

平成21年6月14日現在

研究種目：基盤研究(B)
 研究期間：2006 ～ 2008
 課題番号：18360205
 研究課題名（和文） 閉鎖空間を有する社会基盤施設におけるコンクリート構造物の火災に対する安全性の検討
 研究課題名（英文） Fire safety evaluation of concrete structures in a closed space environment
 研究代表者
 堀口 敬 (HORIGUCHI TAKASHI)
 北海道大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号： 30094816

研究成果の概要： 閉鎖空間を有する社会基盤施設におけるコンクリート構造物の代表的なものとして、地中・海中トンネル構造物や地下鉄などの地下空間に建設されたコンクリート構造物が挙げられる。これらの構造物は公共的な要素が強く、万が一大きな火災が発生すると重大な人的被害の危機が危惧される重要な社会基盤施設である。本研究では、これらの重要コンクリート構造物の火災時における安全性に関してコンクリート部材の耐火性を中心に検討したものである。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	7,100,000	2,130,000	9,230,000
2007年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2008年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
年度			
年度			
総計	15,300,000	4,590,000	19,890,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：コンクリート

1. 研究開始当初の背景

近年海外においては、トンネル火災や地下鉄火災が頻発しており、新しい英仏トンネルプロジェクトやスイスアルプスの長大トンネル計画などの重要なトンネルの建設計画が目白押しである。そのため、海外においてはトンネル火災に関する安全性の検証など精力的な研究や国際的なプロジェクトが始動している。国内においても、例えば2次覆工が省略されるトンネル構造物に対する耐火性の危惧から、合理的な耐火設計の必要性が叫ばれている。とくに海底トンネルのような構造の場合、火災が発生してコンクリート

構造物に大きなダメージを受けた場合、その復旧には高度な技術と莫大な費用がかかることが過去の火災事故事例から報告されている（例えば国際的なプロジェクトについては、European Action on Fire Safety, WT Review, 2004, World Tunneling, Effects of fire on tunnel lining stability, Fire Safety, Tunnels & Tunneling International, pp.39-41, 1998、グレートベルトトンネルにおける火災事故については、N. P. Hoj and C. Tait, Great belt tunnel repairs and refurbishment following a fire, COWI Report, pp45-56, 2000,）。

国内においては幸いにして人命に関わる

大きな被害をもたらしたトンネル火災が1979年（昭和54年）の日本坂トンネル火災事故以降発生していないこと、地下鉄火災についても韓国・釜山で発生したような大きな火災事故が発生していないこと、などにより社会の安全システムを構築する際の災害に対する優先度としては、地震や洪水などの自然災害に対する優先度より低い傾向は否めない事実である。このためインフラストラクチャーの耐火性に関する研究、すなわち土木分野におけるコンクリート構造物の耐火性に関する研究は建築分野等の耐火性の研究に比べて非常に少ないのが現状である。しかしながら、近年のコンクリート構造物の技術的発展に伴い、より高強度のコンクリートが用いられ、このことが逆に爆裂の危険性の増加や耐火性の低下をもたらすことが指摘されている。さらに深刻なことは、2次覆工が省略されるトンネル構造物が増え、こうしたトンネルにおける火災事故発生時の人的被害の拡大に対する危険性は逆に高くなっている。以上のように、公共性の高いインフラストラクチャーに関する耐火設計は万が一の火災事故に対する安全性を確保する上で非常に重要なものであるが、国内では十分な耐火設計規定が確立されていない状況にあり、早急に安全性確保のための取り組みを実施すべきであると考えられる。

本研究者は、この分野に関する研究を精力的に実施しており、国内外に多くの成果を発表している（例えば、近年では国際火災科学学会（IAFSS）での発表を始め、アメリカ合衆国コンクリート工学協会（ACI）等の世界的権威のある学会での報告があり、国内においても土木学会等で積極的に報告している（詳しい論文名、タイトルについては研究業績に記載してある）。

以上のように、本研究者はコンクリート構造物の耐火性に関する研究を主としてトンネル構造物を中心に実施している。これらの研究は、現在世界中でもっとも関心のあるテーマの一つであり、多くの未解明の分野が残されているため、精力的な研究が各国で行われている。また、本研究計画における十分な事前調査・基礎研究が既に終了しており、実際的な研究を開始する準備が既に整っている段階である。

