

光ファイバセンサを用いた振動台実験における タイルの剥離検知および地震損傷モニタリングに関する研究 Study on Tile Peeling Detection and Seismic Damage Monitoring using Optical Fiber Sensors in Earthquake Shaking Table Experiment

○関根 麻里子^{*1}, 工藤 正智^{*1}, 早野 博幸^{*2}, 寺本 篤史^{*3}, 大久保 孝昭^{*4}, 楠 浩一^{*5}
Mariko Sekine^{*1}, Masatoshi Kudo^{*1}, Hiroyuki Hayano^{*2},
Atsushi Teramoto^{*3}, Taka-aki Ohkubo^{*4} and Koichi Kusunoki^{*5}

*1 太平洋セメント株式会社

TAIHEIYO CEMENT CORPORATION

*2 太平洋セメント株式会社 博士(工学)

TAIHEIYO CEMENT CORPORATION, Dr. Eng.

*3 広島大学 助教 博士(工学)

Assistant Prof., Dept. of Engineering, Hiroshima Univ., Dr. Eng.

*4 広島大学 教授 工博

Professor, Dept. of Engineering, Hiroshima Univ., Dr. Eng.

*5 東京大学地震研究所 教授 博士(工学)

Professor, Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, Dr. Eng.

キーワード：振動台実験；光ファイバセンサ；タイル；剥離；モニタリング

Keywords: earthquake shaking table experiment; optical fiber sensor; tile; peeling; monitoring.

1. はじめに

地震による大規模災害後は、官公庁舎、病院、避難所などの災害対策拠点となる重要建物において災害後速やかに構造安全性や継続使用の可否を判定する必要がある。また、仕上材がある建築物で目視によるひび割れを確認できない場合、損傷程度を評価するのは困難である。内部のひずみを計測する方法として埋め込み型ひずみ計が挙げられるが、それ自体が異物となり内部のひずみ分布に影響を及ぼす懸念がある。

一方、建物の継続使用の観点から、構造物だけでなく非構造物についての判定も重要である。特に外装タイルは地震などの災害による剥離や剥落の問題が多く、通行人へ二次被害を及ぼす可能性がある。現状、外装タイルの剥離検知方法は打音検査が一般的であるが、多くの手間や時間がかかる上、人により判定に差異が生じるという課題があり、即時判定の手法としては適していない。

そこで本研究では、タイルと下地コンクリートの間のひずみ差(ディファレンシャルムーブメント)に着目し、タイルの接着性能に影響を及ぼさないよう極めて細径の光ファイバセンサを用いて剥離検知モニタリングを行なった。

また、主要構造部材内にも光ファイバを使用することで異物感なくコンクリート内部のひずみを取得し、損傷

モニタリングへの適用検討を行った。

2. 実験概要

2.1. 試験体概要

試験体は図1に示すように実大3階建てRC構造物であり、一部をモルタルまたは弾性接着剤を用いてタイル張りとしている。図中の1・3F①～⑥、2F①～④に、タイル剥離検知用の光ファイバを下地およびタイル表面に貼り付けた。また、図1の1・3F①～④のコンクリート

