

機関番号：13401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760520

研究課題名(和文)脱着可能なパネル部材により剛性とエネルギー吸収能力を付与した超高靱性型構造の開発

研究課題名(英文)Development of super ductile structure system added stiffness and capacity of absorption response energy with removable and installable panels

研究代表者

井上 圭一 (INOUE, Keiichi)

福井大学・工学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：70333630

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：建物が損傷を受けるような大地震の後も軽微な補修などを行い使用し続けることが、経済的な観点からだけではなく、環境問題、長寿命化からも望まれている。本研究では、高強度材料などを用いた高靱性型の骨組に脱着可能なパネル部材を用いた制振構造の開発についての研究を行った。大地震時に集中して損傷が生じ、エネルギー吸収するパネル部材を、地震後に簡易に交換するだけで再使用可能とすることを目指した構造である。作成した試験体載荷実験による性能評価に加え、地震応答性状の確認のための解析的研究を行い、基本的な構造性状を明らかにすることができた。

研究成果の概要(英文)：After large earthquake, buildings are desired continue to use, not only from an economic point of view, but also from the long life of buildings and environmental issues, with some minor repairs. In this study, development was made the vibration control structure using removable and installable ductile panel members in the frame of high toughness type using, such as high strength material. It is a structure system that aims to damage caused to concentrate in panel members for energy absorption. Building is reusable by simply replacing the panel members damaged and absorbed earthquake energy.

In order to evaluate the structural performance of the structural system, experiments of specimens of reinforced concrete structure and steel structure were performed. In addition, analytical study for the confirmation of the seismic response characteristics were did. The basic properties of the proposed structure system are clear by this study.

研究分野：建築学

科研費の分科・細目：建築構造・材料

キーワード：制振構造 袖壁 PCa部材 地震応答 繊維補強

## 1. 研究開始当初の背景

建築物の耐震性を向上させるためには、耐震、免震、制振などの考え方がある。

地震に対する構造性能の向上についても、現在では環境問題、建物の長寿命化ということとも強く関連する。すなわち、大地震が発生した場合でも、建物を継続的に使用できることが望まれている。

大地震に対して、建物の構造体を弾性範囲で設計することは、経済的にも不合理であり、過剰な耐震設計を行うことは、環境・エネルギーの面からも不合理である。当然ながら、建築計画の観点からは、建物の構造体はできるだけ小さく、柱・壁などは少ない方がよい。構造体に高強度の材料を使って、できるだけ数を少なく、かつ小さい断面の部材を使って建築計画、環境問題について望ましいと思われる耐震設計を行うことを考えると、構造体の耐力の観点からはクリアできたとしても、変形が大きくなってしまふことが考えられる。大地震時には2次部材が損傷を受け、建物の継続使用は難しい。

このような背景のもと、できるだけ簡便な方法で、耐力、変形性能を向上させ、かつ建物の長寿命化に貢献できる構造システムの開発が望まれている。さらに、耐震性の乏しい既存建物の耐震補強にも適用可能とする補強方法が望まれる。ここでは、脱着可能なパネル部材を袖壁として用いて、剛性とエネルギー吸収能力を付与した超高靱性型構造の開発を目指す。地震時にはパネル部材のみが損傷しながらエネルギー吸収し変形を清書する。地震後には、パネルのみを交換すればよい。

## 2. 研究の目的

通常建築計画上から用いられる袖壁に着目し、袖壁で地震エネルギーを吸収する制振構造システムの開発を目指す。具体的には、袖壁を低強度高靱性にしておくことで、柱の変形の小さいうちから袖壁に損傷させ、袖壁内の鉄筋を降伏させることでエネルギーを吸収させる。パネルは低強度とするが、柱と比較すると剛性、耐力の向上も期待できる。低強度高靱性袖壁パネルのみ損傷することでエネルギー吸収し、変形を小さくすることができ、柱梁などの構造体はほぼ弾性にすることが可能となる。大地震により袖壁パネルが損傷してしまっても、柱梁はほぼ無被害になることを想定しているため、地震後は、簡単な袖壁パネルの交換が行えれば、地震被害後の使用性も向上し、構造体の長寿命化も期待できることになる。袖壁パネルを交換できれば、建築計画上のリノベーションも実施しやすい。もし、想定以上の大地震に遭遇した場合でも、柱梁は剛性は小さいが変形性能は期待できるので、袖壁パネルが大きく損傷してしまっただけでも、変形性能を考慮した耐震性能は有することになり、リダンダンシーを有する構造システムともいえる。