2. 研究の目的

トンネルや地下鉄などの公共的閉鎖空間においては、火災に対する安全性を確保することは、社会の安全システムを構築する上で、最優先の課題である。特に近年国際的に頻発するトンネル火災や地下鉄火災により、多くの尊い人命が犠牲となるばかりではなく驚くばかりの社会的資産の損失が報告されている。こうした公共的閉鎖空間で発生する火

災事故は確率的には低いが、一旦発生すると取り返しのつかない大事故につながる可能性があり、莫大な社会資産の喪失が懸念されるため非常に重要な問題である。

本研究では、トンネルや地下鉄などの公共的閉鎖空間において火災が発生した場合のコンクリート構造物の耐火性を詳しく検討し、簡略的に表現すれば『どの程度の火災が起きた場合にコンクリート構造物がどの程度耐えられるか』を検討することが本計画の目的である。すなわち、合理的な耐火設計法を確立するための重要な資料を収集し、設定する火源の検討、構造物の安全性確保に関する最低許容時間、避難設備との関連性、など耐火設計に必要な項目を明らかにすることである。さらに、『火災を受けた構造体の診断と健全度評価』を行う手法を確立すること、『連続繊維補強コンクリートの耐火性』など新しい構造システムの火災に対する安全性についても検討することが具体的な目的である。申請する期限内で、これらの重要課題について火源温度の設定と構造体コンクリートの耐火性について明らかにし、合理的な耐火設計の確立に欠かせない諸資料を得ることである。

3. 研究の方法

本研究の試験計画は、大きく分類して以下の7項目から構成される。

- ① 高温下のコンクリート構造物の特性
- ② 火災後のコンクリート構造物の特性
- ③ 繊維補強高強度コンクリートの耐火性
- ④ 高性能耐火コンクリートの開発
- ⑤ 火源の特性
- ⑥ 火災時の熱流体解析
- ⑦ 総括（総合的な考察とまとめ）

まず、①～④はコンクリート構造・材料面からの検討項目であり、⑤、⑥に関しては火災環境の調査と検討に関するものである。さらに総合的な考察とまとめを行い、本研究の総括として⑦がある。以上の7項目について以下に順次詳述する3年間の研究計画・方法を実施する。主な担当者については、①～④は研究代表者（堀口敬）と共同研究者（志村和紀）が担当し、⑤、⑥に関しては共同研究者（栗岡均）が主として担当する。⑦については海外共同研究者を含めた全員で実施する。海外共同研究者については、全体の項目について参加するが、適宜ヨーロッパにおける各種の規格・指針等の情報等について提供を行い、研究計画に新たに加える必要があるか否かをe-mail等を利用して議論を行う。なお、海外共同研究者とは年1回程度の研究代表者との会合を計画している。

まず初年度の平成18年度において、①では、高温下におけるコンクリート材料の力学物性について、曲げ強度と破壊靱性を中心に

実施する。さらに、爆裂特性について詳しく検討し、爆裂に有効であることが報告されている各種有機繊維を混入した繊維補強コンクリートについて、高強度特性との関連性を交えて検討を行う。さらに、爆裂防止機能を有した有機繊維と靱性確保を目的とした鋼繊維の2種類の異なる繊維を効果的に混合したハイブリッド繊維補強コンクリートの耐火性状についても併せて検討を行う。②では、火害後の残存特性について、圧縮強度、曲げ強度、および破壊靱性に関して検討を行い、設定温度領域における強度の低下傾向について明らかにする。設定温度に関しては、200、400、600℃とする。さらに、コンクリートの内部特性を把握する手法として透水係数を測定し、火害後の水密性の変化を明らかにする。対象とするコンクリートは、普通コンクリート、高強度コンクリート、有機繊維補強コンクリート、ならびにハイブリッド繊維補強コンクリートである。

③では、高温下での強度低下の少ない高性能耐火コンクリートの開発を行う。基本的には、セメントクリンカーの組成を変化させ、耐火性を向上させる方法、骨材の組み合わせを考慮した方法、積極的にポゾラン反応を促進した材料を用いた方法、などにより600℃程度までは強度低下が少ない高性能耐火コンクリートを開発する。④では、近年建造物の補修・補強に積極的に適用されている連続繊維補強コンクリートの耐火性について検討を行う。連続繊維としては炭素繊維やアラミド繊維などが使われ、その材料自体は耐火性に優れている材料であるが、連続繊維シートおよび接着剤は耐火性の低い有機物材料で構成されており、耐火性には不利な材料である。本計画では、連続繊維シートで補強された一軸引張試験を行い、どの程度の耐火性があるかを詳しく検討する。

