

超高層集合住宅対応外壁検査システム「スカイクライマー™」

土井 暁 井上文宏

Self-Climbing Outer Wall Inspection System for High-Rise Apartments

Satoru Doi

Fumihiro Inoue

Abstract

External wall inspection of the balcony surfaces of apartment buildings is difficult because of the need to guarantee the privacy and security of inhabitants. The inspector usually uses a temporary gondola and inspects from outside the balcony surface of the apartment. In this study, we developed an external wall inspecting system that can self-climb vertically on the balcony surface. This system grips the projections of the balcony surface to move up and down in parallel to the balcony surface. This system can examine all tiles of the external building wall and acquire images of the necessary points. In this paper, we outline this system and present the efficiency from of applying this system to an actual building.

概要

2008年、建築基準法の定期報告制度が改定され、共同住宅についても外壁周りの定期検査と報告が建物所有者に罰則規定付きで義務付けられた。超高層集合住宅の外壁検査では、各戸の住居が居住者の占有部になるため、検査員はバルコニー部分へ容易に立ち入れない。このため、地上からの目視または、屋上から仮設ゴンドラを吊るす高所作業による検査が一般的である。しかしながら、集合住宅の特性上、各戸のプライバシーとセキュリティを確保する必要が生じる。また、超高層物件の外壁タイルを全面打診する場合には検査数が膨大になる。このため、人による診断では結果にばらつきが生じる可能性が大きい。これらの課題を解決するために、超高層集合住宅のバルコニー周りの検査を自動化する外壁検査システム「スカイクライマー™」を開発した。本システムでは、バルコニー面を垂直自走することによりタイルの打診を含む外壁の検査が自動化されている。開発したシステムを超高層集合住宅にて試験適用した結果、自動で安全にバルコニー面の外壁を検査することができた。

1. はじめに

1980年代のバブル経済の中、超高層集合住宅の建設が始まり、2010年には総数が700棟を超えた。近年、外壁タイルの剥落事故が相次いだため、その危険性を回避するために、建築基準法の定期報告制度が2008年に改定され、外壁周りの定期検査と報告が建物所有者に罰則規定付きで義務付けられた¹⁾。

超高層集合住宅の外壁検査では、バルコニー部分に検査員が容易に立ち入れない。このため、地上からの目視または、屋上から仮設ゴンドラを吊るす検査方法が一般的である。外壁タイルを打診する場合にはゴンドラを利用するが、風速10m/s以上の強風時には作業できない上、ゴンドラ自体のトラブルも発生する場合がある。さらに、各戸のプライバシーとセキュリティを確保するため、検査時間を限定する必要性も生じる。一方で、外壁タイルを全面打診する場合には検査数が膨大になり、人による診断では結果にばらつきが生じる可能性が大きい。

以上の課題を解決するために、超高層集合住宅を対象とした外壁検査システムを開発した。Fig. 1 にシステム構成の概要を示す。本システムはバルコニー部を安全に把持することにより、垂直方向に自走可能であり、自動