(1) 制振効果を有する PCa パネルの開発  
低強度のコンクリート、モルタルを使用して、ひび割れを発生しやすくする。そのひび割れが生じた部分ではパネル内の鉄筋が降伏し、ひび割れができるだけパネル全体に分散すると、エネルギー吸収も大きくなる。そのため、パネルには繊維材料も併用し、高靱性になるパネルの作成を行う。繊維には、材料性能の観点からは短繊維を混ぜ込む方法も有効ではあるが、本研究では、施工性、分別しやすさの観点から、環境に配慮して、長繊維でできたグリッドを使用する。

## (2) PCa パネル接合部の開発

低強度高靱性 PCa パネルを袖壁として構造躯体に接合する。大地震により PCa パネルが損傷した場合、簡単に取り換える必要があり、さらに、既存建物の耐震補強に適用するためにも、簡単な接合方法の開発が望まれる。

本研究では、図1に示すようにコッターを有するシート状のものを作成し、それを構造躯体に貼り付ける。図2に示すように PCa パネルにもコッター形状を設けておき、それらの隙間に無収縮モルタルを充填し接合する方法を取ることとした。この方法で接合し PCa パネルの構造性能が発揮できれば、躯体への工事を軽減できることにつながり、本構造システムの普及への大きなメリットになる。

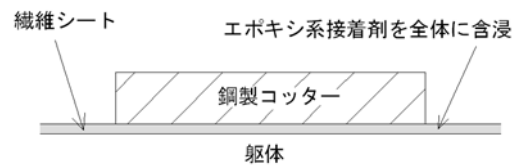


図1 コッターシートの作成

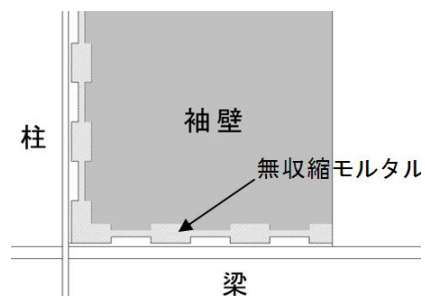


図2 接合部概要

## (3) 縮小試験体の載荷実験

縮小試験体を作成し、袖壁パネルの構造性能、接合部の性能を確認する。荷重と変形を計測し、ひび割れ性状を観察し破壊状況についても考察を行う。載荷実験を行った加力装置を図3に示す。実験により、低強度高靱性袖壁パネルを有する試験体の水平せん断力を負担する場合の構造性能を確認、把握することが目的である。パラメータとして、鉄筋の量、繊維の量、モルタル強度、接合部の形状などを検討する。

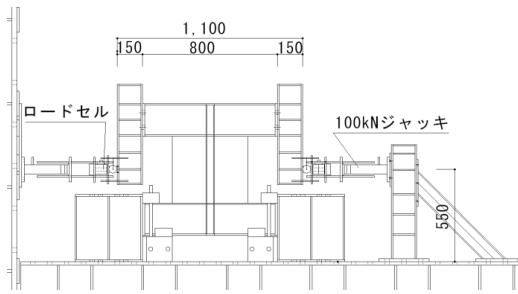


図3 加力装置

(4) 地震応答解析による制振効果の検討

本構造システムが実際に地震動を受けた場合の動的挙動を把握し、PCa 袖壁を有する建物の制振効果を定量的に評価することを目的に、地震応答解析を行う。静的には、剛性・耐力が上がる場合でも、動的な評価を行うことは重要である。(3)で行った縮小試験体の載荷実験の結果を参考にして、PCa 袖壁の復元力特性モデルを作成し、それを用いて地震応答解析を行い、応答変位、エネルギーの観点から制振効果についての検討を行う。