⑤については、トンネルや地下鉄などの公共的閉鎖空間で発生する火源となる温度時間曲線の検討である。トンネル建造物の耐火性を考える上で重要なことは、想定する温度時間曲線の設定である。従来はISOによる曲線が多く使われたが、国際的な動向としてはRAPT曲線やHydro-Carbon曲線RWS曲線等が主流となり、より苛酷な温度環境下での耐火性の検討が求められている。すでにフランスではヨーロッパアルプスにおけるトンネル火災での経験から、こうした苛酷な温度環境での研究実績が蓄積されており、共同研究を実施する必要性が高い。

⑥に関しては、トンネルや地下鉄などの閉鎖空間における火災形状の研究や火災時の熱流体解析による閉鎖空間の特性とコンクリート建造物との関連性について詳しく検討を行う。閉鎖空間の断面形状や長さによる3次元温度分布、煙の流れ解析などから避難

経路や避難に要する時間などを考慮したコンクリート建造物の耐火限度や最低限の構造体としての保持時間などを検討する。

以上が昭和18年度における研究計画であるが、基本的にはこれらのすべての項目について初年度から3年間で継続的に実施する。ただし、随時必要な追加実験を前年度までの研究成果を参考にして検討する。但し、⑦については、総合的な考察と研究のまとめであり、十分な成果が得られた後の最終年度に全員で詳細に討議を行い、研究の総括を行う。

4. 研究成果

閉鎖空間を有する社会基盤施設におけるコンクリート建造物の代表的なものとして、地中・海中トンネル建造物や地下鉄に代表される地下空間に建設されたコンクリート建造物が挙げられる。これらの建造物は公共的な要素が強く、大規模火災が発生すると重大な人的被害が発生する可能性が高い重要な社会基盤施設である。本研究では、これらの重要コンクリート建造物の火災時における安全性に関してコンクリート部材の耐火性を中心に検討したものである。また、地下空間で火災が発生した場合、地上部の火災とは異なり、外気との熱交換や換気経路が極めて制限される特殊な空間である。本研究では、**トンネル内の温度解析を実施し**、天井板を有するシールドトンネルの耐火構造を設計することを目的とし、管路網解析等を用いてトンネル火災による排気ダクト内の温度性状を定量的に把握した上でトンネル構造に対する照査についても検討を行った。

初年度である平成18年度においては、高温下におけるコンクリート材料の力学物性について、曲げ強度と破壊靱性を中心に検討を行った。平成19年度では、爆裂特性について詳しく検討し、爆裂に有効であることが報告されている各種有機繊維を混入した繊維補強コンクリートについて、高強度特性との関連性を交えて検討を行った。平成20年度では、爆裂防止機能を有した有機繊維と靱性確保を目的とした鋼繊維の2種類の異なる繊維を効果的に混合したハイブリッド繊維補強コンクリートの耐火性状についても併せて検討を行った。以下に、これらの研究成果の概要を述べる。

火害後の残存特性について、圧縮強度、曲げ強度、および破壊靱性に関して検討を行い、設定温度領域における強度の低下傾向について詳しく検討を行った。設定温度に関しては、200、400、600℃とした。さらに、コンクリートの内部特性を把握する手法として透水係数を測定し、火害後の水密性の変化からコンクリート内部の微視的構造の変化を

比較し、詳しく検討した。対象としたコンクリートは、普通コンクリート、高強度コンクリート、有機繊維補強コンクリート、ならびに鋼繊維と有機繊維を混合したハイブリッド繊維補強コンクリートである。ここでは有機繊維として、ポリプロピレン繊維とポリビニルアルコール（ビニロン）繊維を用いた。

高温下での強度低下の少ない高性能耐火コンクリートの開発を実施した。基本的には、セメントクリンカーの組成を変化させ、耐火性を向上させる方法、骨材の組み合わせを考慮した方法、積極的にポゾラン反応を促進した材料を用いた方法、などにより 600°C程度までは強度低下が少ない高性能耐火コンクリートの開発を行った。3年間の研究成果から、大きな可能性が認められたが、この分野の研究には継続的な研究が特に必要であるものと思われる。