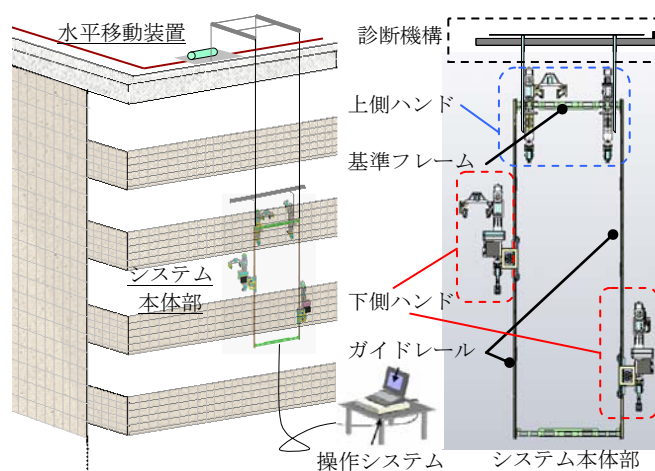


Fig. 1 外壁検査システムの全体構成
Constitution of the Developed System

で法定の外壁検査項目を行うことができる。

本報では開発したシステムの概要と超高層物件に適用して得られた結果について報告する。

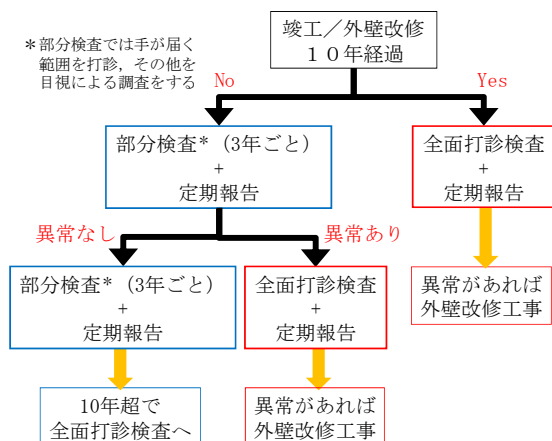


Fig. 2 定期報告制度のタイル打診検査フロー
Inspection Flow of Periodic Report System

2. 垂直自走式外壁検査システムの概要

前述の定期報告制度では、外壁タイルについては10年ごとに全面打診検査することが義務付けられている。Fig. 2 に定期報告制度で定められている打診検査のフローを示す。全面打診が必要な場合には、タイル数が多い事務所ビルや超高層集合住宅などでは、検査員による安定した打診が難しくなるため、タイルの自動打診システムが効果を発揮する。筆者らはこれまでに、中低層事務所ビルの外壁を対象としたタイル自動打診装置²⁾を開発し、事務所ビルに適用してきた。

事務所ビルの外壁は凹凸が少ないため、この検査装置は壁面に沿って連続移動し、検査することができる。しかしながら、建物四周にバルコニーが設けられた集合住宅では、壁面立ち上がり部分が不連続となるため、昇降時には検査装置が壁面段差部に衝突する可能性が高くなる。特に超高層の場合には、吊下げワイヤの荷重や風によるワイヤの揺れなどにより安定した上下移動が難しい。

そこで、上下移動可能な4台の把持機構によりバルコニー立ち上がり部を把持し、外壁面を尺取り虫のように垂直自走する機構を考案した。これにより、連続的な上下移動と確実な反力確保を同時に実現している。

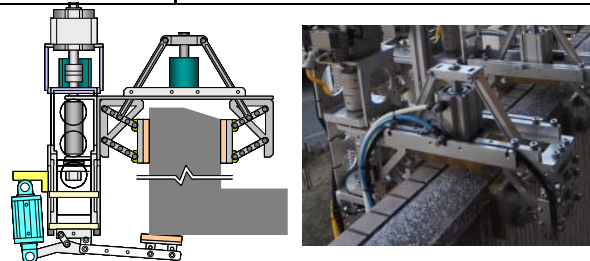
2.1 システムの構成と機能

開発した外壁検査システムは、外壁バルコニー面を自ら上下移動して検査するシステム本体部と、屋上に設置して本体を横移動させるための水平移動装置、および地上にて操作・監視するための操作システムから構成される。システム本体部は、バルコニー立ち上がり部を利用して垂直自走する「上下移動機構」と、タイルの打診および必要部位の画像確認のための「診断機構」とから構成される(Fig. 1)。Table 1 に本システムの仕様を示す。

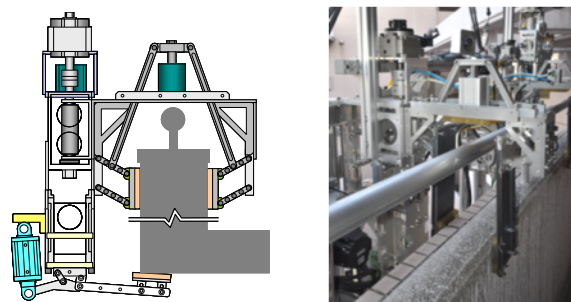
2.1.1 上下移動機構 上下移動機構は水平な基準フレームに固定された2台の上側ハンドと基準フレームの

