

## 超高層ビル外壁パネルの地震時層間変位による耐火被覆材損傷量の評価

DB17034 井戸川 知生

### 1. はじめに

2011 年に発生した東日本大震災により、東北地方を中心に甚大な被害を及ぼした。しかし、地震の影響は、東北地方だけでなく、都心の東京でも地震の影響を受け、その事例として、構造部材、非構造部材の耐火被覆も含まれる。

現在、地震力に対する安全性は、極めて稀な地震動に対して、建物の高さの 1/100 以下の層間変位角、部材高さの 1/200 以下の許容変形により、部材内コンクリート単身の変形が 1/300 程度でひび割れが生じないように設計する基本的な考え方があり、都心部の建築は超高層の建物が多く、PCaCW が多く適用されている。PCaCW は、ファスナー(接合金具)でパネル上下端部を固定し、わずかな面内変形を許容し、境界面はシーリングで留っている。都心建物 A は、東日本大震災により最大 70 cm 程度の最大水平変形が生じ、その影響で、鉄骨部やファスナー部の耐火被覆にひび割れ、剥離が発生している。その原因は、PCaCW とそれを留めるファスナー(接合金具)にあり、地震が発生すると PCaCW は地震の揺れに合わせて面内にずり変形をする。耐火被覆の中に埋まっているファスナーが同様に動いたため、耐火被覆に力がかかり、ひび割れや剥離が発生した可能性がある。

本研究では、地震による PCaCW のずり変位による耐火被覆の損傷状況の把握、作用力による同変形量の想定を検討する。

### 2. 研究概要

表 1 には研究内容を、表 2 には使用材料を、図 1 には、石膏の化学反応式を、表 3 には実験要因と水準を記す。耐火被覆について、文献調査と現地調査の両方を行った。また、現地調査は、超高層ビル(施設 A)と鉄骨工場施設(施設 B)の建物の種類が異なる 2 つの建物を調査し、物性の違いや性能、耐火被覆の種類について調査を行った。力学特性調査では、曲げ試験、圧縮試験、せん断試験の 3 つの試験を行い、耐火被覆の地震時作用力による荷重と変形量の関係を検討する。

表 1 研究段階と内容

| 項目   | 研究内容                         |
|------|------------------------------|
| 研究 1 | 超高層耐火被覆について文献調査(工法・主原料)      |
| 研究 2 | 現地調査(超高層(施設 A)と低層 S 造(施設 B)) |
| 研究 3 | 各種耐火被覆材試験体の調合調査              |
| 研究 4 | 各種耐火被覆材試験体の曲げ変形特性評価          |
|      | 各種耐火被覆材試験体の圧縮変形特性評価          |
|      | 各種耐火被覆材試験体のせん断変形特性評価         |

表 2 耐火被覆材の使用材料

| 項目   | 工法       | 材料                                            | 量     |        |
|------|----------|-----------------------------------------------|-------|--------|
|      |          |                                               | 重量(g) | 重量比(%) |
| 研究 3 | 乾式・半乾式工法 | ロックウール                                        | 60g   | 20%    |
|      |          | 普通ポルトランドセメント                                  | 40g   | 13%    |
|      |          | 水                                             | 200g  | 67%    |
|      |          |                                               | 240g  | 70.6%  |
|      | 吹付石膏     | ロックウール                                        | 10g   | 2.7%   |
|      |          | 普通ポルトランドセメント                                  | 20g   | 5.5%   |
|      |          | 半水石膏 (CaSO <sub>4</sub> ・1/2H <sub>2</sub> O) | 220g  | 61%    |
|      |          | 水(小)                                          | 110g  | 30.5%  |
|      |          | 水(中)                                          | 130g  | 34.2%  |
|      |          | 水(大)                                          | 150g  | 37.5%  |

| 成分  | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO | CaO   | MnO |
|-----|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----|-------|-----|
| 含有量 | 35~45            | 10~20                          | 0~3                            | 4~8 | 30~40 | 0~1 |

