

超高層ビルの構造・非構造部材における要素材料の長期耐用性に関する研究 ～外壁タイルの浮き状況調査と剥落時損害リスクの算定～

尾林 岳*, 田村雅紀**, 岡健太郎***

1. はじめに

現在、日本国内の建物の多くで外装材として、タイルが選ばれている。これはタイルが美観、耐候性に優れており、分類として吸水率の低いⅠ類（磁器質系タイル）や、焼き締めを十分に行ったⅡ類（せっ器質系タイル）などがあるからである。だが外装タイルは、一般的なセメント系タイル貼付材を使用した場合、長期的なひずみや熱の影響で、構造体とタイルとの変位が生じ、浮き・剥離・剥落の危険性が生じる。本研究では、非破壊式の衝撃弾性波試験器を用いて、弾性波の減衰量を比較して、浮き等が生じている状況について調査をした上で、実際に付着試験器を用いてタイルを剥がし、その相関を確認するとともに、その原因を検討する。また、現在建物の外壁タイル補修工事などが行われてはいるものの、補修工事後の様な頻度で補修工事を行っていくのか、どのくらいの補修工事費を投入すれば、浮きタイルをなくすことが出来るかという情報が、テナントとの都合などにより明確にされてこなかった。そこで、実際の補修工事が行われた工学院大学新宿校舎にて、衝撃弾性波法による機械インピーダンス（HLD 値）を工事前後で計測し、HLD 値の向上したタイル数と工事費用から、今後の補修工事の必要回数と工事費用の算出を行い、どのくらいのリスクがあるのかを調査する。図 1 で本研究の流れを示す。

2. 浮きタイルの衝撃弾性波法による機械インピーダンス（HLD 値）の計測（研究 2）

2.1 外壁浮きタイル確認の概要

2.1.1 外壁浮きタイルの診断方法

外壁診断は、視覚的に浮きやひび割れを確認する目視調査と打診棒による打診法で行う。打診法では打診棒を用いたタイルを叩いた時の、音の違い（高音の時は浮きがあり、浮きのない物は低音である。）によって浮き部分の診断を行う。確認肯定は、打診棒でタイル面全体の確認を行う。その後浮いたタイルの機械インピーダンス（HLD 値）を小型反発度試験機で計測する。タイル 1 枚につき小型反発度試験機による衝撃弾性波試験を 3 回行う。試験機が示す硬さ HLD 値は、インパクトボディーの反発速度 V を打撃速度 V_0 で割り、1000 倍した値である。得られた 3 つの値の平均値が 800～1000 であれば補修不要条件、600～800 の間であれば補修十分条件、400～600 の間を補修必要条件（未補修浮きタイル）とし 5 階、6 回で同様に試験を行った。

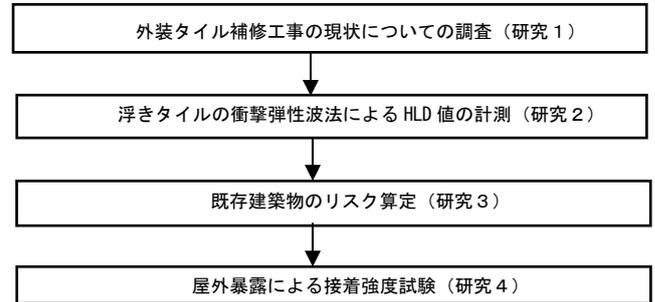


図 1 研究の流れ

表 1 タイル工事の現状の調査（研究 1）

調査先	内容
陶磁器タイル張り工事の現状と今後の動向 2014（2014年11月5日）	東北地方太平洋沖地震外壁タイル調査報告書の結果より、弾性接着剤による施工では被害はない。JIS A 5209 の改定などにより弾性接着剤の需要が高まる。
外装タイル補修工事ヒアリング調査（2015年3月12日）	補修箇所の確認は打音法のため個人間による差が生じる。機械的に確認ができる補修のムラが無い施工が可能。