次に、閉鎖空間におけるコンクリート構造物の高温下における爆裂現象について詳しく検討を行った。対象としたコンクリート材料は需要が急増している高強度コンクリートであり、繊維補強高強度コンクリートである。検討した項目は、爆裂のメカニズムの検討、有機繊維による爆裂低減効果、温度環境（加熱速度）が爆裂に及ぼす影響である。爆裂のメカニズムを明らかにするために、高い精度の内部圧力測定システムを確立し、高温下におけるコンクリート内部の圧力分布を詳しく計測した。試験結果から、内部圧力分布は供試体表面からの深さによって変化すること、高温下のコンクリート内部では最大で4MPa以上の圧力が発生することを明らかにした。この内部圧力は、一時的にはコンクリート内部における飽和水蒸気圧を超える大きな圧力となることがわかり、爆裂の危険性がさらに高まることが判明した。

こうした爆裂現象を防止する最も効果的な手法の一つとしてポリプロピレン繊維などの有機繊維の混入が従来から報告されており、本研究においても同様に有機繊維の有効性が確認された。しかしながら本研究では従来の考え方に反する以下の二点に代表される新しい研究成果が得られた。まず第一点は、有機繊維による爆裂防止のメカニズムが、従来から言われているような『有機繊維の熔融による空隙の増加に起因する爆裂の低減効果』ではなく、繊維界面とマトリックス間の緩やかな空隙構造（繊維の付着特性）に起因する可能性が高いことを示した。すなわち、ポリプロピレン繊維の混入による爆裂防止効果は、繊維が熔融してその部分が空隙となり内部圧力を低減するのではなく、繊維界面とマトリックスとの付着力の低さに起因する圧力低減効果として考える方が妥当であ

ると思われる。このため、付着力の比較的高いポリビニルアルコール繊維の場合では、爆裂防止低減効果が低いのもこのためである。鋼繊維なども同様である。この結果は、一部報告されているように、熔融したポリプロピレン繊維は膨張し、かなり粘度の高い性状を有するため、従来から考えられていたような熔融して新たな空隙を造ることはとても期待できないこととも合致しており、注目すべき成果であると考えられる。

第二点目は、加熱速度と内部圧力との関係である。この分野の研究は非常に少なく、研究成果も多くはないが、従来からの研究成果では、緩やかな加熱速度において大きな内部圧力が発生することが報告されていたが、本研究では、この傾向に反する結果が確認された。すなわち、加熱表面を除くある程度深い部分（本研究では表面から 500mm 程度）の内部圧力は加熱速度の増加とともに増加することを明らかにした。以上の成果については、今後ともさらに詳しく検討を行い、検討する必要があるものとする。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 14 件）

1. T. Horiguchi and S. L. Suhaendi : Recovery behavior of hybrid fiber reinforced high strength concrete after fire exposure, Proceedings of the International Workshop on application of structural Fire engineering, pp.189-197, (2009)、査読有
2. K. Watanabe and T. Horiguchi: Effect of elevated temperatures on flexural behaviour of hybrid fibre reinforced high strength concrete, Proceedings of the 5th International Conference Structure in Fire, pp.430-439, (2008)、査読有
3. T. Horiguchi, K. Watanabe and S. L. Suhaendi : Study on fracture toughness of hybrid fiber reinforced high strength concrete at high temperature environment, Proceedings of 11th International Conference on Durability of Building Materials and Components, 11dbmc, pp.117-124, (2008)、査読有
4. K. Watanabe, S. L. Suhaendi and T. Horiguchi: Bending strength and fracture toughness of hybrid fibre reinforced high strength concrete at high temperature, Proceedings of the International fib Workshop on Fire design of concrete structure, pp.343-350, (2008)、査読有
5. S. L. Suhaendi and T. Horiguchi : Explosive spalling mitigation mechanism of fiber reinforced high strength concrete under high temperature

condition, Proceedings of the International fib Workshop on Fire design of concrete structure, pp.189-197, (2008)、査読有

6. 波津久毅久, 並川賢次, 栗岡均, 森口敏美; 「火災時のシールドトンネル天井排気ダクト内温度解析」, 地下空間シンポジウム論文・報告集 (日本土木学会, pp.193-202, (2008)、査読有

7. 栗岡均; 「CFDの利用を取り巻く課題(防火安全設計への適用)」, 日本火災学会誌「火災」27号, pp.27-32, (2008.4)、査読有

8. H.Kurioka, Y.Oka, “Experimental Study on the Fire Safety in Tunnel Spaces”, The 3rd Korea-Japan Joint Meeting for Fire Science and Engineering 2008 Seoul Korea (fire safety research of the underground space and tunnel’), pp.25-36, (2008)、査読有