備考) ロックウールの成分は上記の表である。

普通ポルトランドセメント密度=3.16g/cm<sup>3</sup>

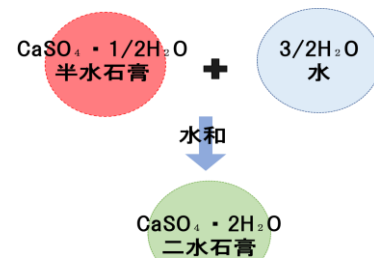


図 1 耐火被覆材に使用される石膏の水和反応

表 3 実験要因と水準

| 項目   | 要因      | 水準                        |
|------|---------|---------------------------|
| 研究 1 | 文献調査    | 吹付工法(乾式・半乾式工法)の耐火被覆に関する調査 |
| 研究 2 | 現地調査    | 耐火被覆の厚さ(mm)               |
|      |         | 耐火被覆破断面のひび割れ幅(mm)         |
|      |         | 貫入力(N)試験                  |
|      |         | 耐火被覆の種類                   |
| 研究 3 | 調合調査    | 施設 A と施設 B の耐火被覆の調合に関する調査 |
| 研究 4 | 曲げ変形特性  | 最大荷重(KN)、変形量(mm)          |
|      | 圧縮特性    | 最大荷重(KN)                  |
|      | せん断変形特性 | 最大荷重(KN)、変形量(mm)          |

### 3. 耐火被覆材に関する文献調査(研究1)

#### 3.1 耐火被覆材の種類

耐火被覆の工法の種類は、打設工法、吹付工法、巻付け工法、成形板張り工法、組積工法、CFT 工法、合成工法、耐火塗料工法の全部で 9 種類ある。今回の現地調査で見た耐火被覆は鉄骨や壁に吹付けてあったため、吹付工法であることが分かった。

#### 3.2 吹付工法の耐火被覆材の主原料と耐火性能

吹付工法の中に、主な耐火被覆材料として 9 つの材料の種類がある。表 5 に文献等を踏まえた主要な吹付工法の種類を記す。吹付けロックウールには乾式工法、半乾式工法、湿式工法の 3 種類ある。

### 4. 耐火被覆材に関する現地調査(研究2)

#### 4.1 施設 A と施設 B の耐火被覆材の調査

施設 A の調査項目は、耐火被覆の厚さ、耐火被覆のひび割れの有無の確認、デジタルフォースゲージによる貫入力試験の 3 つの項目である。それぞれの項目を 13 階、21 階、28 階の 3 フloor 行った。写真 1 に施設 A と B の耐火被覆の写真、図 2 に施設 A のカーテンウォールとファスナーのイメージ図と貫入力試験のイメージ図を記す。施設 B の調査項目も施設 A と同様で、3 項目である。

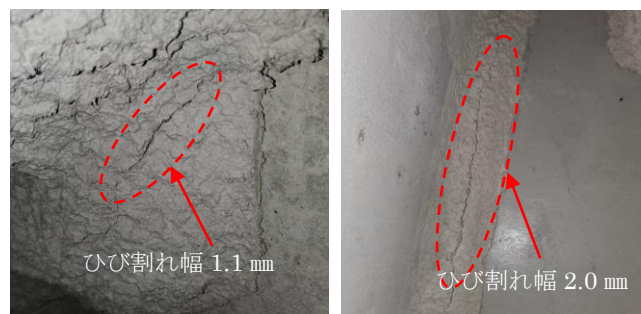
表 4 耐火被覆材と耐火性能

| 耐火被覆材料                   | 耐火被覆材の厚さ(mm) |       |       |           |       |       |
|--------------------------|--------------|-------|-------|-----------|-------|-------|
|                          | 梁(1～3 時間)    |       |       | 柱(1～3 時間) |       |       |
|                          | 1            | 2     | 3     | 1         | 2     | 3     |
| 吹付けロックウール                | 25           | 45    | 60    | 25        | 45    | 65    |
| 湿式吹付けロックウール              | 20-25        | 30-40 | 40-45 | 20-30     | 30-40 | 40-50 |
| 吹付けせっこう                  | 20-25        | 35-45 | 50-65 | 20-25     | 35-45 | 50-65 |
| 水酸化アルミニウム混入<br>湿式吹付けモルタル | 10-30        | 20-40 | 30-55 | 20-30     | 30-40 | 40-55 |
| せっこう混入吹付け<br>ロックウール      | 12-15        | 23-28 | 35-40 | 10        | 23    | 35    |