表 2 使用材料（研究 4）

項目	寸法	備考
普通コンクリート平板	300×300×60(mm)	JIS A 5371-2010 適合
外装施ゆうタイル	45×45×7(mm)	JIS A 5209 適合
弾性接着剤(クリア)	—	JAIA 4VOC 適合
弾性接着剤(ホワイト)	—	JAIA 4VOC 適合
弾性接着剤(ブラック)	—	JAIA 4VOC 適合

表 3 実験概要及び要因と水準

		実験要因	水準
研究 1	調査 1	文献調査	構造系文献
	調査 2	実態調査	施工者、施工管理者
		要求区分	安全性、耐久性、経済性
調査 3	研究調査	日本建築学会シンポジウム	
	目視検査	ひび割れ、打診法	
衝撃弾性波法による HLD 値の計測	衝撃弾性波試験	反発度、充填具合、(HLD 値)	
	対象建築物	都内大学校舎 東京都新宿区西新宿 学校施設 1989年7月竣工 S造（一部SRC造、RC造） 地上 28 階地下 6 階	
既存建築物のリスク算定	算定方法	発生確率×影響度	
	発生確率	1年(c1)、3年(c2)、5年(c3)	
	発生時期	築 20 年から補修率 100%になるまで	
	影響度	補修工事費用、損害賠償金額	
接着強度試験	タイルの機械インピーダンス	タイルの機械インピーダンス	測定 3 回の平均
		気温	25℃～35℃
	接着剤性能	接着剤種類	弾性接着剤
		接着剤の色	クリア、ホワイト、ブラック
		養生時間	1 日、3 日、7 日
		接着剤の量	15 g、30 g、45 g
		暴露試験体	Tc、Tb、Tw
		空隙試験体	Kc、Kb、Kw
		接着面積	190×60(mm)