Table 1 外壁検査システムの基本仕様
Specification of the Developed System

項目		仕様
検査項目	打診	タイルの剥離診断(表面, 躯体, 混在, 健全)
	ビデオ撮影	ルーチン動作(ひび割れ, 欠け, 錆部, シール部)
外形寸法	検査機	W1,910×L500×H4,500(高さ可変)mm
重量	検査機	250kg
動力	電源	三相200V.50/60Hz (Max 20A)
高速移動速度		3.0m/min(横ずれ 1.0mm/層 以内)
検査効率		60m ² /h
検査幅(m)		0.0~2.0m(可変)



(a) 笠木無しの場合
State of the Grip (In the Case of No Handrail)



(b) 笠木有の場合
State of the Grip (In the Case of a Handrail)

Fig. 3 立ち上がり部の把持状態
Grip State of the Hand Unit on Balcony Wall

両端から垂直下方に延びるガイドレール、およびガイドレールを上下移動できる2台の下側ハンドから構成される。

(1) ハンドのユニット化 立ち上がり部を前後で挟むように把持する上側ハンドおよび下側ハンドはユニット化されており、交換することにより各種バルコニー形状に対応できる。対象とする形状は、閉鎖型および開放型バルコニーとし、手摺の有無に関係なく把持できる。把持の方式にエアを利用したクランプ機構を採用しているため、壁厚が100mmから180mmまで変わっても、シャフトの変更だけで同一のユニットを使用できる。また、把持部分は立ち上がり部の天端には接触せず、壁の前後から挟み込む形式が採られている。Fig. 3 に手摺がある場合とない場合の把持状況を示す。

(2) 非常時の動作 ハンドは圧縮空気を動力とし、

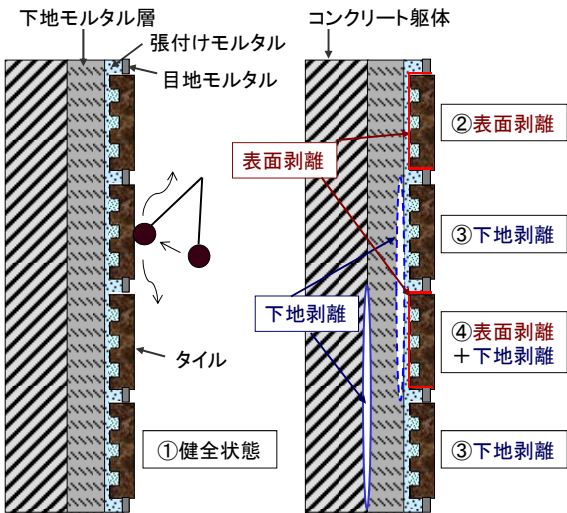


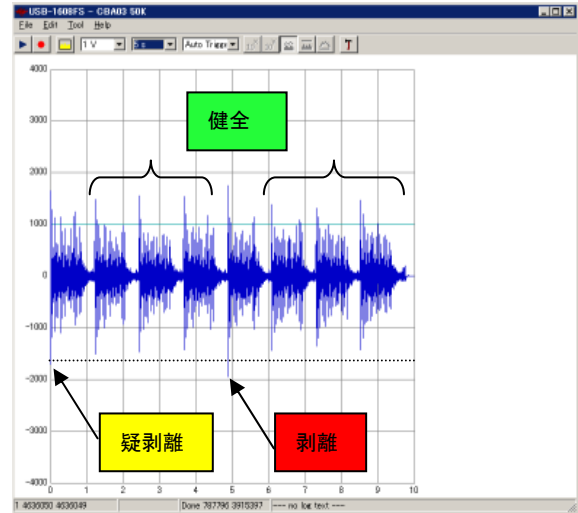
Fig. 4 タイル壁面の剥離状態と特徴(現場後張り)
Patterns of Separation Conditions for Finishing Tile