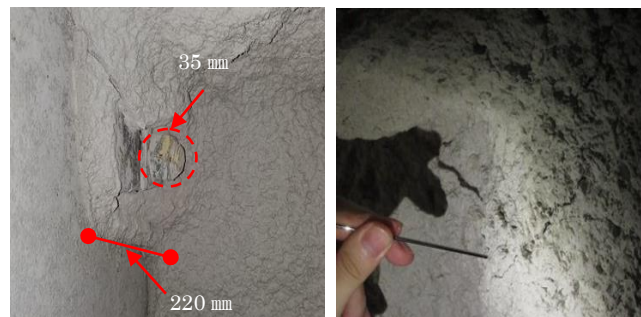
a) 施設 A の耐火被覆状態

b) 施設 B の耐火被覆状態



c) ファスナー周辺のひび割れ

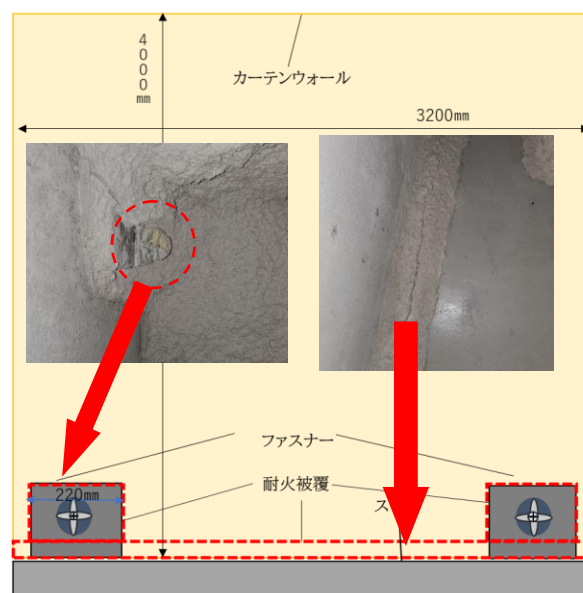
d) 床スラブ周辺のひび割れ



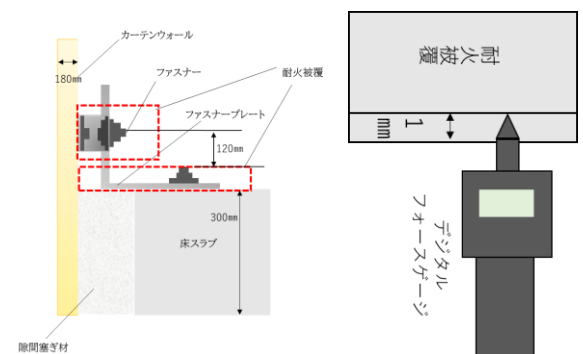
e) ファスナー被膜の剥離

f) 針刺し試験

写真 1 施設 A の PCaCW 内部ファスナーの耐火被覆状態



a) PCaCW の概形図(正面)



b) ファスナー部概形図(断面)

c) 貫入力試験のイメージ図

図 2 施設 A の PCaCW 概形と評価対象

## 4.2 各種耐火被覆材の種類

表5には各種建物の耐火被覆の厚さと貫入力、ひび割れ幅の有無、耐火被覆の種類を、図3には貫入力、図4には耐火被覆の厚さのヒストグラムを記す。

各種建物の耐火被覆の厚さの平均と表5の種類にある耐火被覆を比べると、施設Aの耐火被覆は石膏が主原料であり、平均貫入力から50N程度、耐火被覆厚さ42mm程度とBより双方ともに3倍程度大きく、吹付せっこうであると考えられる。施設Bは厚さこそは足りなかったが、見た目から吹付ロックウールであることが確認された。