*大林組 **工学院大学建築学部建築学科・教授 ***大学院建築学専攻・修士 2 年

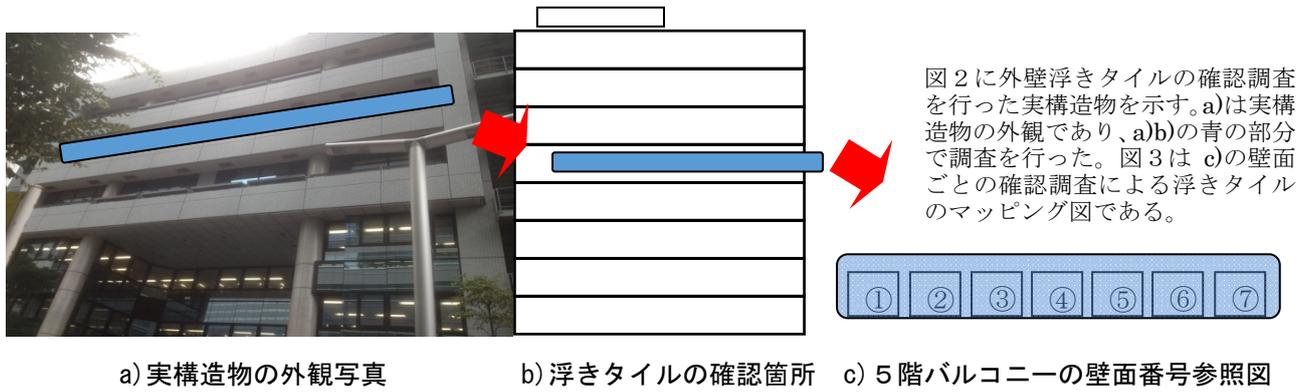


図 2 浮きタイル確認調査部分の概要図

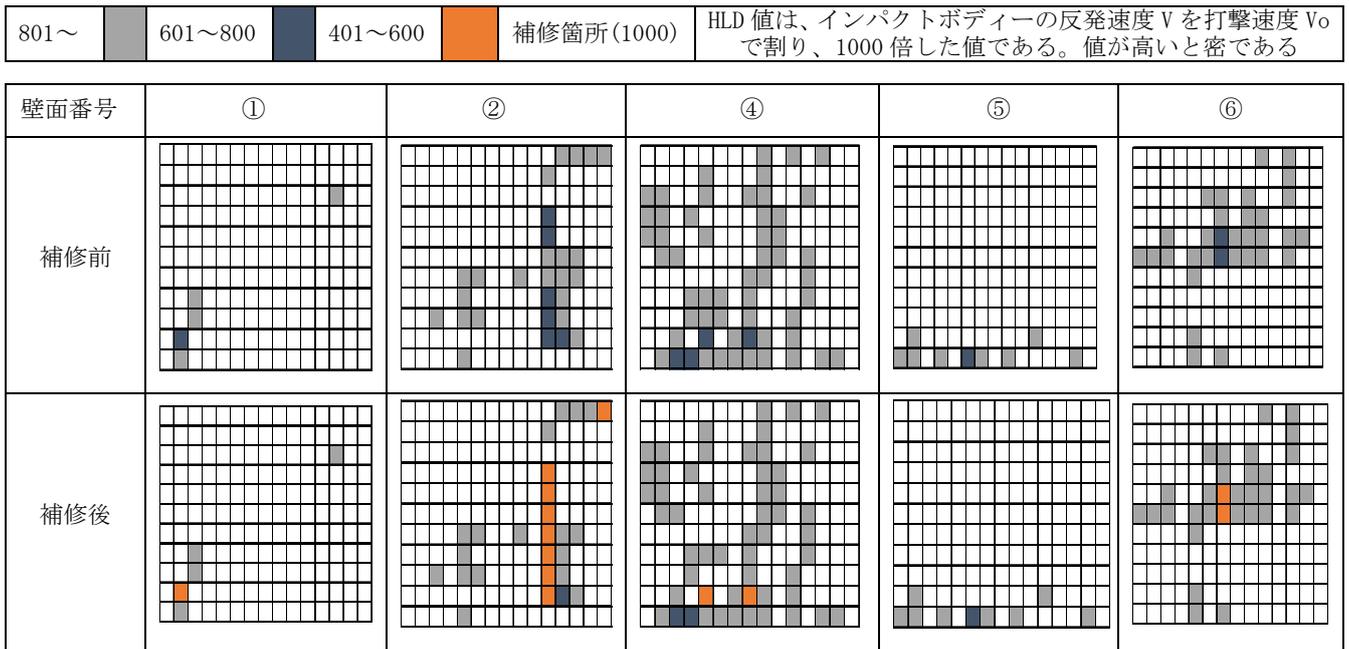


図 3 中層棟 5 階浮きタイルマッピング図

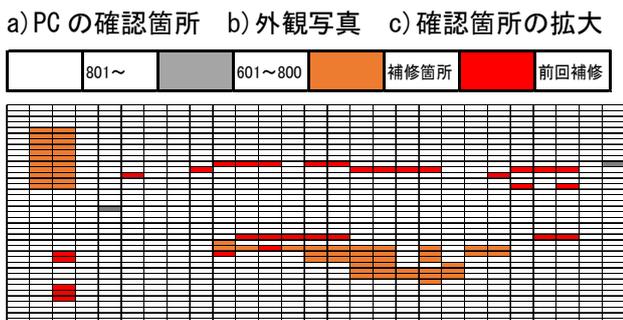


図 4 外壁 PC タイル HLD 値の計測

2.1.2 衝撃弾性波法による反発度試験

今回の打診法による検査により以下のことがわかった。外壁タイル現状記録図面の中層棟南面バルコニーで浮きが出ているタイルの枚数と、実際に打診法で調べたものとは 40%ほど浮きが出ているタイルが少なかった。また、浮きが出ていると断定する HLD 値の認識の相違や打診法による確認方法の個人間の違いがある。