その把持力は2機のハンドでシステム本体の重量を十分に保持できる。自重によりクランプ把持しているため、システムの電源およびエアが喪失しても、把持が外れることはない。さらに、屋上の水平移動装置と繋がれる安全用ワイヤがフェールセーフとして機能する。

2.1.2 診断機構 診断機構はタイル打診ユニットとウェブカメラで構成され、上側ハンド上部に固定される。診断時には、各診断機構が上下移動機構によって上下し、高さ方向の位置が目的の診断領域に移動される。

(1)タイル打診ユニット 外装タイルの法定検査内容は、タイルの浮きを打診にて検査すること、およびタイルのひび割れや欠け、白華現象を目視にて検査することとされている。タイル打診ユニットは、ハンマーとマイクから構成される打撃部をスライダ装置によって横移動させることにより、検査領域内のタイル全てを高速に打撃できる。また、録音された打音データは、リアルタイムに剥離診断処理される³⁾。

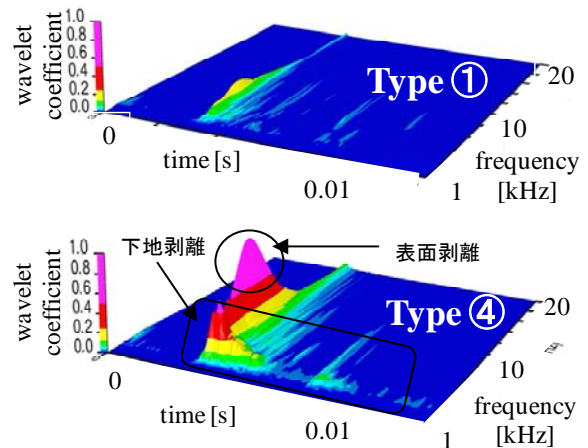
一般的な外装タイル面の施工状態は、Fig. 4 に示すように内部よりコンクリート躯体、下地モルタル層、張付けモルタル+タイル層に分けられる。タイルの脱落の多くは、経験的にタイルの裏面が張付けモルタルとはがれて間隙が生じる剥離(以下この状態を表面剥離と呼ぶ)と、下地モルタル層がなんらかの原因で劣化して下地層との間に隙間や空洞が生じる剥離(以下この状態を下地剥離と呼ぶ)とに分けられる。実際にはこのような2種類の剥離状態が混在して存在するとすれば、タイルの各状態は、①健全状態、②表面剥離のみ、③下地剥離のみ、④表面剥離+下地剥離、の4パターンが想定できる。筆者らは複雑な外壁タイルの状態を把握する方法として、ウェーブレット解析を用いた判定方法を提案し、診断の有効性を検討してきた。従来から使用されている表面剥離の判定に有効な波高値、相互相関率を用いた診断手法に比べ、タイルの下地剥離の状態を正確に判定できる。



(a) 打診音録音ソフト
Monitoring of Recording Reflected Sound



(b) リアルタイム剥離診断処理ソフト
Real-time Analyzing Monitor of Reflected Sound



(c) ウェーブレット解析を用いた剥離診断
Quantitative Detection for Tile Separations
by Wavelet Analysis

Fig. 5 リアルタイム剥離診断システム
Real-time Analyzing System of Tile Exfoliation

本システムでは、瞬時性と精度に優れた最適な剥離診断フローを提案し、採用した。得られた打音は、まず波高値、相互相関率の閾値を用いて接着性に関する異常のみを検知する。異常と判断されたタイルの打音のみ、ウェ



