

学位論文題名

高温加熱を受ける高強度コンクリートの 繊維補強による耐火性能に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、国の内外において長大のトンネルが建設され、トンネル内の火災によって大きな被害が発生している。このトンネル構造材料の損傷の特徴として、強度劣化はもとよりコンクリートの爆裂現象による急激な劣化挙動があり、2次的な被害を発生させて、重要な問題となっている。従来の火災等によるコンクリートの劣化挙動については、主に普通強度のコンクリートを対象とした研究が数多くあり、多くの実績があるが、高強度コンクリートの高温環境下での爆裂などによる劣化挙動は未解決のところが多く、高強度コンクリートの耐火性能に関する詳細な検討が世界的に必要とされている。

本論文では高温加熱を受ける高強度コンクリートの耐火性向上を目的として各種繊維(ポリプロピレン繊維: PPF、鋼繊維: SF、ハイブリット繊維(PPFとSFの混合): HY)で補強した繊維補強高強度コンクリート(FRHSC)の高温加熱によるセメント硬化体の結晶などの化学的変化、微細構造の劣化、伝熱特性および緻密性などの物理的性質を明らかにしている。さらに、残存強度特性などの力学的性質および加熱作用を受けたFRHSCの破壊力学による靱性、劣化挙動および爆裂に関する耐火性能を明らかにしている。さらに、FRHSCの耐火性能に影響を及ぼす要因を分散分析を使用し明確にしている。

第1章は序論であり、本研究の背景および研究の対象を概説するとともに、関連する既往の研究を調査して問題点を指摘し、本研究の位置づけと目的を示している。

第2章では、高温加熱を受けたFRHSCの結晶変化および微細構造を把握するため、X線回折と走査型電子顕微鏡(SEM)による観察を中心に高強度コンクリート(HSC)とポリプロピレン繊維補強高強度コンクリート(PPRC)を比較検討している。その結果、次のことを明らかにしている。

加熱温度 200℃まではHSCではコンクリートの強度を司る結晶系C-S-H(カルシウムシリケート水和物)が多少増加し、次章で述べる残存圧縮強度比が増加すること、一方PPRCでは結晶系C-S-Hが減少する傾向を示し、残存圧縮強度比の低下を誘導していること、さらに、SEMの観察によりPPRC中のPPFの一部は存在しているが、多数が溶融し空隙を形成し、緻密性が低下して残存圧縮強度比の低下を引き起こしている。

400℃で加熱したHSCでは結晶系C-S-Hの種類にもよるが一部に結晶系C-S-Hの増加が認められるが一部の結晶系C-S-Hの低下が多数あり、残存圧縮強度比が低下する傾向を示していること、一方PPRCでは結晶系C-S-Hの出現が200℃より少なく、さらにPPFは完全に消失しチューブ状の空隙を形成することにより残存圧縮強度比が全体として低下する。

400℃～600℃に加熱した供試体では水和物のポルトランドイト($\text{Ca}(\text{OH})_2$)が脱水分解しCaOと H_2O に変化するためポルトランドイトの結晶が減少し、CaOの増加が認められること、この脱水分解では H_2O が生成し、水蒸気圧が発生していると考えられ、爆裂現象が450℃～550℃で発生していることからポルトランドイトの脱水分解が爆裂に影響を及ぼすことが推察されることなどを明らかにしている。

第3章では、高温加熱を受けたHSCの残存特性について分散分析より有意検定を行っている。セメントペースト、モルタルの圧縮強度と曲げ強度実験を行い、各要因(繊維混和材混入量(V_f)、水セメント比(W/C)、含水率(V_w)、繊維混和材の種類(T_f)、粗骨材の種類(T_a))が加熱後の強度低下に対する影響を合理的に判断するために、残存強度比を用いて分散分析を行い残存強度比との相関性について考察している。その結果、次のことを明らかにしている。

セメントペーストの残存強度保持では T_f が有意を示しSFが残存強度保持に有効であること、モルタルの場合 W/C と T_f が有意を示し、 W/C が小さいほど、またSFの混入が有効

であること、コンクリートの場合では W/C が有意を示し、 $W/C=0.25 \sim 0.45$ の範囲で $W/C=0.35$ が残存保持能力が最小であることなどを明らかにしている。