## 5. 各種の耐火被覆材の調査調査(研究3)

### 5.1 各種の耐火被覆材の調査方法

施設Aの吹付せっこうは、文献調査をして、明確には分からないため、実測値より確定することにした。

施設Bの吹付ロックウールには、乾式と半乾式工法があり、乾式工法は、ロックウールとセメントを工場であらかじめ配合し、現場で圧送・噴霧させた清水で材料を包み湿潤させながら吹き付ける工法であり、重量比が(ロックウール:セメント)=(3:2)で、水量は乾式工法で材料の質量比で0.75~1.0であることが分かった。

半乾式工法は、圧送機で施工箇所まで圧送し、吹付ノズル先端でセメントスラリーと同時に噴霧し梁や柱、壁等に吹き付ける工法で、重量比が(ロックウール:セメント)=(3:2)で、水量は、セメント5kgに対して10ℓ(水セメント比200%)であることが分かった。

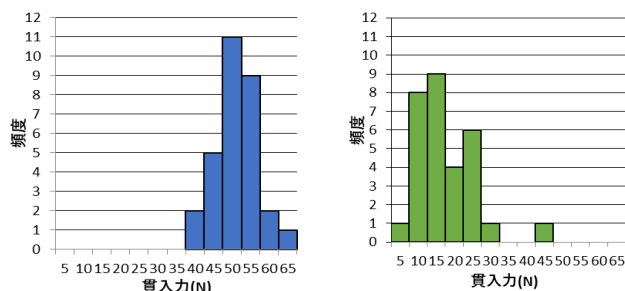
### 5.2 各種の耐火被覆材の手練り調査調査

吹付せっこうの調査は、せっこうの化学反応式から水量を算出した。半水石膏のモル質量は $\text{CaSO}_4$ で136、 $1/2\text{H}_2\text{O}$ で9なので145である。半水石膏は $3/2\text{H}_2\text{O}$ (27)のモル質量と水と反応を起こす。水和に必要な水量は半水石膏の1/5倍が適量だが、調査には他にもセメントやロックウールを混練するので、2.5/5倍(小)、3/5倍(中)、3.5/5倍(大)の3つの水量で調査を行った。

吹付ロックウールの調査は、手練りで文献通りの調査を行うと、水量が足りなかったため、混練の程度が実物に近くなる水量で調査を行った。表2には使用材料(各種耐火被覆の調査比・調査量)を、写真2には吹付せっこうの調査の流れを記す。

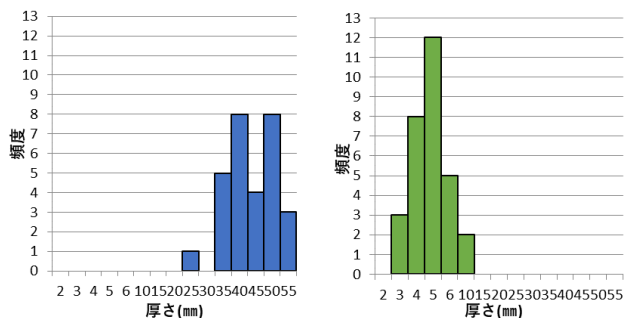
表5 現地調査による耐火被覆材の調査結果

| 項目       | 厚さ(mm) | 貫入力(N) | ひび割れ幅 | 種類       |
|----------|--------|--------|-------|----------|
| 施設A(13階) | 43mm   | 50.6N  | 0.5mm | 吹付石膏     |
| 施設A(21階) | 42mm   | 48.4N  | 1.1mm |          |
| 施設A(28階) | 32mm   | 43.5N  | 1.2mm |          |
| 施設B      | 4.4mm  | 14.9N  | 無し    | 吹付ロックウール |