Fig. 6 自動取得画像の一例
Examples of the Automatically Acquired Picture

ウェブレット解析法によって判定する。実壁面検査では健全状態、下地剥離状態が多数を占める場合がほとんどであるため、このフローを採用することにより、大幅な解析時間の削減が可能である。Fig. 5(a)に打音取得ソフトを示す。打撃された音はマイクで取得され、タイル剥離診断システムに伝送される。波高値による診断により、リアルタイムで剥離状態を識別し 5 (b), 剥離の疑いがあるタイルについては、ウェブレット解析を用いた診断手法 5 (c)により、詳細な剥離状態を解析する。

(2) 目視検査システム 法定の目視検査項目は、外装のひび割れや欠け、金物の錆部、塗装の状態などが指定されている。目視検査用のビデオカメラは、遠隔操作および設定されたルーチンでパン・チルトでき、検査時にはモニターとしても使用できる。本システムの画像による検査は、バルコニー部および軒下部のひび割れ、欠け、手摺部の錆およびタイルや躯体の目地の状況を対象とする。

ビデオカメラによる撮影は、システム本体の動作に合わせて、あらかじめ指定した個所をルーチン動作により静止画および動画にて画像処理用PCに取得する。手摺部や軒下部の不具合は、検査後に各画像を確認してCAD立面図上にポイントを図示するとともに、帳票処理する。Fig. 6 にビデオカメラにより自動取得した画像の一例を示す。検査報告書作成作業を省力化するため、外装タイル面のひび割れや欠け、目地部の不具合を撮影した動画画像から不具合部を自動取得する画像処理システムを搭載した。本システムを用いることにより、一定壁面の不具合を自動的に帳票処理できるため、検査報告書作成作業の大幅な省力化が可能となる。Fig. 7 にひび割れ自動取得画像の一例を示す。

