

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656335

研究課題名(和文) 繊維補強セメント系複合材料を利用したハニカムパネルの開発に関する研究

研究課題名(英文) Development on Honeycomb Panel using Fiber Reinforced Cementitious Composite

研究代表者

西脇 智哉 (Nishiwaki, Tomoya)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60400529

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：近年の環境問題への対応として、排出CO<sub>2</sub>量の削減とセメントおよびコンクリートそのものの使用量の削減を目的として、繊維補強セメント系複合材料(Fiber Reinforced Cementitious Composite; FRCC)によってハニカムパネルを作製することを検討した。高い流動性や靱性能など、この目的に適した材料特性を得られるように材料設計を行うとともに、施工方法についても検討を行った。試作したハニカムパネルについて、幾つかの基礎的な実験により力学特性を確認したところ、見かけの最大圧縮強度を20MPa以上に確保しながら、10%を超える大きなひずみなど極めて靱性的な挙動が確認できた。

研究成果の概要(英文)：A honeycomb panel using fiber reinforced cementitious composite (FRCC) was proposed and developed. Such honeycomb structures have a potential to reduce the CO<sub>2</sub> emission and consumption volume of cement and concrete materials. FRCC mixture design of suitable performance (e.g. good workability and ductility) and processing methods was studied. Some types of trial honeycomb panels were fabricated and subjected to loading test. As the results, it was confirmed very ductile behavior more than 10% compressive strain and the maximum value of apparent compressive strength which was over 20MPa.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：建築構造・材料 繊維補強セメント系材料 ハニカムパネル 軽量化

## 1. 研究開始当初の背景

近年の環境問題への対応として、建設およびコンクリート分野でも排出CO<sub>2</sub>量の削減が求められており、対応が求められる喫緊の課題である。コンクリート分野では、特にセメントの製造過程におけるCO<sub>2</sub>排出量が膨大であり、この観点からはセメントおよびコンクリートそのものの使用量を削減することが最も単純かつ有効な手段となり得る。本申請課題では、これを実現する一つの手段として、ハニカムパネル構造を、繊維補強セメント系複合材料 (FRCC) によって構成することを提案している。ハニカムパネル内部は大部分が中空もしくは断熱材等で置換されるため、通常のコンクリート製パネルと比較するとコンクリートおよびセメントの使用量を大幅に削減できる可能性がある。これとともに、パネル自体の軽量化により断熱性能の向上や施工の簡素化など、環境側面に多面的に配慮した技術になるものと期待される。モルタルとワイヤメッシュを用いてハニカムパネルを製造する試みは、昭和30年代にも見られた(松村ら、日本建築学会論文報告集、第89号、1963)。しかし、元来が脆性的な材料であるコンクリート・モルタルを用いての実現は困難なものであったと推測され、現在に至ってもこのようなパネルが実用化は達成されていない。

短繊維を補強材料として用いる繊維補強セメント系複合材料 (Fiber Reinforced Cementitious Composite; FRCC) は、既に数多くの材料開発の蓄積があり、近年は自己充てんが可能な流動性や、引張応力下においてひずみ硬化や10N/mm<sup>2</sup>以上の引張強度、数%程度までの終局ひずみを実現するなど、極めて高い性能が得られつつある。これらの知見を動員することで、これまでは実現が困難であった本用途に適用可能なFRCCの材料設計と、FRCCハニカムパネルの開発を行う。

## 2. 研究の目的

本申請課題の目的は、適切なFRCC材料によるハニカムパネルの開発である。これを実現するには、高い力学特性と流動性を併せ持つFRCCの、適切な材料設計と、実際にハニカムパネル形状を可能にするための適切な施工方法の検討が必要である。すなわち、材料設計においては、厚さが数mm程度以下の薄片状の型枠に対して注入が可能な流動性と、このような薄い板状の形状とした場合にも脆性的に破壊しないための十分な靱性能をはじめとした力学性能の両立が求められる。施工方法については、中空部分を構成する充填材や型枠の開発、また、ハニカムコアを形成するための適切な打設・組み立てなど方法の検討などがあげられる。なお、技術の実用化のためには耐久性の検討が不可欠であるが、本申請期間内には検討しないことと

する。

## 3. 研究の方法

ハニカムパネルの開発に当たっての具体的な研究項目としては、前述のように施工性・力学特性ともに十分な性能を持つFRCCの開発と、適切なハニカムパネル形状の設定、この形状を実現させるための施工方法の検討および試作パネルとしての性能評価が必要である。