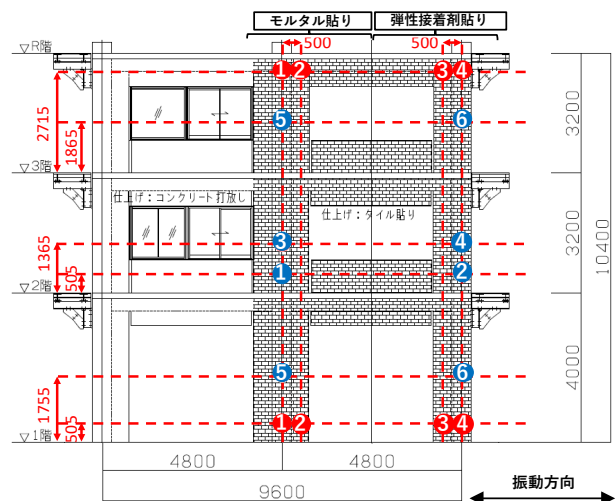


図1 実大RC構造物試験体概要

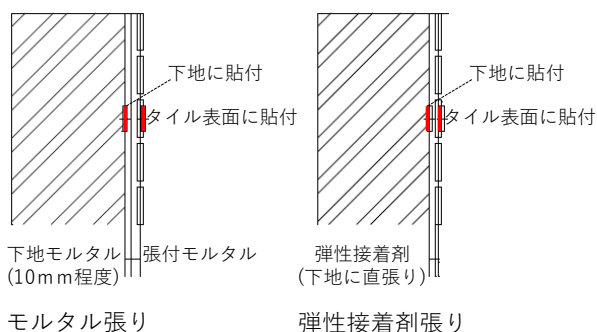


図2 光ファイバセンサ貼付け位置

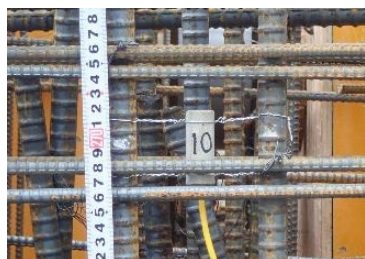


写真1 設置状況

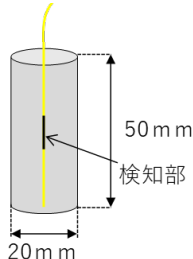


図3 センサ概要

内部に光ファイバモルタルセンサ(以下モルタルセンサ)を設置した。設置状況を写真1に示す。また、タイル貼付面の反対側の架構の柱および袖壁の鉄筋にひずみゲージを設置した。

2.2. センサ概要

タイル剥離検知には直径 0.15mm のポリイミド被覆のFBG型光ファイバセンサを用いた。図2に示すように躯体コンクリート表面に設置した光ファイバセンサ検知部の直上にもう一つの光ファイバセンサ検知部が位置するように貼付けた。

主要部材内のコンクリートひずみのモニタリングには、モルタルセンサを用いた。モルタルセンサは図3に示すように外径 150 μ m の光ファイバセンサの長さ 1cm 程度の検知部(FGB部)を中心に、 ϕ 20mm \times h50mm の円柱状にモルタルを被覆したセンサである。モルタル被覆することで、コンクリート打設時の衝撃による光ファイバセンサの損傷を防ぎ、さらにセメント系材料で剛性も躯体と近いので、ひび割れ性状や測定系に与える影響は小さい。ひずみの計測は 100 Hzで行った。

2.3. 加振方法

2.1で示したRC構造物試験体に対し、実大三次元振動破壊実験施設(E-ディフェンス)において加振を行った。

人工地震波は工学的基盤の告示スペクトルを基準に定め、位相には JMA 神戸波の NS 成分を用いた。地震波の大きさは一般建築物の設計レベルを 100%とした際の、20%、100%、150%(災害拠点建築物の設計目標レベル)、150%2nd(最大余震レベル)、160%である。振動方向は図1内に示すようにタイル面に対し水平方向である。人工地震波 100%、150%、160%入力後、目視によるひび割れ調査およびタイルの打診検査を行った。

3. 試験結果

3.1. タイル剥離検知

表1に光ファイバセンサを設置したタイルの打診検査結果を示す。人工地震波 160%の入力までに、光ファイバセンサを設置したタイルのうち半数近くに剥離が生じた。既往の研究¹⁾では、光ファイバセンサを用いた試験体の静的載荷実験において、タイル剥離が生じることにより躯体とタイル間でひずみ差が生じることを確認している。光ファイバセンサによる健全なタイル(2F①部)と剥離が発生したタイル(1F①部)のひずみの測定例として図4、5に示す。本加振実験は3日間にわたり実施しており、加振時以外のひずみの測定を行っていない。その