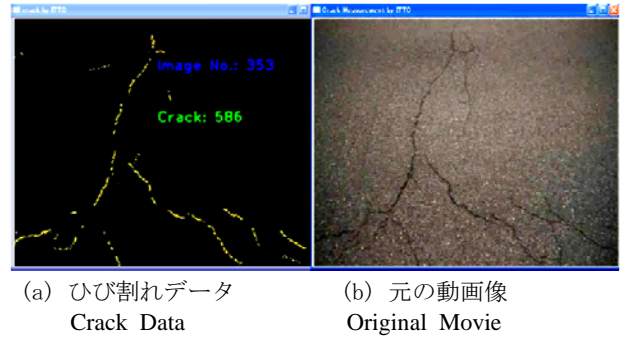


Fig. 7 動画からのひび割れ自動取得例
Example of Automatic Acquisition of Crack

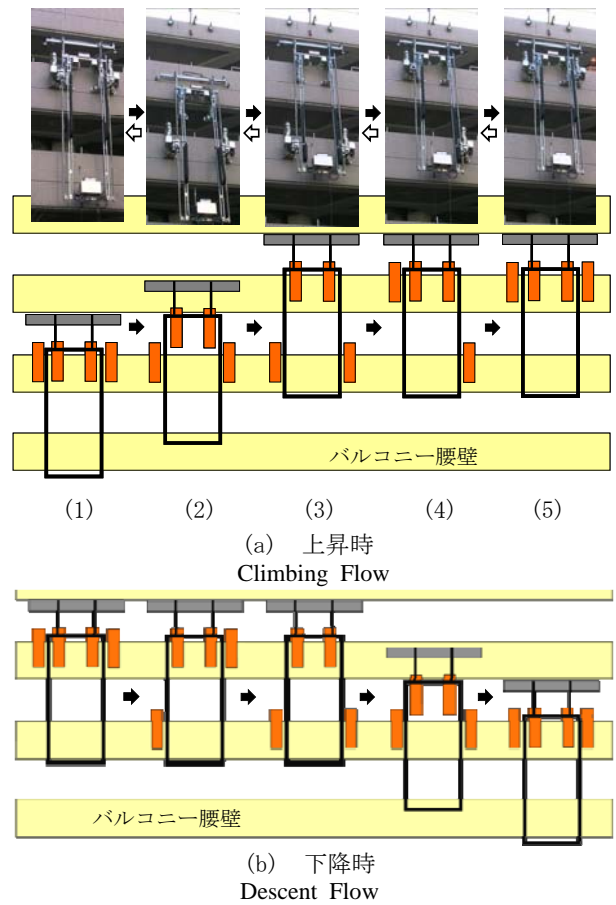


Fig. 8 システム本体部の垂直自走の動作フロー
Climbing Flow of the Developed System

2.2 システムの動作フロー

システムの動作フローをFig. 8 に示す。まず、システム本体の上側ハンドと下側ハンドを同じ高さに調節し、最下層から2層目のバルコニー壁に設置する (Fig. 8(a)-(1))。次に下側ハンドを把持した状態でフレーム全体を押し上げ、所定の高さで外壁周りの必要な箇所を撮影する (Fig. 8(a)-(2))。その後1層上のバルコニー壁を上側ハンドで把持し (Fig. 8(a)-(3))、下側ハンドをそれぞれ同一レベルまで上昇させる (Fig. 8(a)-(4,5))。これを設定階数だけ繰り返す、屋上パラペットの検査まで終了させる。この段階で屋上パラペットの外壁タイルを全数打診す



Photo 1 操作システム
Operation System

る。下降時には、Fig. 8(a)-(5) の状態から下側ハンドを先に1層下部のバルコニー壁に把持させる。その後、上側ハンドを下降させる段階で、現在階のバルコニー壁のタイルを全数打診し、1層下部を把持する。これを繰り返して最下階に到達した段階で、システム本体を検査幅だけ水平移動させ、上記の逆順で下降する。

Photo 1 に操作システムを示す。操作システムは、システム本体部の動作を入力して監視できる操作タッチパネルと、打診検査用PC、および目視検査用PCとから構成される。操作タッチパネルには、建物の階高データ、腰壁高さ、タイルの並びおよび大きさ、打診検査数、目視検査位置等を入力することにより、システム本体が決められたシーケンスに従い動作するように設計した。また、システム動作時には、各可動部のセンサー状況や打診、目視位置を把握することが可能である。

3. 基本性能の取得実験

3.1 基本動作の検証

開発したシステムの基本動作を確認するために、まず30m高さの高層模型壁を製作し、システムを試験運転した。実験では、階高の違いによる上下動作性能と、壁の取付け位置や角度などの施工精度の影響に関する検証、非常時の安全停止方法や強風時の動作挙動等を把握した。Photo 2 に模型壁実験の状況を示す。実験の結果、ガイドレールを追加することにより、階高3,500mmの場合にも垂直上下移動可能であることを確認した。また、各階の壁の前後20mmまでは傾きがある場合を含めて本システムの把持機構により吸収できることを確認した。故障時の検証として、動作エアの供給が断られた場合についての安全動作を検証した。エアの圧力低下を検知して4点把持の状態では停止すること、電源が途中で落ちた場合にも安全に把持状態を維持できることが確認できた。

次に検査機能の検証のため、低層実物件にて試験適用した。実験の結果、検査システムが設計された動作シーケンスに従い、安全に動作することを確認した。また、上下移動時の横方向への移動誤差は1層あたり1mm以内