調合設計については、具体的な達成目標として、フレッシュ時の流動性については材料分離がない状態でテーブルフロー値を250mm以上とし、数mm程度以下の厚さに対して注入した上で、材料分離や有害な気泡などが混入しないことを挙げて検討を行った。力学特性に関しても具体的な目標値を挙げ、圧縮強度30N/mm<sup>2</sup>、引張強度4N/mm<sup>2</sup>、引張応力下でのひずみ硬化現象の確認を目指した。パネル形状の作製方法については、アクリル製などの六角パイプを型枠内に設置しての流し込みにより一体成型する方法のほか、薄片状の要素部材を予め作製した上で、これにプレス成型を行ってハニカムリブの要素とし、フランジを改めて打設することによって一体化するなど、様々な打設方法について検討を行った。実際に得られたパネル供試体については、圧縮強度試験などを行って力学性状を確認した。

## 4. 研究成果

### (1) FRCCの調合設計

ハニカムパネル、特にハニカムリブとしての使用に耐えうるFRCCとして、力学特性および充てん性に優れた調合とする必要がある。具体的には、15打でのテーブルフロー値(以下TF値とする)250mm、圧縮強度30N/mm<sup>2</sup>、引張強度4N/mm<sup>2</sup>を確保し、さらに引張応力下でひずみ硬化が見られることを目標として、水バインダー比(W/B)や繊維長・混入率などをパラメータに取り上げて材料設計を行った。これらの評価のために、圧縮試験用の直径50mm×高さ100mmの円柱状試験体、および、厚さ13mmの引張試験用ダンベル型試験体を作製し、載荷試験によって力学特性を確認した。混和材料としてフライアッシュ(種)を用いたほか、補強繊維にはPVA繊維を使用した。

実験による検討の結果、W/B=35%、PVA繊維長6mm、繊維混入率2.5%とした場合に、TF値、力学特性ともに上述の目標値を満足することが確認された。図1に、ダンベル型試験体による引張試験時の応力とひずみの関係の一例を示す。この図からも確認できるように、初期ひび割れが発生した後にも強度低下は小さく、ひずみ硬化を伴う高い靱性を確保することができた。

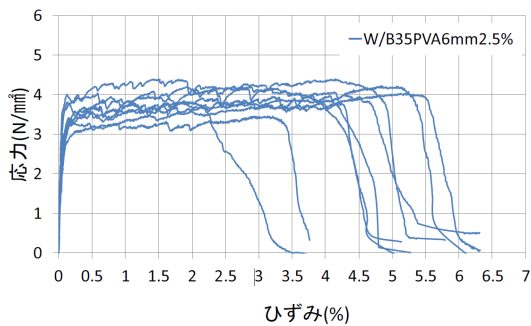


図1 引張試験時の応力とひずみの関係

(2) パネル形状への施工方法の検討

上記で得られた調査を基本調査とし、これを用いてハニカムパネル形状を作製するための施工方法について検討を行った。

図2は流し込みを前提とした場合の打設方法の一例である。ハニカムコアの作製に当たっては、あらかじめハニカム状に加工したシリコンゴム製の型材を型枠内に設置し、これにアクリル製の六角棒を挿し入れて型枠とした。ハニカムコアが横方向となるように型枠を設置し、上部からの流し込みによってハニカムコアを得た。この方法の場合、十分な締固めを行うことによって有害な空隙などを生じることなくハニカムコアを作製することが可能であった。この一方で、ここではアクリル棒の両辺にシリコンゴムが設置されるため、ハニカムコアの厚さを一定に保って施工することが可能であるが、市販品のアクリル六角棒を用いる場合にはそのサイズが限定的であることや、ハニカムリブの厚さやパネルそのものの大きさが両辺のシリコンゴムによって規定されてしまうため、数多くの種類のパネルを試作してのパラメトリックスタディは困難であるなどの欠点がある。これを改善するため、アクリル棒の端部にねじ穴を設置して底板からボルトなどによって固定し、これにFRCCを流し込むことによってハニカムコアを作製する方法を試みた。このことにより、シリコンゴムのような別途加工が必要な部材を大幅に削減でき、コンパネなどで作製される底板への穴開け加工のみでリブ厚さやパネル全体の大きさを自由に変更することが可能になる。この一方で、アクリル六角棒のサイズが限定的なままにならざるを得ず、また、底板1面からの固定ではハニカムリブの厚さを一定にすることが困難であった。

これらの流し込みとは異なるアプローチとして、図3に示されるような薄片状のFRCCプレートをプレス加工して、ハニカムコアを得る方法についても検討を行った。すなわち、第一段階として厚さ2mm程度までの独立したFRCCプレートを圧入によって作製し、これを鋼製の六角形(半分のため台形)型材を用いてハニカムコアを得る方法である。このときのプレス成型は、圧縮試験などに用いている汎用のアムスラー型万能試験機を用い