3. 研究の方法

(1) 制振効果を有する PCa パネルの開発

連続繊維グリッドを使ったパネル試験体を作成して、繊維の付着状況などを考慮した曲げ試験を実施する。試験体の概要を図4に示す。これによって、低強度高靱性袖壁パネルの変形性能について考察が可能である。パラメータとして、繊維の量とかぶり厚さの影響などを調べた。具体的には、6体のパネル試験体を作成し、曲げ試験を行った。

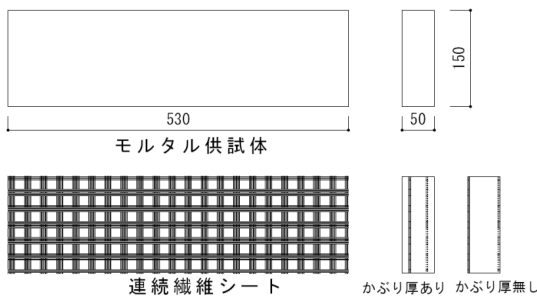


図4 曲げ試験体概要図

(2) PCa パネル接合部の開発

簡易な接合部による袖壁パネル付き柱の構造システムの実現性を指すために、接合部の特性について検討する。躯体に接合するコッターはアンカー、溶接などを用いず、接着剤で固定することを考える。したがって、鋼片をコッターの凹凸として用い、繊維シートまたは薄い鋼板に鋼片を接着しておき、コッターシートを作成しておき、それを躯体に張り付ける。コッターの大きさ、間隔などをパラメータとする。

実験を行った結果、鋼片コッターを繊維シートまたは鋼板に接着した部分が剥離しやすいことが分かったので、鋼片を薄い鋼板に溶接して接合したコッターシートも作成した。

パラメータとしたコッターシートを使って、縮小試験体の載荷実験を行い、パネル接合部の構造性能についての検討を行う。

(3) 縮小試験体の載荷実験

構造躯体として、鉄筋コンクリート構造と鋼構造について実験を行った。

鋼構造については、以下のようなパラメータで解析を行った。

PCa パネルの繊維シートの量

PCa パネルの低降伏型鉄筋の量

モルタル強度の違い

繊維シートによる接合部補強の影響

具体的には、平成23年度に袖壁パネルの補強繊維量や鉄筋量をパラメータとし、鉄筋コンクリート構造試験体3体(図5)、鋼構造試験体3体(図6)の載荷実験を行った。平成24年度には、接合部のディテールとPCa パネルのモルタル強度をパラメータにした鋼構造試験体4体の載荷実験を行った。平成25年には、構造躯体とPCa パネルと接合部の補強方法の確認のための鋼構造試験体4体の載荷実験を行った。

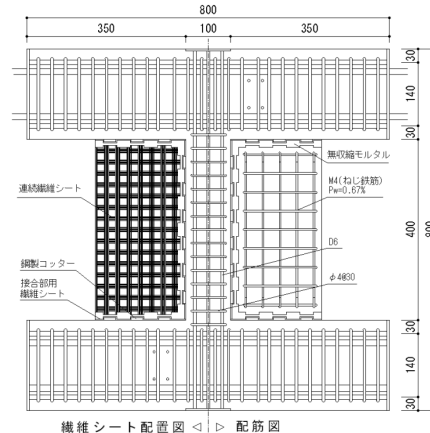


図5 鉄筋コンクリート構造試験体例

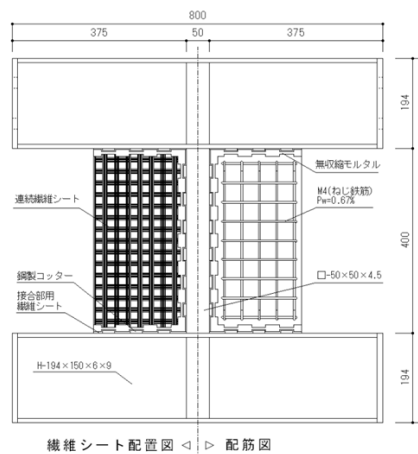


図6 鋼構造試験体例

(4) 地震応答解析による検討

柱部分の復元力特性と、袖壁パネル部分の復元力特性をモデル化し、1質点系の地震応答解析を行った。柱部分の復元力特性は、鉄筋コンクリート構造をモデル化した D-tri 型モデルと鋼構造をモデル化したバイリニアモデルとした。袖壁部分の復元力は、(3)で行った実験結果を参考に設定した。具体的には図7に示すような、スリップ性状を有するダブルバイリニア型の復元力モデルを基本とし、初期のひび割れ、降伏後剛性低下、戻り剛性の低下を考慮した復元力モデルを設定して解析を行った。