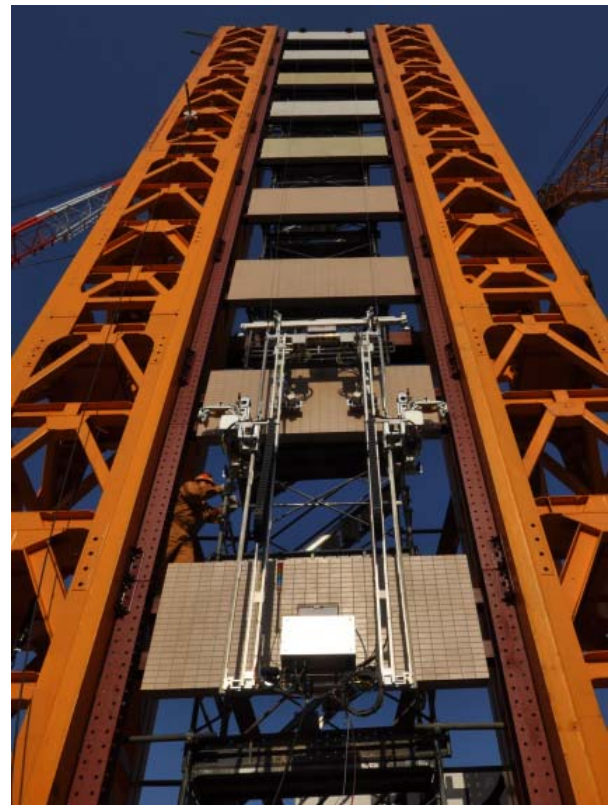


Photo 2 高層模型壁事件の状況
High-rise Building Model of Inspection Wall



Photo 3 低層実物件における試験状況
Tests on the Actual Low-level Building

Table 2 適用物件概要
Summary of the Applied Building

構造	鉄筋コンクリート造 (外壁タイル張り、全周バルコニー)
規模	地上30階、総戸数190戸
平面形状	コの字型(西面EVシャフト)
建物形状	高さ100m、南北25m、東西30m

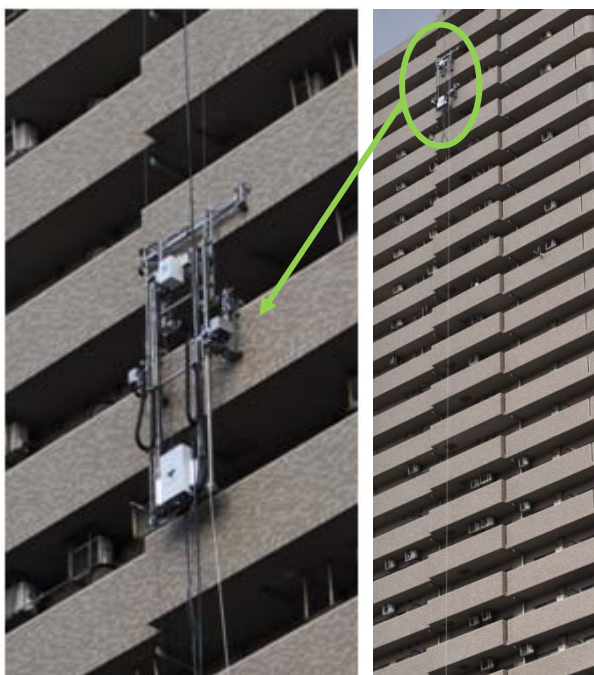


Photo 4 超高層集合住宅への適用状況
Application Circumstance to High-rise Apartment

であり、検査領域内の必要部位の画像取得とタイルの全面打診が確実に実施可能であることを確認した。Photo 3 に低層実物件適用時の実験状況を示す。

3.2 実物件における施工効率

システムの設置と撤去を含めた検査効率を測定するために、超高層の実物件に適用して作業測定した。対象とした物件概要をTable 2 に示す。検査は仮設ゴンドラとの併用で実施し、建物東面に本システムを適用した。作業測定では、設置時間、移動速度と検査時間および盛替え時間等を計測し、検査効率を求めた。

