

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560531

研究課題名 (和文) 耐震素材としての高強度繊維補強コンクリートの混合モード破壊特性に関する研究

研究課題名 (英文) Study on mixed mode fracture properties of high-strength fiber-reinforced concrete used as earthquake resisting materials

研究代表者

橋高 義典 (KITSUTAKA YOSHINORI)

首都大学東京・都市環境科学研究科・教授

研究者番号：20177877

研究成果の概要 (和文) : コンクリートに繊維補強モルタルを張付け材とし磁器質タイル仕上げとした場合での混合モード (せん断) 破壊特性を実験検討し, コンクリート下地に対する仕上材料の耐震素材としての有効性を検討した。また, 表面に仕上げを有するコンクリートの混合モード破壊時での 3 次元のひび割れ進展解析方法を提案し, 実験結果とよい対応が得られた。以上により仕上材料の耐震補強効果を評価するための基礎的資料が得られた。

研究成果の概要 (英文) : Mixed mode fracture behavior of a concrete with fiber reinforced mortar and porcelain tile finishing was investigated and the effectiveness for those finishing materials as a seismic isolation device was cleared. Numerical analysis method to evaluate the 3D crack propagation of a concrete and finishing materials was proposed and a good correlation was found between the analysis results and the test results. Evaluation data on the seismic retrofit performance of finishing was obtained.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2009 年度	900,000	270,000	1,170,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

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：構造材料

## 1. 研究開始当初の背景

既存鉄筋コンクリート建造物の耐震補強が急務となっているが, 低強度の外壁等の補強には繊維補強コンクリート材料の増塗りが有効と考えられる。既存鉄筋コンクリート部材に, 靱性の高い繊維補強材料ならびに剛性の高い仕上材料等を用いることで, 地震時

のせん断ひび割れの進展抑制効果が期待でき, 美観上も有効な補修方法となる。しかしながら, 各種仕上材料による補強を施したコンクリート材料のせん断変形 (混合モード) による破壊やひび割れ進展に関する研究は少ない。

## 2. 研究の目的

本研究は、コンクリートに繊維補強モルタルを張付け材としタイル仕上げとした場合でのせん断荷重に対する破壊進展の特性を把握するとともに、その数値解析方法を確立し、各種仕上材料の耐震補強効果の評価のための基礎的資料を得ることを目的とする。

## 3. 研究の方法

まず、せん断ひび割れ進展の評価試験方法を確立する。次に、繊維補強モルタルと磁器質タイルによる仕上げとしたコンクリート試験体のせん断ひび割れ進展性状を実験検討し、仕上材料がひび割れ抵抗性に及ぼす効果を明らかにする。さらに、コンクリート下地と仕上材料が複合した場合でのせん断破壊進展時の挙動の数値解析方法を確立する。

## 4. 研究成果

### (1)せん断ひび割れ進展の試験方法

切欠きを有する梁形試験体の4点せん断試験について検討した。試験体は水セメント比60%のモルタルとし梁試験体の中央にはりせいの1/4の切欠きを4面に入れ切欠き部に破壊を集中させた(図1)。試験体側面2面に2軸変位計(図2)を取り付け、試験体の開口変位(x方向変位)とずれ変位(y方向変位)を計測し、荷重との関係を求めた。4点載荷によりせん断力を与え(図3)、クリップゲージから得られる開口変位(COD)による変位制御試験とした。

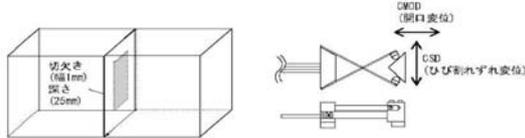


図1 試験体

図2 2軸変位計

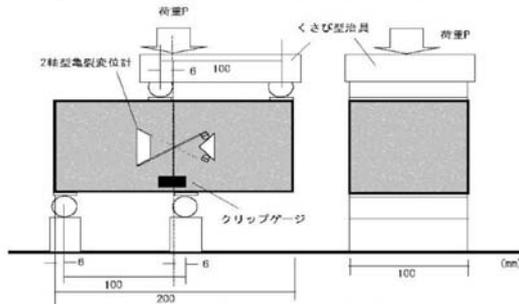


図3 4点せん断試験概要

図4にプレーンモルタルでの荷重と変位制御用ひび割れ開口変位(COD)、開口変位(Disp.X)、ずれ変位(Disp.Y)との関係例を示した。CODで制御することで安定破壊が得られた。また、切欠き部での破壊が生じた。開口変位およびずれ変位ともに0.02mm程度において最大荷重に達し、その後は荷重が低下する軟化性状が見られた。