a) 施設A(21階)ファスナー被覆材 b) 施設Bの耐火被覆材

図3 各種建物の耐火被覆材の貫入力の比較

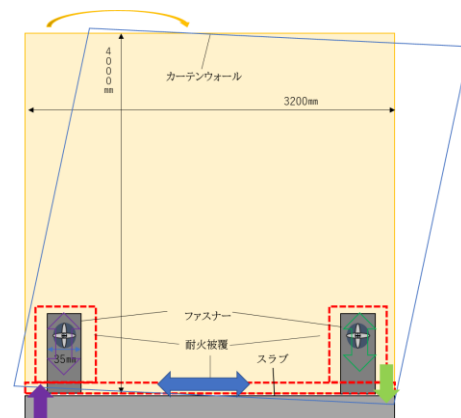


a) 施設A(21階)ファスナー被覆材 b) 施設Bの耐火被覆材

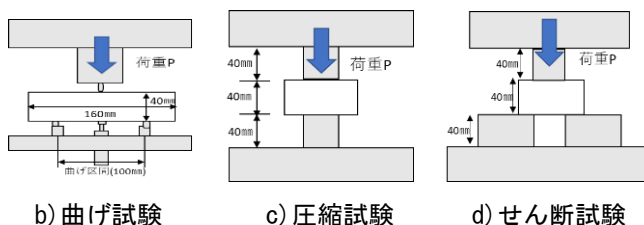
図4 各種建物の耐火被覆材の厚さの比較



a) 石膏 b) a+ロックウール c) b+水(二水石膏)  
写真2 吹付せっこうの調査・練り混ぜの様子



a) 地震時PCaCWスライド変形概念図



b) 曲げ試験 c) 圧縮試験 d) せん断試験  
図5 ファスナー・接合部耐火被覆材の想定変形試験図

## 6. 各種耐火被覆材試験体の力学特性調査(研究 4)

### 6.1 力学特性調査の目的

施設 A では、地震により図 5 の様なイメージで揺れて耐火被覆にひび割れが生じた。これらの作用する各種の力学試験を行い、評価データーを測定する。

### 6.2 各試験方法

曲げ試験は、3 点曲げ試験で行う。試験体は、40 mm×40 mm×160 mmの角柱試験体を使用する。せん断力試験の試験体は、3 点曲げ試験によって 2 つに割れた試験体の片方を使用する。圧縮試験もせん断試験同様に曲げ試験によって 2 つに割れた試験体の片方を試験し最大圧縮強度を測定する。

図 5 に各試験のイメージ図を、図 6 に試験結果をに記す。

### 6.3 力学特性調査の結果

2 つの荷重曲線を比較すると、施設 A の材は変形追随性は劣るが、地震時の変形時の剛性は確保されやすい。施設 B の材は最大荷重は小さいが、変形が続き延性破壊の性状を示す。

吹付石膏は水量の違いにかかわらず、曲げ、せん断どちらも荷重変形曲線に大きな違いはなかった。吹付石膏の曲げ試験において弾性変形が終わり塑性化し、荷重変形曲線が傾き始めるひび割れ幅を計測すると 0.06 mm 前後である。施設 A の材も同様の変形性状であったとすると、そこから 1.1 mm までのひび割れが進展した結果、1.04 mm は完全に断面が破断して、残留したひび割れ幅と考えられる。

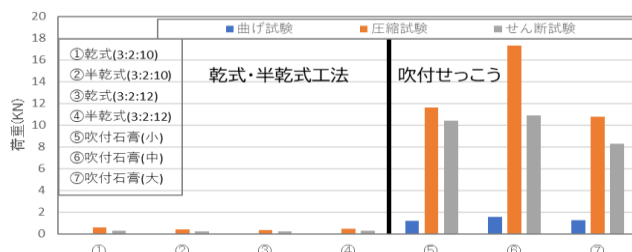
せん断試験は安全側で評価するために、最も破断が進行した吹付石膏(中)に着目し、後は曲げ試験同様にひび割れが進展した塑性域から残留ひび割れ幅を求めた所、残留ひび割れ幅は、1.0 mm 前後と考えられる。なお、PCaCW 概算高さ 4000 mm に対し、地震の作用力で実測された 1 mm 程度の残留ひずみ(1/4000)は、部材の許容ひずみ(1/200)が 20 mm 程度で、シーリング部材許容動作間隔 8~10 mm の 8 mm で評価すると、ひび割れが進展した最大許容ひずみに対する 13% 程度が残留した状態になっていると考えられる。