2.2 既存建物の外壁補修工事

2.2.1 MG アンカーピン工法による補修工事

今回の都内大学校舎 5 階 6 階の浮きタイル補修工事の工法は MG アンカーピン工法である。MG アンカーピン工法とは、浮きタイル中央を特殊ドリルで穿孔し、エポキシ樹脂でアンカーピンとコンクリートを接着させタイルを固定する工法である。

2.2.2 機械インピーダンス (HLD 値) の計測

補修工事着工以前に HLD 値が 800 以下のタイルは 341 枚あ

り、その内MGアンカーピン工法で補修されたのが 57 枚である。今回の補修工事で、中層棟 5 階 6 階バルコニー全体の 16.7%が補修されたこと、また今回と同条件下であった場合、あと 5 回補修工事を行わなければ HLD 値 800 以上のタイルが 100%にならない事が分かった。今回、中層棟の補修工事の費用が 2448 万 3150 円であり補修枚数は全体で 7933 枚であった。このことから浮きタイル 1 枚を補修するのに約 3,086 円掛かる事が分かる。5 階 6 階の浮きタイルが残り 284 枚あるので、浮きタイルを無くすために、87 万 6424 円掛かる、全体に占める浮きタイルの割合は、補修工事前が約 17.4%、補修工事後が約 14.5%と約 2.9%減少した。また、HLD 値が、向上しなかったのは今回の MG アンカーピン工法が、エポキシ樹脂を充填させるのではなくアンカーピンでの固定であるからと考えられる。今後エポキシ樹脂充填工法を行い、エポキシ樹脂をどのくらい注入したか、HLD 値が樹脂を注入した後に、どのくらい向上したかを具体的な数字で求めていく。そこから充填率、付着率の評価を出来る様にする。そして補修工事を行う際に、今回と同様に MG アンカーピン工法で行う場合、樹脂を充填させて補修をする場合のどちらが経済的なリスクが少ないかを発生確率と影響度から導出し評価する。

3. 既存建築物による経済リスクの算定（研究 3）

3.1 経済リスク算定の概要

研究 2 で得られた補修工事費用と、今回の補修率より都内大学校舎の工事費リスクを算定する。リスク値は JIS A 8051-2004 に規定されており、算定方法は下記である。

$$R \text{ リスク値} = R \text{ (発生確率データ)} \times E \text{ (影響度)}$$

今回は発生確率を補修工事の頻度とし、1 年 (c1)、3 年 (c2)、5 年 (c3) ごとに行う。一方影響度は補修工事費と損害賠償金額とする。補修工事費は 2448 万 3150 円 (2500 万円) とし、損害賠償金額は工事頻度による劣化タイル剥落損害賠償金額とし、竣工後一定期間 (築 20 年) を過ぎたとき、5 年ごとにタイル剥落による損害賠償金額の 1 億円が掛かると仮定する。また浮きタイルの無くなる補修率 100% になるまで浮きタイルによる剥落は続くものとする。今回の補修工事によって補修されたタイルの補修率より、今回の補修工事 5 回で浮きタイルがなくなることが分かった。この条件で対象となる壁面のタイルが、完全補修となるまでに掛かる金額の違いを調査し、各工事の頻度によって変わるリスク値を算定、浮きタイルの算定方法は高層棟がゴンドラを使用しなければならないため、低層階の区画された壁面の全タイル枚数に対する浮きタイルの割合を参照とした。図 5 に各ケース (c1, c2, c3) の対象壁面が補修率 100% (工事終了) までの年数、補修率 100% になるまでに掛かる剥落による損害賠償金額を含めた費用の違いを示す。