また、室温から 200°C ごと 600°C までの加熱過程において、残存圧縮強度比では PPRC および HSC は加熱に伴い低下し低下挙動は HSC に比べ PPRC の方が大きいこと、鋼繊維補強高強度コンクリート (SFRC) の低下挙動は HSC より小さいこと、残存弾性係数比では各 FRHSC は加熱温度 600°C で約 0.3 を値を示し、 600°C までの過程では PPRC が HSC と比べて大きな低下を示し、SFRC は HSC より残存強度の保持能力が大きいこと、SF 混入が残存特性向上に有効であることを明らかにしている。

第 4 章では、高温加熱を受ける FRHSC の劣化挙動について破壊力学の観点から検討している。HSC に各種繊維 (PP、SF、HY) を混入した 3 種の FRHSC の耐火性状を、非線形破壊力学に基づく 3 種の破壊靱性の評価指標によって求めている。破壊靱性 G_f の評価はコンクリート全体の破壊エネルギーを示し、ひび割れモデルを有する供試体の荷重-開口変位曲線の面積から求めている。 G_{ic} はひび割れ先端部周辺の破壊エネルギーを求めるため有効ひび割れモデルを用い、破壊靱性を求めている。さらに脆さの指標を示す脆性パラメータ l_{ch} を用いている。比較検討において繊維の総混入量 (体積) は同じ状態である。

G_f において加熱前では SFRC は PPRC の値より大きく、繊維混入量の増加に伴い増加すること、加熱後では、SFRC は加熱前後で変化はないが、PPRC は加熱前と比較して低下すること、加熱前におけるハイブリッド繊維補強高強度コンクリート (HYRC) の G_f 値は SFRC と同様の傾向を示し、加熱後の HYRC の G_f 値は SFRC の値よりは小さく、PPF より大きい値を示すことを明らかにしている。

G_{ic} は G_f と同様の傾向が認められ、加熱前後で SFRC の靱性低下は少なく PPRC の低下が最も大きいこと、HYRC は両者のほぼ中間の値をとることを明らかにしている。

l_{ch} において加熱前では SFRC は PPRC の値より大きく、加熱後では SFRC は PPRC の値より約 2 倍以上大きいこと、繊維混入量に影響されないこと、PPRC の値は繊維混入量の増加に伴い低下し脆性化が進むこと、加熱前の HYRC は PPRC および SFRC の値より大きく、繊維混入量の増加とともに大きくなり PPF や SF より脆性の改善が見られること、加熱後の SFRC は PPRC の値より大きいこと、HYRC は鋼繊維より若干靱性は劣るが挙動は同じで、PPRC より破壊靱性が改善されていることを明らかにしている。

加熱による G_f 、 G_{ic} の低下の度合いは、PPRC では残存圧縮強度比や残存弾性係数より小さい値を示し、SFRC では残存圧縮強度比や残存弾性係数比より大きくなること、また、HYRC では残存圧縮強度比よりは小さく、残存弾性係数比より大きくなり、繊維によって破壊靱性に対する敏感性が異なること、破壊靱性は HYRC が SFRC と PPRC の中間的性質をもつことなどを明らかにしている。

第 5 章では、HSC および FRHSC に高温加熱し、内部温度と熱ひずみを実験により測定し、加熱状態での熱拡散率を差分法により求めた。これを確認するために熱拡散率の実験値を用いて FEM 解析によって加熱下の内部温度、熱ひずみを求めて実験結果と比較した結果、求めた熱拡散率の数値が妥当であることを明らかにしている。

設定した要因 (V_f 、 W/C 、 V_w 、 T_f) のうちモルタルの熱拡散率に影響を及ぼす要因を分散分析から解析した結果、モルタルの熱拡散率は W/C 、 V_w 、 V_f が有意を示し $W/C=0.25 \sim 0.45$ の範囲において W/C が 0.35 の場合最小となり、熱が伝わりにくく残存強度に影響していることが考えられる。構造物が湿っている場合、繊維量が多い場合は熱拡散率が最大となり熱が伝わりやすいことを明らかにしている。