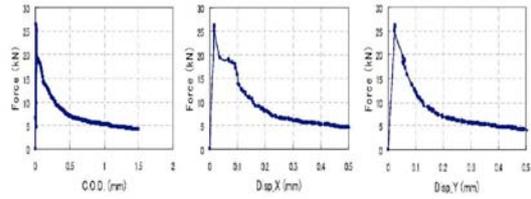


図4 荷重-変位曲線

以上、本試験方法により、切欠き部に破壊を集中させることが可能であること、また、開口変位、ずれ変位とも安定した計測値が得られ軟化現象が評価できること、せん断破壊時の材料特性を評価できること等が明らかとなった。

### (2)タイル仕上げを有するコンクリートのせん断ひび割れ試験方法

タイル仕上げを施したコンクリートはり形試験体への4点せん断試験の適用性について検討した。寸法200×200×100mmのコンクリート下地1面に張付けモルタルにより磁器質タイルを施工し、上下50mmの切欠きを入れ、4点せん断試験を行った(図5)。コンクリートの条件、張付けモルタルの調合、使用した繊維の物性、試験体に用いた記号を表1~4に示す。

表1 コンクリート調合および強度試験結果

試験体	水セメント比 (%)	質量(Kg/m <sup>3</sup> )					材齢28日強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	
		水	セメント	山砂	砕砂	砕石			
C+M	60	182	303	228	559	979	0.455	33.9	25.6
C+M+T								29.3	23.6

表2 張付けモルタルの調合

水セメント比 (%)	C/S (容積比)	珪砂5号:珪砂6号 (容積比)	繊維混入率 (%) (容積比)
40	1	5:1	0, 0.5

表3 繊維の物性

原料	繊維直径 (μm)	繊維長さ (mm)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	引張強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)	破断時の伸び (%)
ナイロン	28	5	1.14	969	5.6	28~45

表4 試験体に用いた記号

記号	試験体
C	コンクリート
M	張付けモルタル
f	繊維補強張付けモルタル
T	タイル仕上げ

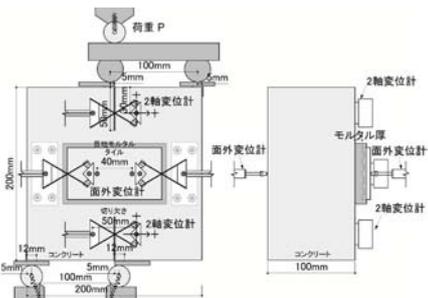


図5 試験体概要

図6に試験体上下部に設置した2軸変位計において、ひび割れが発生した側の荷重-変位曲線を示す。コンクリートのみの試験体(C)は、わずかな変形でひび割れが発生し、破壊に至ったが、張付けモルタルを施工した試験体(C+M, C+fM)は変形性能が大きくなり、張付けモルタルに繊維を混入した試験体(C+fM)はさらに大きくなった。また、すべての試験体において張付けモルタルおよびタイル自体の剥離はなかった。このことより、本試験方法の有効性が確認された。

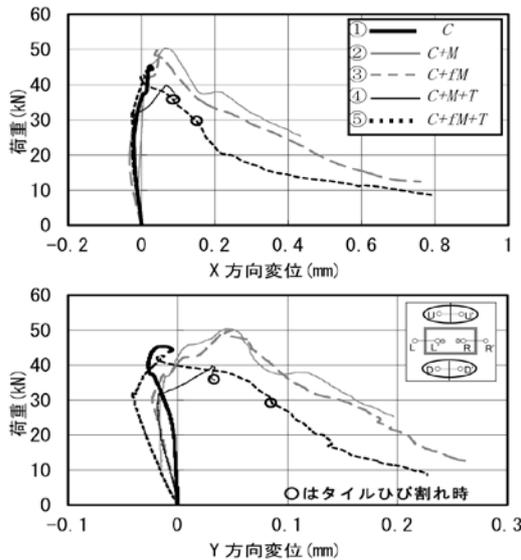


図6 UU' および DD' の荷重-変位関係

(3) 繊維補強モルタルのひび割れ抵抗性

タイル施工に用いる繊維補強張付けモルタルについてせん断試験を実施し基礎的な物性を把握した。試験体の寸法は 40×40×160mm, モルタルの水セメント比は 50%一定, 繊維混入率を 0, 1vol.% の 2 水準とした。繊維はビニロンを使用した。試験は 4 点せん断試験 (図7) とし変位制御試験とした。