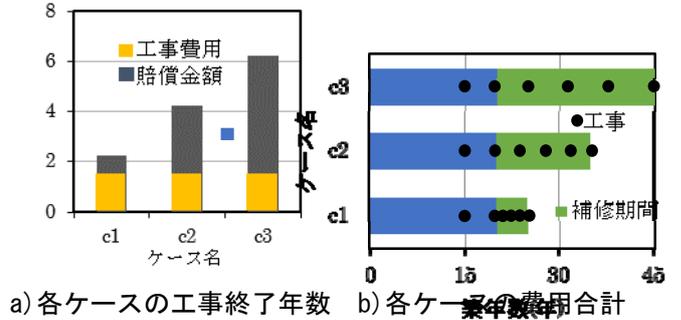


図 5 新宿校舎のリスク算定結果

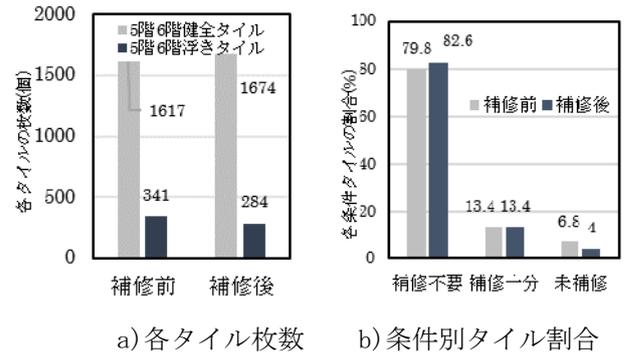


図 6 外壁タイルによる機械インピーダンスの計測

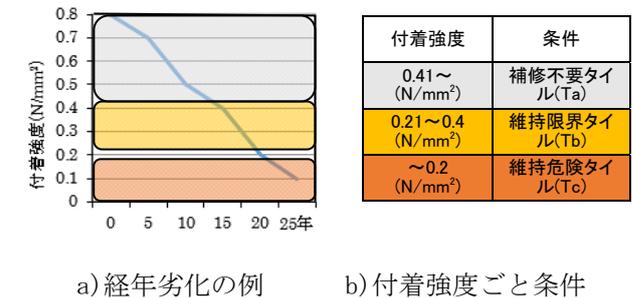


図 7 経年劣化と付着強度との関連図



a) パルハンマー b) 小型反発度試験機



e) 試験体 Tc f) 試験体 Tw g) 試験体 Tb

写真 3 接着材料と試験体の概要

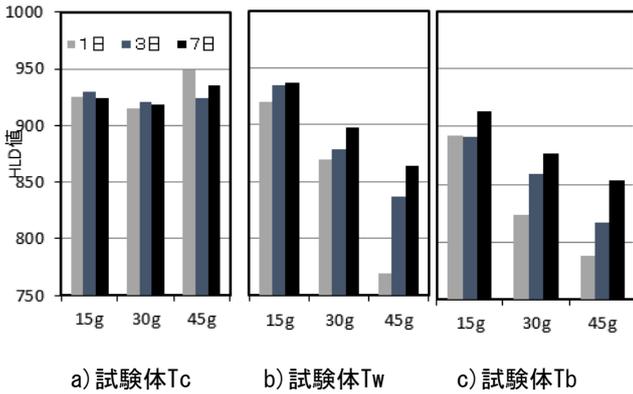


図 8 暴露試験体による機械インピーダンスの推移



写真 4 空隙試験体

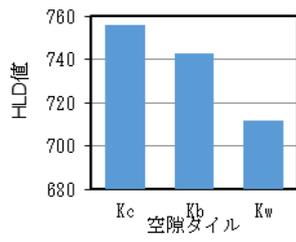


図 9 空隙試験体の HLD 値

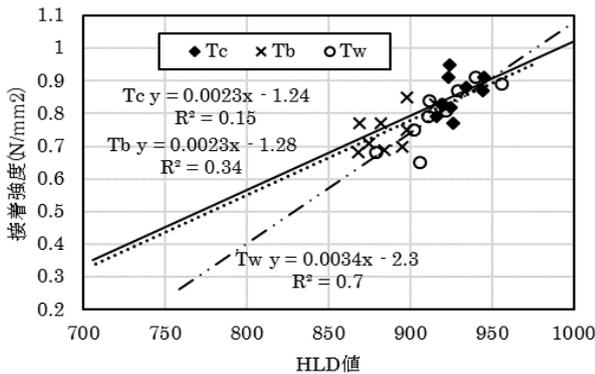


図 10 HLD 値と接着強度による接着強度推定式

4. 屋外暴露による接着強度試験（研究 4）

4.1 屋外暴露試験体の機械インピーダンスの変化

作成した屋外暴露試験体の 7 日間での機械インピーダンス（HLD 値）を写真 1 で示した小型反発度試験機で測っていく。その際タイル 1 枚につき 3 回の計測を行い、3 つの値の平均を参照データとする。また実験使用材料を表 2 に実験概要を表 3 に示す。7 日間の機械インピーダンスの計測では図 7 の試験結果を得ることができた。色による差としてクリアは 7 日間安定して 900～950 の値を取ったのに対して、ホワイトとブラックは値が安定しなかった。また、どちらも日が経つに連れて値が小さくなっていくのも確認でき、最終日にはクリア以外のすべてのタイルの値が 900 を下回ったことが確認できた。これらから推測できるのは、クリアには他の 2 者と違い顔料が含まれていない分、接着材料が他の 2 者より多く含まれていたことが挙げら

れ、それが要因となっていると推測できる。量による差はクリアに関してはほぼ一定といえるが、ホワイトとブラックについては量が増えると HLD 値が下がっていくことが予想される。