PPRC の熱拡散率は HSC と比較して高い値をとり熱が伝わりやすいのは繊維混入の影響であること、高温加熱による熱ひずみに関しては低い含水率ほど高いひずみを示すこと、さらに、PPF の混入により熱ひずみを低減する効果があることなどについて実験、解析において確認している。

第 6 章では、高温加熱を受ける HSC、PPRC の緻密性の評価について透水試験を行い、加熱前後による透水係数の変化について試験を行っている。

PPRC および HSC とともに加熱温度の上昇とともに透水係数が増加すること、PPRC の透水係数は 200°C で HSC の値の約 40 倍、 400°C で約 4 倍、 600°C で約 10 倍大きくなること、さらに、深さ方向の内部温度分布と透水係数分布から HSC は 400°C から 600°C にかけてコンクリート内部の透水性が小さくなる傾向を示し、気体、水分の移動が難しいこと、高温加熱を受けるコンクリート内では水蒸気圧や水圧の発生により水分の移動が起こることが推測され、この水蒸気あるいは水分移動が PPRC のようにスムーズな場合、水蒸気圧あるいは水圧の緩和が考えられ、爆裂の可能性が低減されることを明らかにしている。

第 7 章では、セメントペースト、モルタル、コンクリートの爆裂特性について検討している。表層爆裂および爆裂に影響を及ぼす要因 (V_f 、 W/C 、 V_w 、 T_f 、 T_a) について統計的手法である分散分析を用いて明らかにしている。

火災等の加熱の影響はコンクリート表層部であるセメントペースト部、モルタル部から受ける。この場合に発生する表層部の爆裂はセメントペーストならびにモルタルの分散分析から V_w と T_f の要因が有意を示し、表面の含水率が小さく、PPF、SF を用いると表層部

爆裂が低減することを明らかにしている。

HSC の爆裂は V_w と V_f および T_f が有意を示し、コンクリート内の含水率が小さく、繊維混入量 $0.25 \sim 0.5 \text{ vol.}\%$ の実験範囲において PP または HY を用いると爆裂発生率が低減することを明らかにしている。

爆裂メカニズムについては第 2 章で化学的考察、第 4 章で破壊靱性による考察、第 6 章で透水性による考察を行っている。

第 8 章では本研究で得られた成果を総括した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 佐 伯 昇

副 査 教 授 大 沼 博 志

副 査 教 授 友 澤 史 紀

副 査 助 教 授 堀 口 敬

学 位 論 文 題 名

高温加熱を受ける高強度コンクリートの 繊維補強による耐火性能に関する研究

近年、国の内外において長大トンネルが建設され交通の大動脈を形成しているが、トンネル内の火災によって大きな被害が発生している。構造材料として高強度コンクリートが用いられ、損傷の特徴として強度劣化はもとよりコンクリートの爆裂による急激な劣化挙動が起こり、重要な問題となっている。従来の火災等によるコンクリートの劣化挙動については、主に普通強度のコンクリートを対象とした研究は多く行われているが、高強度コンクリートの高温環境下での劣化挙動には未解明の問題も残されている。本論文では高強度コンクリートの耐火性向上を目的として各種繊維（ポリプロピレン繊維：PPF、鋼繊維：SF、ハイブリット繊維（PPFとSFの混合）：HY）で補強することを考え、これら繊維補強高強度コンクリート（FHC）について高温加熱によるセメント硬化体の化学的変化、微細構造の劣化、伝熱特性および緻密性などの物理的性質、残存強度特性、靱性などの力学的性質および爆裂性状を明らかにして、それらの劣化挙動および爆裂に関する耐火性能を評価している。次の点が成果として挙げられる。

（１）高温加熱を受けたFHCにおけるセメント硬化体の結晶変化および微細構造を把握するため、X線回折と走査型電子顕微鏡（SEM）による観察を行い、高強度コンクリート（HSC）とポリプロピレン繊維補強高強度コンクリート（PPRC）を比較検討している。その結果、加熱温度200℃まではHSCではコンクリートの強度を支配する結晶系C-S-H（カルシウム－シリケート水和物）が増加し、残存圧縮強度比が増加すること、一方PPRCでは結晶系C-S-Hが不完全化する傾向を示し、残存圧縮強度比の低下を誘導していること、400℃まで加熱した場合、コンクリート中のPPFは完全に消失しチューブ状の空隙を形成していること、PPRCはHSCに比して残存圧縮強度比の低下が大きいこと、400℃～600℃に加熱した供試体では水和物の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が脱水分解し CaO と H_2O に変化することによる水蒸気圧が発生していること、爆裂現象が450～550℃で発生していることからこの脱水分解が爆裂に影響を及ぼしている可能性が高いことなどを明らかにしている。