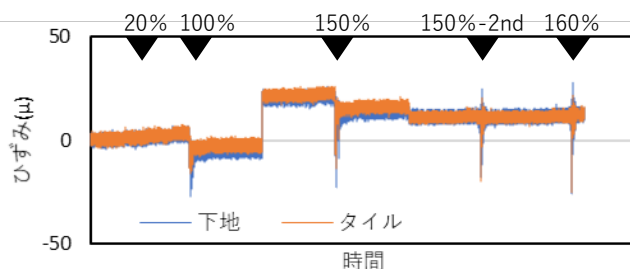


図4 健全なタイルのひずみ履歴

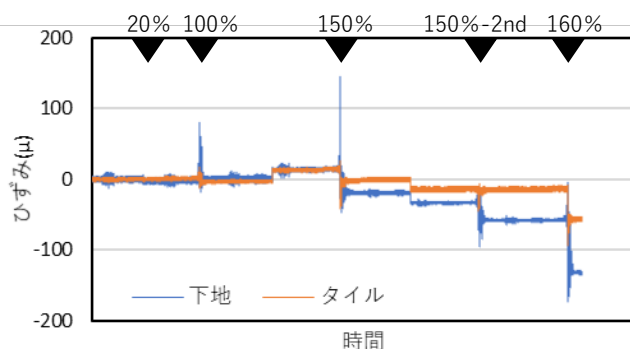


図5 剥離が生じたタイルのひずみ履歴

表1 打診検査結果

地震波	位置	1F						2F				3F						
		①	②	③	④	⑤	⑥	①	②	③	④	①	②	③	④	⑤	⑥	
20・100%																		
150%		×	×		△		△							×	△			
150・160%		×	×	×	×		△			△	×	△	×	×	△			

×：センサ設置タイルが剥離 △：隣接タイルが剥離

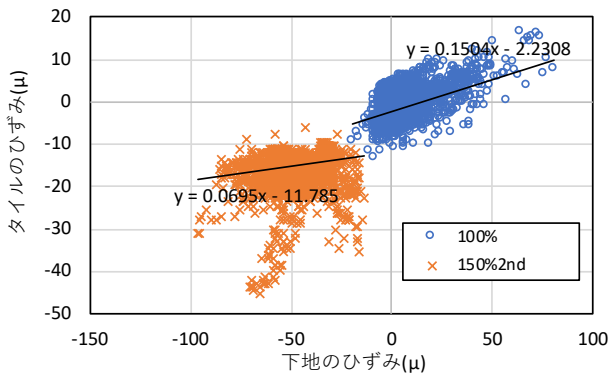


図6 タイルと下地のひずみの関係

ため、人工地震波 100%と 150%の間に不連続なひずみが生じているが、測定時の温度差に起因するものと考えられる。図4 では入力地震波に関係なく、下地コンクリートとタイルのひずみは同程度のひずみ履歴を示し、タイルの接着が健全であることがわかる。一方、図5 では人工地震波 150%入力時に下地コンクリートのひずみが約 150 μ に達した直後から、下地コンクリートとタイルの間でひずみ差が生じ、その後地震波が入力される毎にその差は広がった。打診検査では 1F①部のタイルにおいて 150%人工地震波入力後にタイルの剥離が確認された。下地コンクリートとタイルのひずみ差が発生した瞬間にタイルの剥離が生じたと考えられる。1F⑥部のタイルにおいては 150%入力後、隣接タイルは剥離したが当該タイルは健全であることが確認された。このことから下地コンクリートとタイルのひずみ履歴からタイルの剥離検知が行える可能性が示された。

図6 に1F①部における剥離前の100%入力時および剥離後の 150%2nd 入力時のタイルと下地コンクリートのひずみの関係を示す。図の近似線の傾きは、剥離前は0.15、剥離後は0.07であり、剥離が生じた後は下地コンクリートのひずみに対するタイルのひずみ追従性が低下していることが確認された。光ファイバセンサによる下地コンクリートとタイルのひずみをモニタリングすることにより、タイルの剥離程度も推察できる可能性がある。

3.2. 構造物損傷モニタリング

コンクリート内部に設置したモルタルセンサによって取得したひずみの一例として、図7に1F④部の人工地震波 20%入力時のひずみ挙動、図8に1F④部の人工地震波 160%入力時のひずみ挙動を示す。図7においてコンクリートは弾性域にあり、振動後も残留ひずみが見られず、損傷がないことがわかる。人工地震波 100%振動後の目視による損傷調査において 1F④部周辺にひび割れは確認されなかった。一方、図8に示す人工地震波 160%の場合は振動によって生じた最大ひずみは 9000 μ 程度、残留ひずみは 2000 μ 程度と甚大な損傷が生じた。この振動後 1F④部付近の複数のひび割れのうち最大ひ

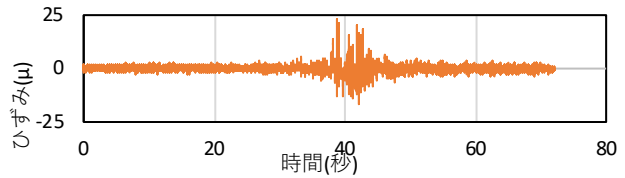


図7 1F④部のひずみ挙動(人工地震波 20%)