4.3 タイル試験体における空隙試験の概要

試験タイルとコンクリートの間にスポンジ(20×20×2mm)をはさみ浮きタイルを再現し、小型反発度試験機によって機械インピーダンス(HLD値)の変化を調べていき小型反発度試験機の浮きタイルに対する有用性を確認する。その際に使用した接着剤は、屋外暴露試験と同様のシリコン系の接着剤で色はクリア、ホワイト、ブラックの 3 種類である。結果を図 9 に示す。図 8 と比べるとスポンジを入れて浮かせた各タイルの HLD 値は下がっていることが分かる。また、HLD 値と引張り強度の計測により、下記の接着剤の色ごとの強度推定式が求められた。

透明(Tc) $y = 0.0023x - 1.24$ - (1)

白(Tw) $y = 0.0034x - 2.3$ - (2)

黒(Tb) $y = 0.0023x - 1.28$ - (3)

なお、 $x = \text{HLD 値}$ $y = \text{引張り強度 (N/mm}^2\text{)}$ とする。

5. まとめ

本研究では補修工事の現状についての確認が出来た。費用によって補修を十分に行うことが出来ず次回に持ち越すことがあり、施主側には保有リスクとして乗っている。また、浮きタイルの確認方法として今までの打音法による確認よりも、小型反発度試験機による機械インピーダンスの計測による確認に有用性があると予想出来る。そして弾性接着剤の中にも顔料などの影響による接着性能の違いがある事を確認することが出来た。

参考文献

- 1) JIS A 5209 セラミックタイル, 2013 年
- 2) JIS A 8051 リスクアセスメント, 2014 年
- 3) 一般社団法人タイル業協会 東北地方太平洋沖地震外壁タイル調査報告書-2014 年
- 4) コニシ株式会社 BOND BEST SYSTEM
- 5) 日経アーキテクチャ 落ちない外壁タイル -2014-7-25

謝辞

本研究の実施にあたり工学院大学新宿校舎施設課関係各位、工学院大学高層棟・中層等外壁タイル補修工事関係各位より多くの助力を賜り感謝致します