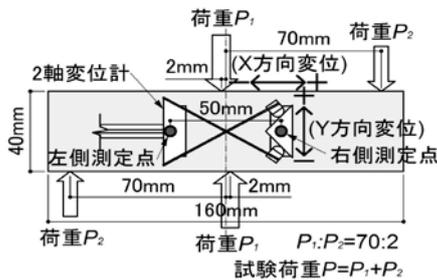


図7 モルタルの4点断試験概要

図8に荷重-変位曲線を示す。繊維無混入試験体は、最大荷重に達した際にせん断ひび割れが発生し破断しているのに対し、繊維を混入したモルタルはひび割れ発生後、試験体の破断とはならず、水平方向変位 (ひび割れ幅) の拡大とともに徐々に荷重が低下した。

これは繊維のブリッジング効果により、モルタルのひび割れ進展抵抗性が向上したためである。また、鉛直方向変位 (ひび割れずれ変位) は繊維無混入試験体ではひび割れ発生とともに破断しているが、繊維混入試験体では、繊維の効果により、変形とともに荷重が低下している。

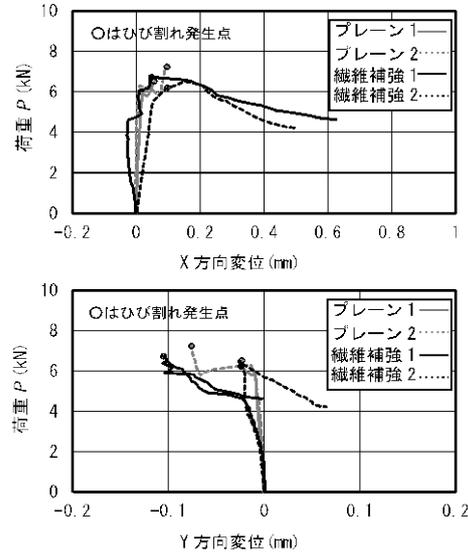


図8 モルタル試験体の荷重-変位曲線

以上、張付けモルタルに関するせん断試験を実施した結果、モルタルにビニロンを混入することでせん断破壊に対する靱性が向上することが明らかとなった。

(4) 繊維補強モルタルによるタイル仕上げのせん断ひび割れ進展抑制効果に関する検討

実際の耐震補強を想定し、低強度のコンクリート躯体に各種モルタルによりタイル仕上げを行った場合でのせん断ひび割れ進展抑制効果について検討した。

試験体は図5と同様である。コンクリートは水セメント比 60, 100% の 2 水準, 張付けモルタルは水セメント比 40%とした。張付けモルタルに混入した繊維はビニロンとし、混入率を 0, 1vol.%とした。また、張付けモルタルの塗り厚を 8, 13mm の 2 水準とし (表5), それらの組合せにより、計 12 種類 (表6) について検討を行った。コンクリート強度は 4 週標準養生において、水セメント比 60% の試験体が 34.7N/mm<sup>2</sup>, 水セメント比 100% の試験体が 14.6N/mm<sup>2</sup>であった。試験は 4 点せん断試験とし、変位制御試験とした。

表5 コンクリートの調査および強度特性

水セメント比 (%)	質量 (kg/m <sup>3</sup> )						材齢 28 日強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
	水	セメント	山砂	砕砂	砕石	AE 減水剤		
60	182	303	229	558	978	0.756	34.7	23.4
100	200	200	274	671	859	0.8	14.6	17.1

表6 試験体に用いた記号

記号	試験体記号一覧
$C_{60}$	普通コンクリート (W/C=60%)
$C_{100}$	低強度コンクリート (W/C=100%)
M8	プレーン張付けモルタル (厚 8mm)
M13	プレーン張付けモルタル (厚 13mm)
FM8	繊維補強張付けモルタル (厚 8mm)
FM13	繊維補強張付けモルタル (厚 13mm)
FM16	繊維補強張付けモルタル (厚 16mm)
FM21	繊維補強張付けモルタル (厚 21mm)
T	タイル仕上げ