た。当然、プレス段階はFRCCプレートには大きなダメージがものの、極めて高い靱性によって破断などには至らず、また、その後の水中養生を施すことで折り曲げ部分には炭酸カルシウムの析出などによる「自己治癒」現象がみられて六角形を維持することが可能であった。この自己治癒現象については、研究代表者が別途取り組んでいるひび割れ自己治癒FRCCを応用したものである。また、このように折り曲げ部で力学的に完全な一体とならない場合であっても、ハニカムパネルとしての力学特性への影響は限定的であることが解析結果から確認された。ただし、研究期間・予算などの関係から汎用試験機を用いたこともあり、得られたハニカムコアの精度は必ずしも十分なものとはならず、ハニカムパネルの試作までには至らなかった。本申請課題の研究期間は終了となるが、特に第3の方法については、ハニカムパネル試作まで行えるように引き続き検討に取り組んでいきたい。



図2 流し込みによるハニカムパネルの試作

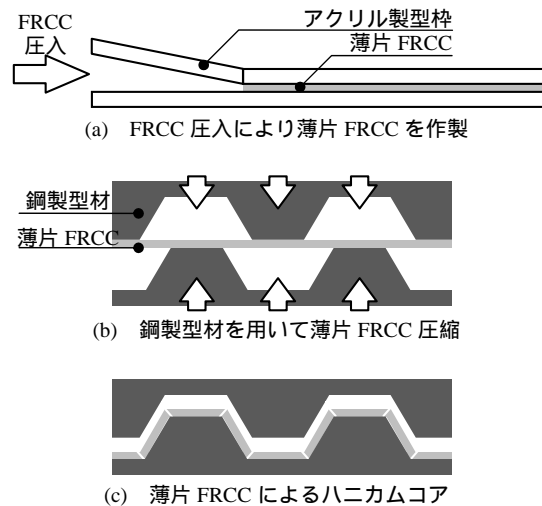


図3 薄片FRCCのプレス成型によるハニカムコア

(3) ハニカムパネルの性能評価

試作したハニカムパネルについて、幾つかの基礎的な実験により力学特性を確認した。その一例として、圧縮試験の結果について、圧縮応力とひずみの関係を図4に示す。ただし、このときの縦軸は中空部分も含めた見かけの面積当たりの応力を示している。この図から、見かけの最大圧縮強度を20 N/mm<sup>2</sup>以上に確保しながら、一旦は強度低下を示すものの10%を超える大きなひずみが生じた場

合であっても圧縮強度を保つことが可能であると確認された。図5に載荷試験中のハニカムパネルの状態を示す。この図に示されるように、ハニカムコアはその端部から座屈して変形し、全体が崩壊するような脆性的な挙動は見られなかった。一方で、繊維を混入しない通常のもルタルで同様のハニカムパネル(リブ厚さ5mm)の作製を試みた場合は、図6に示すように脱型時の衝撃程度で脆性的に破壊してしまった。ハニカムパネルを作製するという目的に当たって、ここで提案したFRCC材料の採用が有効であるものと考えられる。

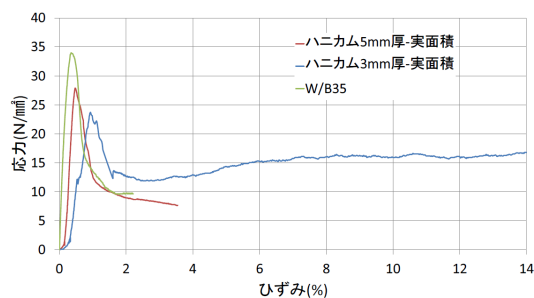


図4 ハニカムパネルの圧縮応力とひずみの関係



図5 載荷試験中のハニカムパネル(底面より座屈)



図6 繊維混入なしとした場合のハニカムパネル

## 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0件)

〔学会発表〕(計1件)

中川佑哉、西脇智哉、菊田貴恒：繊維補強セメント複合材料を利用したハニカムパネルの開発に関する基礎的研究、第75回日本建築学会東北支部研究報告、2012.6.16、八戸工業大学

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

西脇 智哉 (Nishiwaki, Tomoya)  
東北大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：60400529

### (2)研究分担者

菊田 貴恒 (Kikuta, Takatsune)  
日本工業大学・工学部・助教  
研究者番号：20599055

### (3)連携研究者

桐越 一紀 (Kirikoshi, Kazuki)  
東北大学・大学院工学研究科・技術専門職員  
研究者番号：60240660