9. S. L. Suhaendi, 渡辺一郎, 志村和紀, 堀口敬: Fracture energy of hybrid fiber reinforced high strength concrete under high temperature condition, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.387-392, (2007)、査読有

10. 渡辺一郎, S. L. Suhaendi, 堀口敬, 志村和紀: 高温環境下におけるハイブリッド繊維補強高強度コンクリートの破壊靱性に関する研究、コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.339-344, (2007)、査読有

11. S. L. Suhaendi, K. Watanabe and T. Horiguchi: Effect of hybrid fibres on fracture energy of high strength concrete under high temperature exposition, CONSEC 07, Vol.2, pp.1633-1640, (2007)、査読有

12. S. L. Suhaendi and T. Horiguchi: Effect of short fibres on residual permeability and mechanical properties of hybrid fibre reinforced high strength concrete after heat exposition, Cement and Concrete Research, Vol.36, Issue 9, pp.1672-1678, (2006), 査読有

13. S. L. Suhaendi, M. Sudo and T. Horiguchi: Optimization of polypropylene fibers for high strength concrete under high temperature condition, Proceedings of the 10th East Asia Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Vol.6, pp.467-472, (2006)、査読有

14. S.L.Suhaendi, 志村和紀, 堀口敬: Non-destructive test of heated fiber reinforced high strength concrete, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.407-412, (2006)、査読有

[学会発表] (計 9 件)

1. T. Horiguchi and S. L. Suhaendi: Recovery behavior of hybrid fiber reinforced high strength concrete after fire exposure, International Workshop on application of structural Fire engineering, 平成 21 年 2 月 20 日、Prague technical university, Prague, Czech Republic (2009)

2. K. Watanabe and T. Horiguchi: Effect of elevated temperatures on flexural behaviour of hybrid fibre reinforced high strength concrete, 5th International Conference Structure in Fire, 平成 20 年 5 月 28 日、Tung University, Singapore (2008)

3. T. Horiguchi, K. Watanabe and S. L. Suhaendi: Study on fracture toughness of hybrid fiber reinforced high strength concrete at high temperature environment, 11th International Conference on Durability of Building Materials and Components, 11dbmc, 平成 20 年 5 月 12 日、Dedeman Istanbul, Istanbul, Turkey (2008)

4. K.Watanabe, S.L.Suhaendi and T.Horiguchi: Bending strength and fracture toughness of hybrid fibre reinforced high strength concrete at high temperature, International fib Workshop on Fire design of concrete structure, 平成 19 年 7 月 12 日、Coimbra University, Coimbra Portugal . (2007)

5. S. L. Suhaendi and T. Horiguchi: Explosive spalling mitigation mechanism of fiber reinforced high strength concrete under high temperature condition, International fib Workshop on Fire design of concrete structure, 平成 19 年 7 月 12 日、Coimbra University, Coimbra , Portugal . (2007)

6. S. L. Suhaendi, 渡辺一郎, 志村和紀, 堀口敬: Fracture energy of hybrid fiber reinforced high strength concrete under high temperature condition, コンクリート工学年次講演会, 平成 19 年 7 月 13 日、江陽グランドホテル (仙台)、(2007)

7. 渡辺一郎, S. L. Suhaendi, 堀口敬, 志村和紀: 高温環境下におけるハイブリッド繊維補強高強度コンクリートの破壊靱性に関する研究、コンクリート工学年次講演会、平成 19 年 7 月 12 日、江陽グランドホテル (仙台) (2007)

8. S. L. Suhaendi, M. Sudo and T. Horiguchi: Optimization of polypropylene fibers for high strength concrete under high temperature condition, 10th East Asia Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, 平成 18 年 8 月 3 日、Sheraton Hotel Bangkok, Thai (2006)

9. S. L. Suhaendi, 志村和紀, 堀口敬: Non-destructive test of heated fiber reinforced high strength concrete, コンクリート工学年次講演会、平成 18 年 7 月 13 日、朱鷺メッセ (新潟) (2006)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀口 敬 (HORIGUCHI TAKASHI)

北海道大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 30094816

(2) 研究分担者

栗岡 均 (KURIOKA HITOSHI)
鹿島建設株式会社・研究・技術開発本部技
術研究所・上席研究員
研究者番号：80374023

志村 和紀 (SWHIMURA KAZUNORI)
北海道大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：60187474

(3) 連携研究者
なし