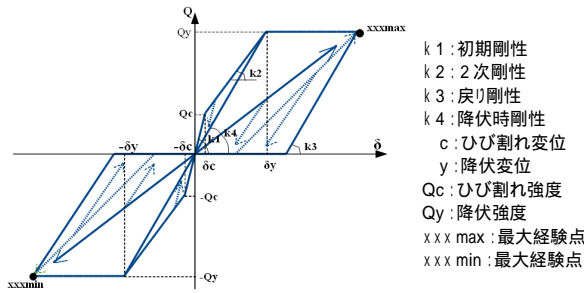


図7 袖壁部 復元力特性モデル

パラメータとしては、柱部分骨組の固有周期、ベースシヤー係数とし、袖壁パネルの量も袖壁パネルのベースシヤー係数を変化させた解析を行った。

PCa 袖壁パネルの使用による応答低減効果については、応答変位の比較により検討を行ったが、地震応答エネルギーの観点からも検討を行った。

4. 研究成果

(1) 制振効果を有する PCa パネルの開発

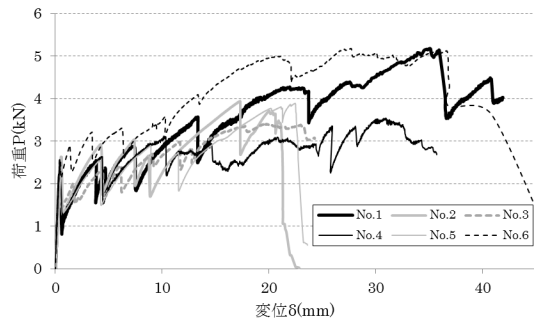
繊維の量、繊維の方向(主方向、従方向)、かぶり厚さの影響についてもパラメータとした試験体を作成して曲げ実験を行った。図8に実験結果を示す。

本研究で作成した長繊維グリッドを使用した PCa パネルは、曲げ性状としては、過去に実施された短繊維を混ぜ込んだものよりも変形性能が大きく向上することが分かった。ひび割れ性状としても、マルチプルクラックを生じることが分かり、高靱性袖壁パネルに使用することが有効であると考えられる。

パネル試験体の長辺方向に主繊維方向とした場合の方が短辺方向とした場合位比べて変形性能が大きく、最終破壊性状が異なるということが分かったが、1/25 程度の大きなたわみまでは各パラメータの影響は大きくなく、グリッド繊維補強による PCa パネルへの靱性付与の効果が十分にあることが分かった。

すなわち、高靱性 PCa パネルには、繊維材料を使うことが有効であることは当然ではあるが、施工上、環境的にも望ましいグリッ

ドのような長繊維の使用は、構造的にもメリットがあるものと考えられる。ただし、モルタルとの付着性状や繊維グリッドの交点における繊維の抜け出し性状についてはさらなる検討、改良の余地があるものと考えられる。



【主繊維方向】		【繊維接着範囲】		【かぶり厚】	
長辺方向	黒線	交点のみ	実線	あり	太線
短辺方向	灰色線	全体	破線	無し	細線

図8 パネル曲げ試験の荷重変位関係

(2) PCa パネル袖壁を有する縮小試験体の載荷実験

鉄筋コンクリート構造と鋼構造の縮小試験体の載荷実験における荷重 Q 変形の結果の例をそれぞれ図9、図10に示す。図9、図10とも、PCa パネル内の繊維と鉄筋の量が異なる試験体の結果を示す。それぞれ正側の骨格曲線のみ示す。これらの図から、PCa パネル内の繊維、鉄筋の量により、若干の違いはみられるが、それらの違いは大きくなく、PCa パネルを袖壁に使用することにより、変形能力、エネルギー吸収能力とも大きく向上していることが分かる。また、コッターの形状を変化させた場合にも、若干の耐力と剛性の違いは見られたが、それらの違いは小さいことが分かった。