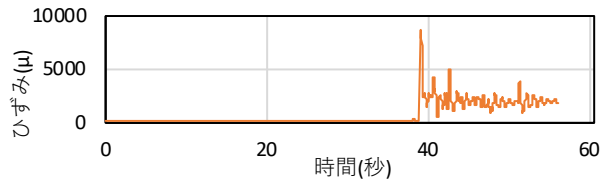


図8 1F④部のひずみ挙動(人工地震波 160%)

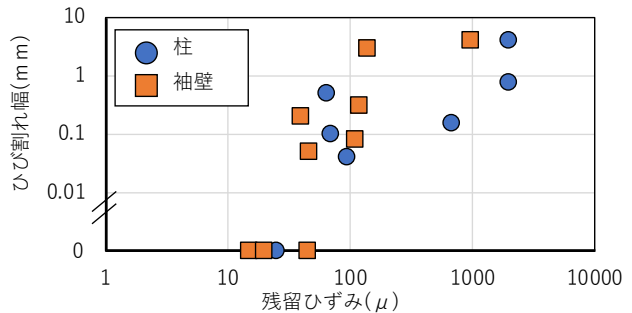


図9 残留ひずみと測定部付近のコンクリートのひび割れ幅の関係

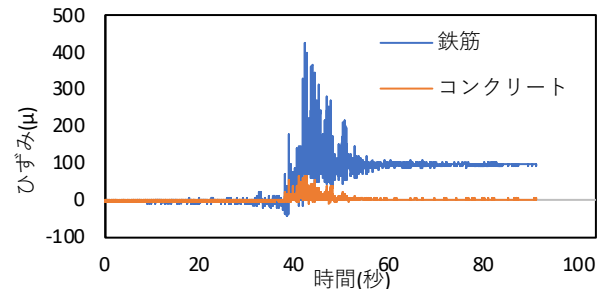


図10 1F⑤100%入力時のひずみ挙動

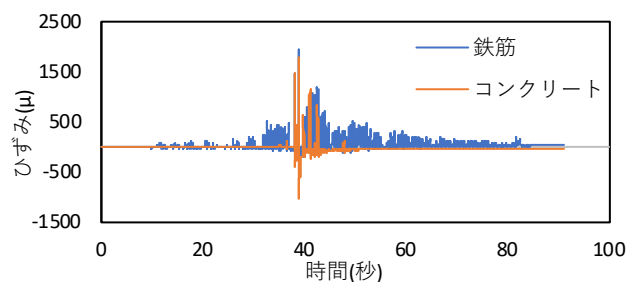


図11 1F⑤150%2nd 入力時のひずみ挙動

び割れ幅は 4 mmであった。このように表面にひび割れが生じる損傷では、内部に残留ひずみが発生しており、仕上材などでひび割れ幅を測定できない際に、残留ひずみを損傷度の指標にできる可能性がある。残留ひずみが生じた場合について、残留ひずみと測定部付近のコンクリートのひび割れ幅の関係を図9にまとめた。明確な関係は見られないが、残留ひずみが大きくなるほどひび割れ

幅が増大する傾向が認められる。また、柱・袖壁の部材による差異も確認されなかった。RC部材の損傷度(I～IV)はひび割れ幅で評価²⁾されており、コンクリート内に埋設したモルタルセンサで取得した残留ひずみによって損傷度を概ね推定できる可能性を示している。

続いて、1F①のコンクリートと鉄筋のひずみに着目すると、人工地震波 100%までは鉄筋が引張応力を負担しており、コンクリートには残留ひずみが生じていない。人工地震波 150%以降ではコンクリートに圧縮側のひずみが生じ、図11に示す人工地震波 150%2ndの入力では、最大で 1000 μ 程度の圧縮ひずみが取得された。なお、コンクリートに圧縮ひずみが発生した全ての入力地震波において、鉄筋に圧縮ひずみは生じておらず、コンクリートが圧縮応力を負担していたことがわかる。振動後の目視調査によって中央の柱に隣接する袖壁が基礎との接合部付近で圧壊しており、中央の柱においても柱脚部に大きなひび割れが多数生じていることが確認された。この袖壁は1F②の位置にモルタルセンサを設置しており、こちらでも入力地震波 100%以降、300 μ 以上の圧縮ひずみが生じている事が確認された。このことから、主要部材にモルタルセンサを設置することで、コンクリートに生じた圧縮ひずみの履歴から部材の圧壊などの甚大な損傷を推測できる可能性が示された。