試験によるひび割れが上部切り欠きより発生したことから、ひび割れ幅の評価は上 2 軸変位計のみで行うこととした。

図 9 に普通コンクリート (W/C=60%) の試験体について、上部に設置した 2 軸変位計による荷重-変位曲線を示す。コンクリートのみの試験体と比較して、張付けモルタルを施工した試験体、タイルを施工した試験体の最大強度が高い。これは、コンクリートにモルタルおよびタイルを施工したことで、せん断力に対する耐力が向上したためである。また、コンクリートのみの試験体は、せん断ひび割れ発生後にわずかな変位進展で試験体が破断しているが、モルタルやタイルを施工することで、破断に至るまでの変位が大きくなり、靱性が向上する。繊維補強張付けモルタルの使用は、繊維のブリッジング効果により、靱性が大きく向上し、コンクリート躯体のせん断ひび割れの進展抑制に効果がある。

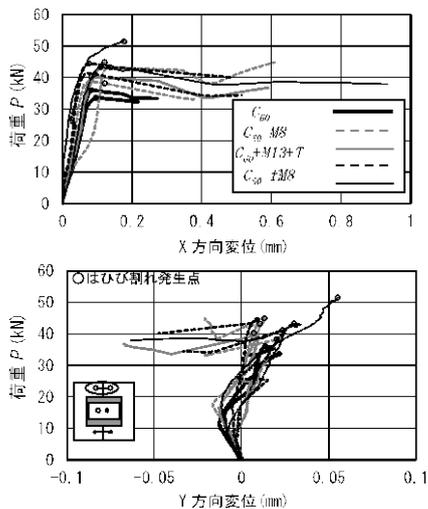


図 9 普通コンクリート試験体の荷重-変位曲線

低強度コンクリート (W/C=100%) の試験体について、モルタル施工のみを行ったものの荷重-変位曲線を図 10 に、タイル仕上げまで行った試験体の荷重-変位曲線を図 11 に示す。張付けモルタルのみよりもタイルを施工した試験体の最大強度が高くなる。また、モルタルの塗り厚が大きい方が最大強度が向上する。これは、躯体のコンクリート強度が低い場合、モルタルの強度が寄与する割合