また、コッターによる接合では、コッター部に損傷が発生してしまう場合もあったため、それらの補強のために、繊維シートを張り付ける方法の有効性について検討したが、接合部における損傷が見られなくなり、その結果、耐力、変形性能が向上する結果が得られた。PCa パネルの接合部については、コッターを使うことが有力であるが、繊維シートなど補強することで構造性能を向上させることが分かった。実際の建物への応用については、さらに検討をすべきである。

図11に、鋼構造試験体の載荷実験結果から得られた、等価粘性減衰定数と部材角関係を示す。PCa パネルの違いによらず、変形の小さい段階から十分大きな等価粘性減衰定数を示しており、エネルギー吸収能力の性能を有していることが分かる。鉄筋コンクリートも同様な結果になっている。

(3) 地震応答解析による検討

柱部分の固有周期の異なる建物モデルに袖壁の復元力を増加させた地震応答解析を

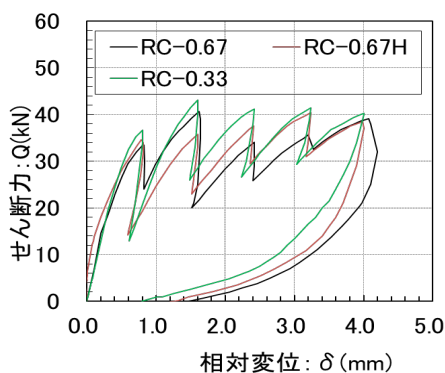


図9 RC造試験体Q- 曲線

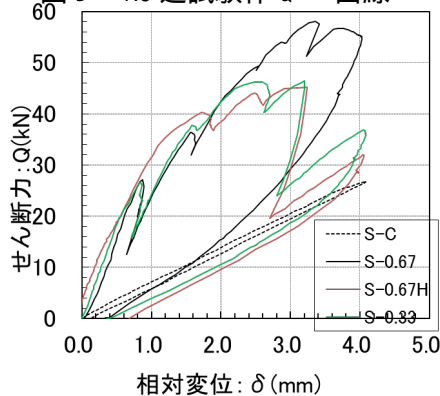


図10 鋼構造試験体Q- 曲線

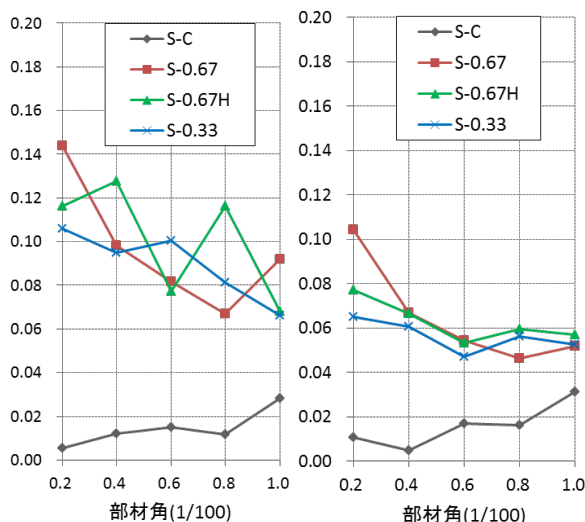


図11 等価粘性減衰定数と部材角(S造)

行った。図12、13、14に、鋼構造柱部の固有周期を0.3(s)、0.45(s)、0.6(s)と設定し、柱部のベースシヤー係数を0.25とし、入力地震動をBCJ-2としたときの解析結果を示す。図12は袖壁部のベースシヤー係数と最大変位を示し、図13は袖壁部のベースシヤー係数と入力エネルギーを示す。図14は柱部の履歴エネルギーを示す。