図12に層間変位最大時の人工地震波 20%、100%、150%の1Fと3Fにおける、隣り合う柱・袖壁のひずみの関係を示す。また、図12の①～④は図1の①～④に一致し、1F・3Fそれぞれのセンサ設置位置を示す。①は中央の柱、②は中央の柱に接する袖壁、③は端部の柱に接する袖壁、④は端部の柱である。隣り合う①②、③④の部材のひずみの大小関係(傾きの正負)に着目すると、人工地震波 20%入力時の①②、および③④の傾きの正負が1Fと3Fで逆転している。これはモルタルセンサの設置位置が1Fは柱脚と3Fは柱頭であり、人工地震波 20%では各部位のひずみも小さいため、まだ塑性変形が生じておらず、水平力を受けた柱頭と柱脚の圧縮と引張の向きが逆になるためである。人工地震波 100%入力時には③④が、150%の入力時には①②と③④両方の傾きの正負が1Fと3Fで一致した。3Fの①②、③④の傾きの正負は入力地震波に関わらずほぼ同じであり、塑性変形が1Fに偏っていたものと考えられる。また、人工地震波が大きくなるに従って傾きの値が大きくなっており、フレームの変形が増大していることがわかる。

4. まとめ

光ファイバセンサを用いた外装タイルの剥離の即時検知および主要部材の損傷モニタリングに関して、E-ディフェンスにおいて振動台実験を行った。その結果、下記の見解を得た。

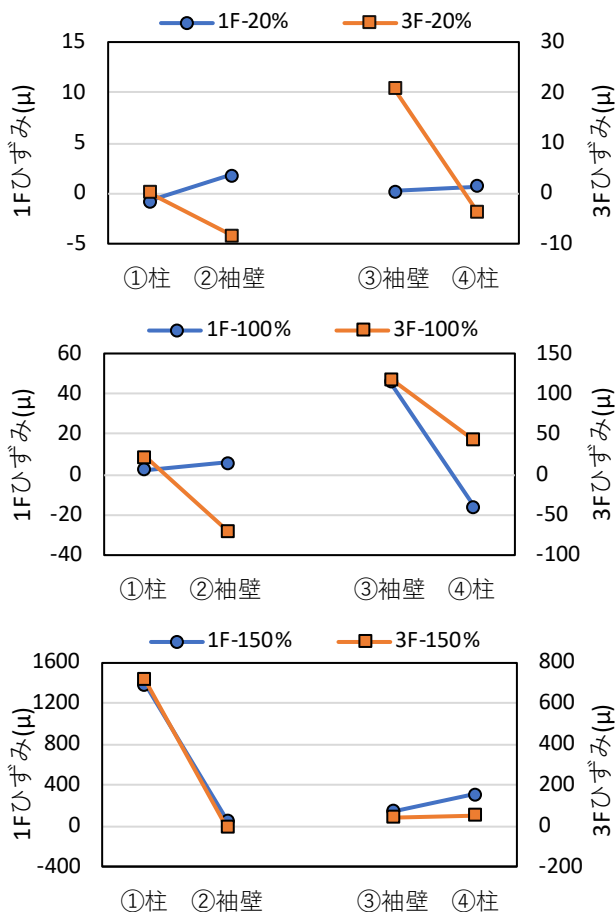


図12 層間変位最大時における部材間のひずみの関係

- 1) 下地コンクリートとタイルのひずみ挙動よりタイルの剥離検知モニタリングが可能であり、下地コンクリートのひずみに対するタイルのひずみ追従性からタイルの剥離程度も評価できる。
- 2) コンクリート内に埋設した光ファイバモルタルセンサの残留ひずみから、コンクリート部材の損傷度を推定でき、圧縮ひずみの履歴から部材の圧壊などの甚大な損傷を推測できる可能性を示した。
- 3) 複数の部材間のコンクリートひずみの傾きやひずみの値から、フレームの変形程度を評価できる可能性がある。

謝辞：

本研究は、「首都圏を中心としたレジリエンス総合力向上プロジェクト サブ(c)非構造部材を含む構造物の崩壊余裕度に関するデータ収集・整備」の一部であり、関係各位にご協力戴いた。付記して感謝します。

【参考文献】

- 1) 関根麻里子ほか：光ファイバセンサを用いたタイルの剥離検知に関する研究, 第73回セメント技術大会講演要旨, pp. 254-255 (2019)
- 2) 西川孝夫ほか：鉄筋コンクリート構造物の耐震性能評価指針(案)・同解説, 日本建築学会(2004)