本研究でも確認しており、これが塩化物イオンの内部への侵入を抑制している最大の理由と考えている。粉末度の違いについては本研究では検討を行っていないが、少なからず影響はあると考える。

【質問】 $[Cl^-]/[OH^-]$ の測定方法について教えてほしい。

【回答】本来ならば、コンクリート中の細孔溶液を直接抽出してその中のイオン濃度を測るのがよいと考えるが、この方法は測定が極めて難しいために、本研究では、コンクリート試料中の可溶性塩化物イオンを測定し、その値を東大の石田先生が提案している換算式を用いて、自由塩化物イオン濃度 $[Cl^-]$ に換算した。また、 $[OH^-]$ については、コンクリート粉末試料を少量の蒸留水に浸漬し、その溶液のpHを測定することにより求めた。これらは簡易な方法ではあるが、 $[Cl^-]/[OH^-]$ を評価する上では大きな問題はないと考えている。

【質問】セメントに対するスラグ置換率45~55%が耐久性上最も適当ということであるが、一般に海洋構造物ではかぶりが厚く設計されている。このような状況でもこの範囲の置換率でスラグを用いる必要があるのか。

【回答】今回の研究における炭酸化と塩害の複合劣化の想定環境は、海岸線から100m~200m程度離れた環境であり、海水の影響を直接受ける環境は想定していない。なお、海水の影響を直接受けるような環境では、炭酸化の影響はそれほど大きくなく塩害が卓越した環境になると考えている。

【質問】本検討結果の妥当性を検証する意味では、実環境下の構造物あるいは供試体での劣化状況との比較が重要と考えるが、これを行っているか。

【回答】今回の結果は室内での促進試験によるものであるため、実環境での状況との対応は必要であるが、高炉スラグ微粉末を使用した構造物は未だそれ程多くなく、長期の劣化状況を比較するまでは至らなかった。

【質問】今回の成果を構造物の耐久設計に取り込むためには、本結果を一般化させ、構造物のどのような設計条件においても劣化進行の解が得られるようにする必要があるが、その点についてどのように考えるか。

【回答】本研究のまとめとして、任意の劣化現象が複合した場合の劣化進行過程について考察を加えたが、その結果を基にした複合劣化シミュレーションモデルの構築までには至らなかった。このモデルの構築には引き続き取り組んでいくが、これが完成すれば、本成果を耐久設計に取り込めると考えている。

以上の質疑も含め11件の質疑とそれに対する応答があり、その結果、4名の審査委員は、申請者が大学院博士後期課程修了者とした十分な学力と見識を有するものと認め、博士（工学）の学位を与えるに足りる資格を有するものと判定した。