

学位論文題名

コンクリートのアルカリ骨材反応に関する研究

学位論文内容の要旨

本論文は、コンクリート建造物の早期劣化を引き起こすアルカリ骨材反応を研究対象とし、主として化学的側面からコンクリート劣化現象の解明を試みたものである。

コンクリートが我が国で使用され始めてから100年余りが経過している。コンクリートは今や我々の生活に不可欠の建設材料となっており、コンクリート構造物は社会資本として重要な位置付けにあるものが多い。かつてはコンクリートは永久構造物であると信じられていた。しかしながら近年早期に劣化が進行するコンクリートの事例が数多く見出されており、コンクリートの早期劣化対策は重要な社会的研究課題となってきた。

セメントの硬化が化学反応によるものであると同様、コンクリートの劣化も、多くの場合、化学反応の結果引き起こされる。よって劣化に対する耐久性の高いコンクリートを作り、また、既に劣化したコンクリートを補修し長寿命化を図るには、劣化を引き起こす化学反応に対する理解を深めることが重要である。アルカリ骨材反応は劣化を引き起こす様々な化学反応の中でとりわけ重要な反応である。これはセメント中のアルカリ分と骨材との化学反応に伴う骨材の膨張に起因するコンクリートの異常膨張を総称するものであり、鉄筋、非鉄筋を問わず、どのような環境においても発生する。コンクリートが異常膨張するとひび割れや、そり、たわみといった変形が発生し、構造物の機能を低下させる。また、極端な場合には構造物の崩壊に至ることさえあると言われている。

アルカリ骨材反応のメカニズムや防止対策に関する研究は古くから行われている。しかしながらセメントや反応性骨材の種類およびその他の条件が多様であるため各研究成果間の比較が困難であること、実験の再現性が良くないことなど、研究の発展を妨げる要因が多く、解決すべき問題点が数多く残されてきた。

このような背景のもと、本論文は、コンクリートの劣化防止に関する技術の進歩に寄与すべく、我が国においてコンクリート骨材として多用されており、またアルカリ骨材反応による被害事例の最も多い安山岩骨材を対象として、骨材のひび割れ発生メカニズムを明らかにすること、および、アルカリ骨材反応により発生した微細なひび割れが、将来必ず進行する炭酸化に与える影響を明らかにすることを目的として行った研究の成果をまとめたものである。以下に本論文の概要を示す。

第1章は序論であって、アルカリ骨材反応の歴史と実態、これまでの研究の内容と到達点、および本研究の意義と目的を要約したものである。

第2章では、実際にアルカリシリカ反応による被害を受けた構造物から採取したコンクリートに見られる劣化症状、および、採取したコアを用いての物性試験の結果を示し、これまでのアルカリシリカ反応メカニズムだけでは実際に生じている劣化現象を説明できないことを指摘した。すなわちアルカリシリカ反応を起こした骨材には、骨材自体のひび割れが多数認められること、およびひび割れは複数の骨材の中心部を貫いて走っていることを見出し、これらの現象は、アルカリによって骨材が外側から軟化・膨張するために周囲のセメントマトリックス

がひび割れるという、既存のアルカリシリカ反応メカニズムでは説明が困難であることを指摘した。またアルカリシリカ反応による物性値の低下率がコンクリートの膨張率に強く依存していることを示し、アルカリシリカ反応を理解するには、膨張をもたらすコンクリートのひび割れの発生原因を究明する必要があることを指摘した。さらに目視で確認できるひび割れ以外に、幅数 μ から数百 μ の反応脈（微細なひび割れ）が多数発生しており、この脈に沿って、コンクリートの炭酸化・中性化の元凶である炭酸カルシウムの生成が進行していることも見出した。

第3章では、アルカリシリカ反応によって実際に被害を受けた構造物より採取したコンクリート中の安山岩骨材について、その形態観察、硬度、元素分布を測定し、その結果に基づき、新たなアルカリシリカ反応モデルを提出した。すなわち、アルカリシリカ反応を起こした骨材の外縁部に見られる暗色の反応リムはカルシウムに富んだ硬い層であり、この反応リムが、アルカリとシリカとの反応の結果骨材の内側で生じる膨張圧の散逸を防ぎ、セメントマトリックスの破壊に十分な膨張圧の蓄積を行っていることを提案した。また、反応リムはアルカリシリカ反応によってセメント中のアルカリ分が消費されたために骨材周辺の細孔溶液中に溶け出したカルシウムが、軟化した骨材表面から内部に侵入することにより、骨材外縁部を脱水・硬化して生じることを提案した。このモデルに基づき、アルカリシリカ反応の発生にはアルカリだけでなくカルシウムも必要であること、また、コンクリートの膨張やひび割れは、これまでのモデルから考えられるような、膨張圧の増加に伴い徐々に進行するものではなく、反応リム層が内圧に耐え切れなくなったときに生じる爆発的なものであると結論した。