が大きくなるためである。ひび割れ発生後の挙動も、モルタルのみよりもタイルを施工した方の靱性が向上する。

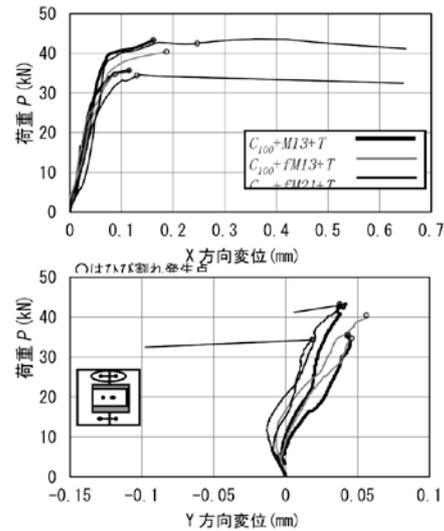


図 10 タイル有り低強度コンクリート試験体の荷重-変位曲線

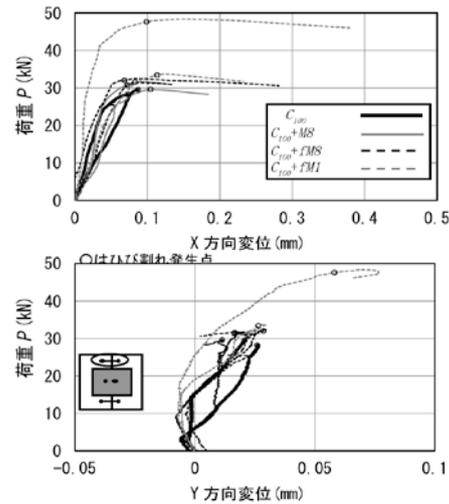


図 11 タイル無し低強度コンクリート試験体の荷重変位曲線

以上より、繊維補強張付けモルタルにタイル仕上げとすることで、コンクリート下地のせん断ひび割れ進展に対する靱性が向上することが明らかとなった。

#### (5) タイル仕上げ試験体のせん断ひび割れに関する解析的検討

コンクリートに張付けモルタルおよびタイルを施工した 3 次元モデルを作成し、FEM 非線形解析を行い、実験との相関性に関して検討を行った。

解析モデルは (2) の実験で用いた試験体と同様であり、材料特性を表 7 に示す。引張破壊時の構成則にはバイリニア形の引張軟化曲線を用いた。

表7 解析に用いた材料特性

材料	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	引張強度 $f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度1 $f_{t1}$ (N/mm <sup>2</sup> )	開口変位1 $w_1$ (mm)	限界開口変位 $w_{cr}$ (mm)	破壊エネルギー $G_f$ (N/mm)
コンクリート	17	0.2	1.5	0.5	0.05	0.24	0.1
モルタル	26	0.2	4.6	1.5	0.018	0.08	0.1
タイル	40	0.16	10	—	—	0.05	0.5

図12に解析によるひび割れ発生状況を示す。切欠き先端部から斜めにひび割れが発生した。コンクリートのみの仕上げ無しモデルでは奥行き方向に均等にひび割れが発生したが、タイルを施工した仕上げ有りモデルではタイル施工面からのひび割れ進展が阻止されている。これはモルタルおよびタイルの引張強度がコンクリートよりも高いためである。

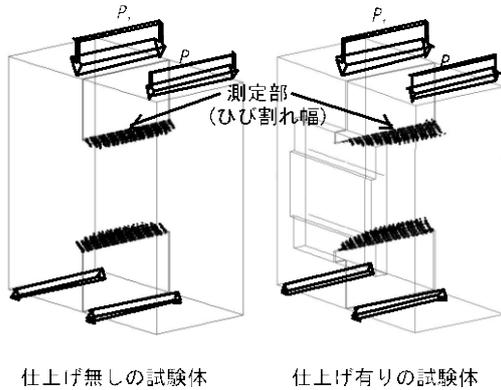


図12 解析結果

図13にFEM解析による荷重-開口変位曲線(X方向変位)と実験結果の比較を示す。解析結果の荷重-変位曲線は実験結果と近似しており、実験を再現できていると判断できる。

以上、コンクリートに張付けモルタルおよびタイルが施工された3次元モデルを作成し、FEM非線形解析を行い、実験結果との高い相関性が得られた。本解析手法を用いることで、設計時あるいは施工以前にコンクリート表面に各種仕上材料を施工した場合でのひび割れ進展抵抗性の評価が可能である。

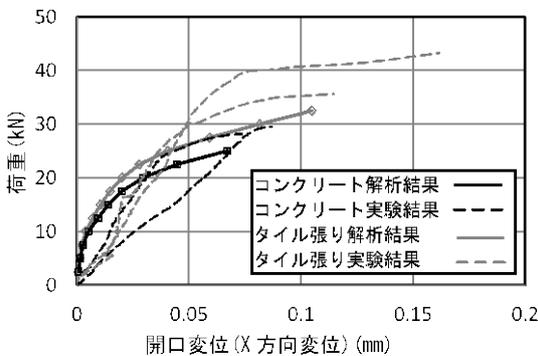


図13 解析結果および実験結果による荷重-開口変位曲線

## 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1件)

- ①石川直輝, 橋高義典, 松沢晃一, タイル仕上げによるコンクリートのせん断ひび割れ抑制効果に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 1, 2011. 7, pp. 1667-1672

[学会発表] (計4件)

- ①石川直輝, 橋高義典, 松沢晃一, 繊維補強モルタル下地タイル仕上げによるコンクリートのせん断ひび割れ進展抑制効果, 2011年度日本建築学会関東支部研究発表会, 2012. 3
- ②石川直輝, 橋高義典, 松沢晃一: 繊維補強モルタルによるタイル仕上げのせん断ひび割れ進展抑制効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集A-1, 2011. 8, pp. 535-534
- ③石川直輝, 橋高義典, 松沢晃一, タイル仕上げによるコンクリートのせん断ひび割れ抑制効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集A-1, 2010. 9, pp. 377-378
- ④福岡伸太郎, 橋高義典, コンクリートの混合モード破壊の評価方法に関する基礎的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集A-1, 2008. 9, pp. 1129-1130

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

橋高 義典 (YOSHINORI KITSUTAKA)  
 首都大学東京・都市環境科学研究科・教授  
 研究者番号: 20177877

### (2) 研究分担者

松沢 晃一 (KOICHI MATSUZAWA)  
 首都大学東京・都市環境科学研究科・助教  
 研究者番号: 20534051