袖壁パネルを増加していくと、最大変形は減少し、入力エネルギーも減少、またはほぼ一定の傾向を示すことが分かる。柱部分の履歴エネルギーはほぼ直線的に減少する。

鉄筋コンクリート構造のモデルを使った場合でも、ほぼ同様の性状を示す。

これらの結果から、高靱性の構造体に高靱性袖壁を併用した構造システムの有効性が分かる。

PCa 袖壁パネルは、エネルギー吸収のためには低強度であることが望まれ、そのためにリサイクル材料などを使用できる可能性も高く、簡便な接合方法でもよい。本構造システムは、建物構造体を長寿命化するためのシステムであるが、環境問題に対しても有効であり、また、既存建物の耐震補強にも適用を考えていくことができる。さらに、途上国の建物への適用なども検討していくことが可能であろう。

本構造システムの基本的な構造性能については把握できたが、実際の建物への応用については今後の課題となる。

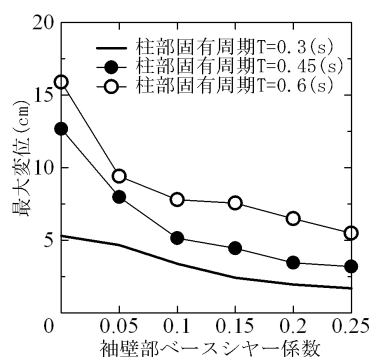


図12 袖壁部のベースシヤー係数と最大変位

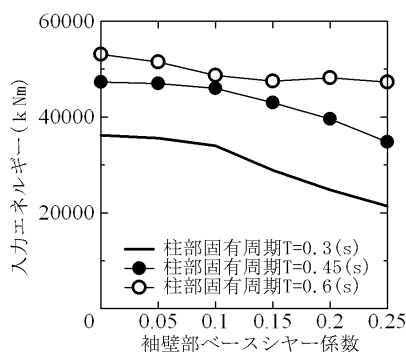


図13 袖壁部のベースシヤー係数と入力エネルギー

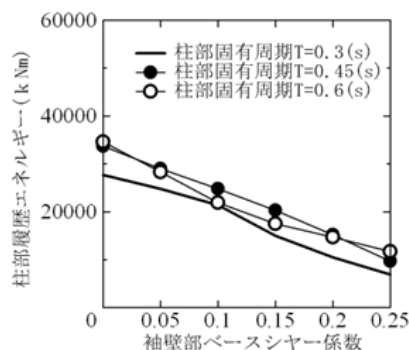


図14 袖壁部のベースシヤー係数と柱部履歴エネルギー

## 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 7 件)

新石雅文、井上圭一、小林克巳、エネルギー吸収能力を有する袖壁パネル付き鋼構造建物の構造性能評価：その1 実験概要と実験結果、日本建築学会学術講演梗概集 2012 (構造) P905-906、2012.9.  
井上圭一、新石雅文、小林克巳、エネルギー吸収能力を有する袖壁パネル付き鋼構造建物の構造性能評価：その2 地震応答解析、日本建築学会学術講演梗概集 2012 (構造) P907-908、2012.9.

K. Inoue, K. Kobayashi and M. Araishi : Structural characteristics of column with precast wing walls as energy absorption elements, Proc. of 15th World Conference on Earthquake Engineering, Paper ID 1784, 2012

井上圭一、小林克巳、高靱性パネルを袖壁に用いた建物モデルの地震エネルギー応答、日本建築学会北陸支部研究報告集 No.56、P31-34、2013.5.

井上圭一、小林克巳、高靱性パネルを袖壁に用いた建物モデルの地震エネルギー応答、日本建築学会学術講演梗概集 2013 (構造) P1049-1050、2013.8.

福田智里、井上圭一、小林克巳、高靱性パネル袖壁付き柱の構造特性に関する FEM 解析、日本建築学会北陸支部研究報告集 No.57、2014.7.

井上圭一、小林克巳、高靱性パネルを袖壁に用いた RC 造建物モデルの地震応答、日本建築学会学術講演梗概集 2014、2014.9.

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

井上 圭一 (INOUE, Keiichi)  
福井大学・大学院工学研究科・講師  
研究者番号：7 0 3 3 3 6 3 0

### (2)研究分担者

なし

### (3)連携研究者

なし