第4章は、第3章で提案した新たなアルカリシリカ反応モデルを検証するための実験結果を述べたものである。すなわちアルカリシリカ反応によるコンクリートのひび割れ発生におけるカルシウムイオンの役割を明らかにするため、アルカリを高濃度にしたセメントペースト中の安山岩の状態変化、およびアルカリおよびカルシウム水溶液中での模擬骨材としての硬質ガラス球、シリカゲル、水ガラスの状態変化を調べた。安山岩では、外縁部でのカルシウムシリケート殻の生成に先立って、アルカリシリカ反応が長石と火山ガラスの粒界に沿って骨材内部まで速やかに進行しており、そこから個々の火山ガラスの中心部に向かって反応が進行していくことがわかった。また硬質ガラス球では、試料外縁部に生じたカルシウムシリケート殻を通して進行するアルカリシリカ反応により発生・蓄積された膨張圧によってガラス球が割れることがわかった。これらの結果およびシリカゲル、水ガラスを用いた実験結果より、第3章で提案したアルカリシリカ反応メカニズムが正しいものであることを実証した。すなわちコンクリート中のカルシウムイオンは、アルカリシリカ反応を起こしつつある骨材と反応してその外縁部に硬いカルシウムシリケート層を形成し、アルカリシリカ反応の結果骨材から生じた低粘度アルカリシリケートの周辺モルタル部への浸透を妨げ、膨張圧を骨材内に蓄積させる働きをすることを明らかにした。また生じたカルシウムシリケート層は骨材自身およびその周囲のセメントマトリックスを同時に破壊するのに十分な膨張圧を蓄積できる強度を有していることを明らかにした。

第5章では、アルカリシリカ反応が生じているモルタル供試体を炭酸化促進環境に置いた場合の物性変化を、アルカリシリカ反応が生じていない供試体のそれと比較することにより、アルカリシリカ反応と炭酸化との関係を明らかにすることを試みた。そして、アルカリ骨材反応で生じた反応脈は炭酸ガスの通路となり、炭酸化を促進すること、炭酸化で生じた炭酸カルシウムは反応脈や細孔を埋めるため、アルカリ骨材反応により低下した物性は炭酸化により改善されること、炭酸ガス分圧が高い環境下では、中性化が見かけ上炭酸化よりも先行すること、を明らかにした。

第6章では、本研究で得られた成果を要約した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 吉 田 宏
副 査 教 授 古 市 隆三郎
副 査 教 授 小 平 紘 平
副 査 教 授 鎌 田 英 治
副 査 助 教 授 市 川 恒 樹

学 位 論 文 題 名

コンクリートのアルカリ骨材反応に関する研究

コンクリートのアルカリ骨材反応は、セメント中のアルカリ成分と骨材として用いた鉱物との反応で、コンクリートの異常膨張やひび割れによる早期劣化を引き起こす原因として社会的関心を集めている。アルカリ骨材反応の防止策や劣化コンクリートの補修策を目指した研究は古くから行われてきたが、現象の複雑さと多様さのため、解明すべき問題が数多く残されている。とくに、コンクリート中に起こる化学反応機構の解明をもとにコンクリート劣化のメカニズムを説明するような基礎的研究は今までに見られない。

アルカリ骨材反応はアルカリシリカ反応とアルカリ炭酸塩岩反応に大別されるが、本論文は、我が国で起こっている事例のすべてがそうであるアルカリシリカ反応を取り上げ、コンクリート早期劣化の主因であるひび割れが発生する機構を、コンクリート中で起こる化学反応に基づいて明らかにした成果をまとめたものである。

本論文は第1章の序論と、それに続く5章より構成されている。第2章では、実際に被害を受けた構造物より採取したコンクリート試料の物性測定からアルカリ骨材反応による組織変化と物性変化の関連を述べ、第3章では、試料中の安山岩骨材の精細な観察と分析からアルカリ骨材反応機構とひび割れ発生機構の推測をおこなった。第4章では、セメントペースト中の安山岩および水溶液中のガラス球等の模擬骨材を用いたモデル実験により、推測したひび割れ発生機構の正当性を検証した。第5章ではコンクリートの炭酸化とアルカリシリカ反応との関連を調べた。第6章は総括で本論分の成果をまとめている。

本論文にまとめられている研究の成果を要約すれば以下の3点となる。

1. 実際にアルカリ骨材反応の被害を受けた構造物から採取したコンクリート試料の詳細な形状観察と物理的・化学的測定の結果をもとに、アルカリ骨材反応に従来広く受け入れられているモデル、即ち、アルカリによって骨材が外側から軟化・膨張することにより周辺セメントマトリックスにひび割れが発生するという機構によっては、実際にコンクリート中で起こっている現象を説明できないことを明らかにした。
2. 実際の試料において、安山岩骨材の外縁部にカルシウムに富んだ硬い層が形成され、大部分のひび割れは骨材を横切って発生していることから、シリカのアルカリ反応による軟

化膨張とカルシウムとの反応による脱水硬化とが共存イオンの平衡濃度の変化に基づいて協奏的に起こるという新しい反応モデルを提案した。このモデルによると、外縁部硬化リムにより骨材内部に閉じ込められ蓄積された膨張圧がリムの破壊により開放され、骨材のひび割れは衝撃的に起こることになる。

3. コンクリートのアルカリシリカ反応と炭酸化との関連を調べ、アルカリシリカ反応で生成したひび割れが炭酸化を促進することを明らかにした。炭酸化で生じた炭酸カルシウムは、ひび割れや細孔を埋め、アルカリ骨材反応で低下したコンクリートの物性を改善する。この結果は、アルカリ骨材反応で劣化したコンクリートを再生復元する手法を示唆するものとして極めて興味深い。

これを要するに、本論文は、コンクリートのアルカリ骨材反応の複雑な化学反応機構を明らかにし、さらに、その反応機構に基づいてコンクリートの膨張とひび割れの機構をも明らかにしたもので、材料化学およびコンクリート工学に貢献するところ大である。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。