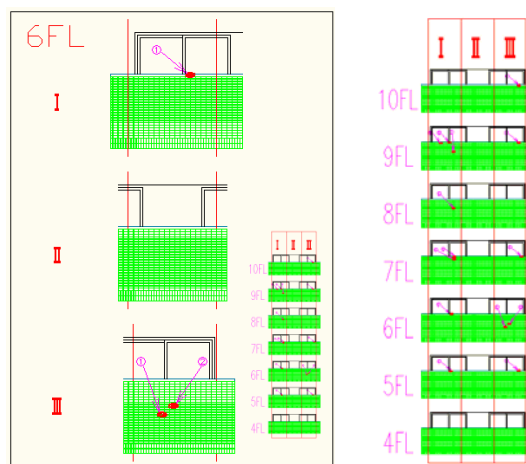
Table 3 に得られた検査効率を示す。測定の結果、設置と撤去を除き、検査効率は $60\text{m}^2/\text{h}$ であり、建物東面約 720m^2 を実質2日間で検査できた。また、各戸の前でのシステムの稼働時間は、平均7分であるが、システムは常に移動しているため、バルコニーでの眺望や風通しを遮ることはなく、住民から高評をいただいた。

Photo 4 にシステムの稼働状況を示す。システム設置時には、まず屋上の水平移動装置を設置する。屋上水平装置はパラペット部に設置する滑車とシステム本体部の動作と同調して安全ワイヤの巻取り、送出しをするウィンチから構成されている。その後、安全ワイヤを地上まで吊り下げ、地上部のシステム本体部を引上げてバルコニー立ち上がり部に懸架する。適用した現場では、2階バルコニー部に懸架し、本システムによる検査範囲は2階バルコニーから上部とした。なお、実施工では、地上から2階までは検査員が地上からアクセスして検査する。

盛替作業は、2階バルコニーをシステム本体に把持させ、安全ワイヤを緩めてからパラペット部の水平移動用滑車

Table 3 検査効率の測定結果
Result of the Inspection Speed

設置時間	240min
検査時間	12h (720 m ²)
稼働時間	60min (×9往復)
盛替時間	20min (×8回)
検査効率	60m ² /h
撤去時間	180min



(a) CADデータへの検査結果の出力
Output to CAD Data of Inspection Result



(b) 取得画像データの帳票出力
Example of the Output of Obtained Graphics Data

Fig. 9 検査結果の出力の自動化
Automation of the Output of Inspection Result

を横移動させる。その後、ウィンチによりシステム本体部の荷重を引き上げ、抜重した状態でシステム本体部の把持を解除して盛替え位置に移動させる。このため、仮設ゴンドラの盛替に比べて大幅な省力化を実現できた。設置・撤収時には、屋上1名、地上2名の合計3人で作業し、検査・盛替時は2人で操作した。本現場では、操作システムは建物1階の踊場に配置した。

検査では、あらかじめシステムに階高、壁高の建物情

報とタイルサイズ、タイルの並び、目視検査位置を登録し、システムの自動運転によりデータを取得できる。検査中には、目視検査PCと打診PCを確認し、不具合がある場合は、その階数をチェックした。目視検査から得られた帳票の出力例をFig.9に示す。

本システムで得られた検査結果を、仮設ゴンドラを利用した検査員によるものと比較した結果、タイルの剥離部位についてはほぼ同一領域で剥離があるとの診断結果が得られた。また、ひび割れや欠損部位についても同一個所を撮影することができた。

4. おわりに

超高層集合住宅を対象とした垂直自走式外壁検査システムを開発し、基本動作実験を経て、低層実物件の集合住宅にて動作を検証した。

その結果、安全に精度良くバルコニー面を上下移動し、

設定されたシーケンスで外壁タイルの全面打診と画像取得が可能であることを確認した。

今後はあらゆる物件に本システムを適用し、簡易に効率的に外壁周りの検査が可能であることを実証していく。また、システムの改良を重ねるとともに各種壁形状に対応できる把持ユニットを追加していく予定である。

参考文献

- 1) 日本建築学会編：維持保全技術の現状と今後の課題，(2007)
- 2) 堂山,他：外壁タイル剥離診断ロボットシステムの開発，日本建築学会大会講演梗概集，A-1分冊,pp.811-812, (1999)
- 3) 井上：外壁タイル検査診断ロボットの開発と現状，BELCA NEWS, 公益社団法人ロングライフビル推進協会 pp.28-33,(2011)