（２）高温加熱を受けたHSCの残存強度特性などの要因について、分散分析より有意検定を行い、

各要因（繊維などの混入量：V_f、水セメント比：W/C、含水率：V_w、繊維などの種類：T_f、粗骨材の種類（T_a））と残存強度比との相関性について考察している。SF混入が残存強度・弾性係数特性などの向上に有効であることを明らかにしている。

(3) 高温加熱を受けたFHCの靱性に対する劣化挙動について3種の破壊靱性の評価指標、すなわち荷重－開口変位曲線による靱性評価エネルギー（G_F）、有効ひび割れによる限界ひずみエネルギー解放率（G_{IC}）およびひび割れ発生伝播の仮想長さを示す脆性指数（I_{ch}）によって破壊靱性に対する耐火性を評価した結果、G_F、G_{IC}、I_{ch}とも靱性に対してほぼ同じ評価の傾向を示したこと、SFRCは加熱前後の靱性低下が少ないこと、PPRCは加熱前後で靱性低下がかなり大きいこと、HYRCはSFの効果によって加熱前後の靱性低下を抑制できることなどを明らかにしている。

(4) HSCおよびFHCに高温加熱し、内部温度と熱ひずみを実験により測定し、加熱状態での熱拡散率を差分法により求めている。これを確認するために熱拡散率の実験値を用いてFEM解析によって加熱下の内部温度、熱ひずみを求めて実験結果と比較した結果、求めた加熱下の熱拡散率の数値が妥当であることを確認している。また実験結果から、PPRCの熱拡散率はHSCと比較して高い値を示し、PPFの熔融消失により高温蒸気の伝導が容易になり、PPRCは熱が伝わりやすいこと、高温加熱による熱ひずみに関しては低い含水率ほど高い熱ひずみを示すこと、さらに、PPFの混入により熱拡散率が高くなり、熱ひずみを低減する効果が生じ、PPFが爆裂抑制効果に有効に働いていることを明らかにしている。

(5) 高温加熱を受けた後のHSC、PPRCの緻密性の評価について透水試験を行い、加熱前後による透水係数の変化について試験を行った。その結果、PPRCおよびHSCとも加熱温度の上昇とともに透水係数が増加すること、PPRCの透水係数はPPFの熔融消失によりかなり大きくなること、さらに、深さ方向の内部温度分布と透水係数分布からHSCは400℃から600℃にかけて内部の深いコンクリートほど透水性が小さくなる傾向を示し、気体、水分の移動が難しいこと、水分移動がPPRCのようにスムーズな場合、水蒸気圧あるいは水圧の緩和が考えられ、爆裂の可能性が低減されることを明らかにしている。

(6) 高温加熱時における表層部の薄い部分の飛散爆裂はセメントペーストならびにモルタルに係し、それらの実験および分散分析結果から、表層部の含水率を小さく保つこと、PPF、SFをコンクリートに混入することにより飛散爆裂を低減することができること、HSCの爆裂発生挙動はPPFを混入することにより爆裂発生率が低減し有効であることを明らかにしている。さらに、(2)、(3)に述べた残存強度、靱性などに対するSFおよびHYの有効性およびHSC爆裂抑制に有効なPPFとの性能を合せ持つHYRCが耐火性能の向上に対して有効であることを明らかにしている。

これを要するに、著者は、トンネル火災などで高温加熱を受ける高強度コンクリートの強度劣化および爆裂損傷を抑制するために、繊維の使用方法、特に鋼繊維とポリプロピレン繊維を混合したハイブリット型補強によるコンクリートが有効であることなどの新知見をえたものであり、コンクリート工学の発展に寄与するところ大なるものがある。

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。