## 7. まとめ

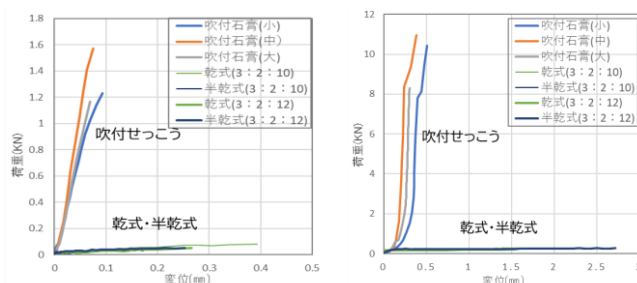
- 耐火被覆は低層では吹付けロックウールが主流で、高層では吹付石膏等の強度の高いものが主流であった。
- 低層は強度は低く変形冗長性があり、高層は強度が強く、脆性的である。
- 低層は耐火被覆が壊れにくい、高層は地震で耐火被覆が壊れやすい
- 曲げやせん断が生じてひび割れた部分に 1 mm 程度の開口ひび割れが貫通している可能性があり、耐火シール処理が必要になる可能性がある。

### 参考文献

- 日本建築学会：鉄骨工事技術指針・工事現場施工編
- 一般社団法人 公共建築協会：国土交通省大臣官房官庁営繕部監修 建築工事監理指針平成 28 年版(上・下巻)

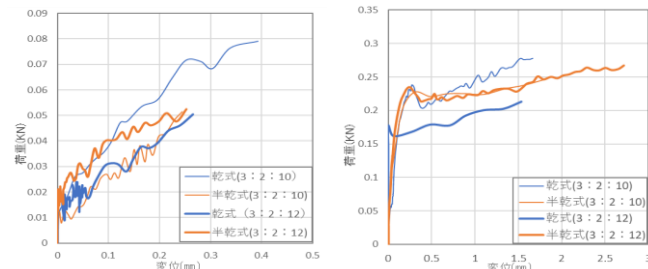


a) 各種耐火被覆材試験体の各種試験の最大荷重



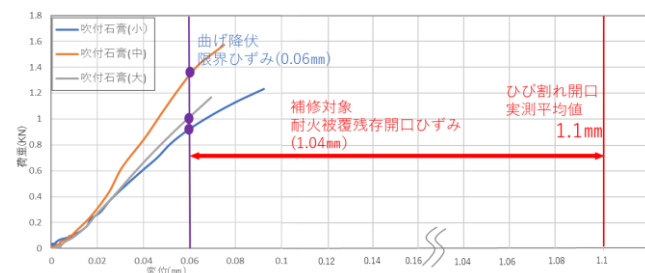
b) 各種試験体の曲げ比較

c) 各種試験体のせん断力比較

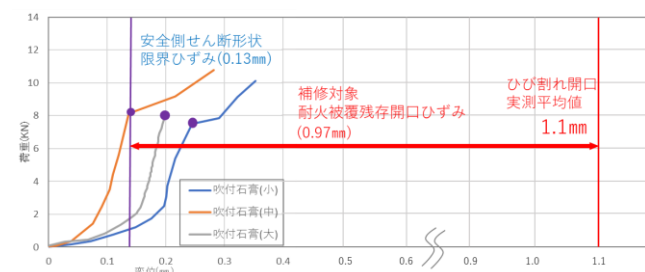


d) 乾式・半乾式の曲げ試験

e) 乾式・半乾式のせん断試験



f) 吹付せっこうの曲げ特性



g) 吹付せっこうのせん断特性

図 6 各種耐火被覆材試験体の被覆部開口ひび割れ幅の推定

### 謝辞

本研究の施設調査にご協力いただいた本学の施設部、資料提供にご協力いただいたエーアンドエーマテリアルの林樹里氏に謝意を表する。