

論文 打放しコンクリート建物外壁面の汚染機構に関する研究

三井健郎*1・米澤敏男*2・池尾陽作*3

要旨:建築物の打放しコンクリート外壁面の汚染および表面の粗さを調査した結果に基づき、コンクリート外壁面の汚染の原因、汚染の進行の機構について考察した。汚染の進行は、壁面上部の水平面に堆積した塵埃および微生物を含んだ雨水の壁面への流下の影響が大きく、汚染は壁上部から下方に進行する。汚染とコンクリート表面の明度、表面の粗さは相関があり、塵埃の堆積、微生物の繁殖、雨水の流下、表面劣化のを繰り返しながら、汚染と表面劣化が同時に進行する。壁面上部の水平面の形状、日射量、コンクリート品質等により汚染の進行は影響を受ける。

キーワード: 汚染、打放しコンクリート、外壁、明度、粗さ

1. はじめに

コンクリート打放し仕上げは、独特の質感、重量感が好まれ、土木構造物を中心に建築物外壁にも多く採用されているが、一方で、一般に経年的に劣化し美観が低下しやすいとの認識もされている。

外壁面の汚染の発生は、構造物の美観や景観を損ねるばかりでなく、清掃や補修にかかる費用の増大や、構造物の機能や耐久性の低下をもたらす場合も多い。このためコンクリートの防汚対策の確立は重要な課題である。コンクリート構造物の汚染の実態や原因については、既往の調査、研究^{1,2)}により明らかになりつつあるが、汚染の発生は様々な原因が互いに影響する複雑な事象であり、定量的な研究報告はまだ少ない。

本研究は、雨水の影響を受ける実際の建築物の打放しコンクリート外壁面について、代表的な汚染の形態、表面の色、粗さの変化等について調査を行い、コンクリート壁面に特徴的な汚染の原因、汚染の進行機構について考察を行ったものである。

2. 調査方法

2.1 調査建物および調査部位

表-1に調査建物および調査壁面の特徴を示す。建築物壁面の汚染の進行は、仕上げ面の材料、開口

部や突起物、庇など建物の形状や、環境条件などにより特徴があることが指摘されている³⁾。今回の調査では、窓、突起物、庇などの影響のない、雨掛りのある一般的な打放しコンクリート鉛直外壁面を対象とした。

建物Aは竣工後24年を経過しており、調査対象壁面は高さ4~5mの鉛直壁面である。壁面の天端水平面は、表-2の(a)に示す金属笠木面、および笠木を設けずコンクリート直仕上げ面の形状(b)の2種類である。

建物Bは竣工後5年を経過しており、調査対象壁面は高さ6.3m、壁厚0.3mの独立壁である。壁面上部の水平面はコンクリート直仕上げであり、形状は水平(c)または片側勾配(d)の2種類である。壁面うち、西側面は1日のうち半日以上日照を十分に受ける面であり、東側面は隣接する建物により日照時間が1時間程度に制限されている。

使用されたコンクリートの品質は、建物Aでは明確ではないが、竣工当時の一般的な水セメント比60~65%程度のコンクリートと推定される。建物Bでは水セメント比59%の普通コンクリートが使用され、一部壁面で水セメント比32%のコンクリートが使用されている。

各調査壁面では、汚染の形状、汚染部分の付着物

*1(株)竹中工務店技術研究所研究開発部 主任研究員, 工修(正会員)

*2(株)竹中工務店技術研究所研究開発部 主任研究員, Ph. D. (正会員)

*3(株)竹中工務店技術研究所研究開発部 研究員, 工修(正会員)

表-1 調査建物の分類

建物	立地および経過年数	測定壁面数	壁面の形状・使用材料・環境条件			
			壁面の高さ	壁天端水平面の形状	日射条件	コンクリートの品質
A	東京都心竣工後24年	8	4~5m	1. コンクリート 直仕上げ 段落ち	良好	普通コンクリート
				2. 金属笠木		
B	千葉県郊外竣工後5年	5	6.3m	コンクリート 直仕上げ	1. 日射量大 (西面)	1. 普通コンクリート (水セメント比59%)
				1. 水平面 2. 片側勾配	2. 日射量少 (東面)	2. 低水セメント比 コンクリート (水セメント比32%)

表-2 調査壁面の天端形状

建物	天端水平面の形状	
A	(a) 金属笠木	(b) 段落ち
		
B	(c) 平面	(d) 片勾配
		

を観察するとともに、表面の色および粗さを測定した。測定位置は、鉛直壁面の高さ方向の上、中、下部の位置とし、上部は天端より約10cm下方、中部は壁高さの1/2の高さ、下部は底部より1mの高さ位置とした。また笠木を有しない壁ではコンクリート天端水平面も測定対象とした。

2. 2 色の測定方法

コンクリート表面の色彩を接触型色彩計を用いて、 $L^*a^*b^*$ 表色系により測定した。測定箇所は各調査位置につき3cm間隔で4点とした。

2. 3 表面粗さの測定方法

コンクリート表面の粗さを触針型表面粗さ計により計測した。測定箇所は色の測定と同位置とした。表面粗さはJIS B 0601-1994に準拠して、平均粗さ Ra により評価した。図-1に示すように、測定により得られた粗さ曲線の平均線を x 軸、縦倍率を y 軸に取り、粗さ曲線を $y = f(x)$ で表わすと、平均粗さ Ra は式(1)で示される。

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |f(x)| dx \quad (1)$$

ここに、 L ：基準長さ（カットオフ値）（mm）

各測定点での評価長さは10mmとし、 Ra を求める際のカットオフ値は、気泡などの欠陥部や型枠の影響などのマクロなうねりを排除することを考慮して0.8mmとした。

2. 4 よだれ状汚染の平均流下長さの測定方法

壁面のよだれ状の汚染の大きさを比較するため、図-2に示すような画像処理により汚染の平均流下

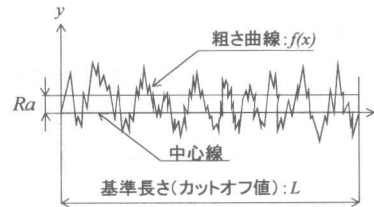
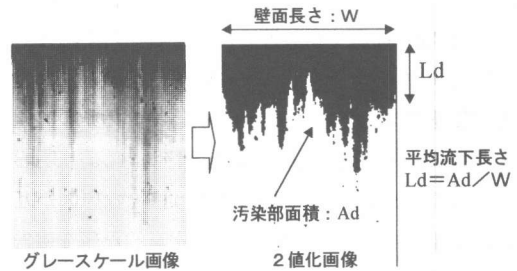
図-1 平均粗さ Ra の算定方法

図-2 汚染の平均流下長さの算定方法

長さを求めた。本調査壁面の汚染は無彩色の汚染であるため橋高ら³⁾の方法を参考にカメラによる撮影画像から明度の情報を抽出しグレースケールに変換した。汚染部分と非汚染部分境界線の特定は、グレースケールのしきい値 (Threshold) を、目視による実際の壁の汚染と比較して定め、両者を2値化した後、汚染部分の総面積 Ad を算出した。 Ad を壁の長さで除した値を汚染の平均流下長さとした。

3. 調査結果

3. 1 汚染部分の形状

写真-1には笠木のない壁面の汚染状況を示す。

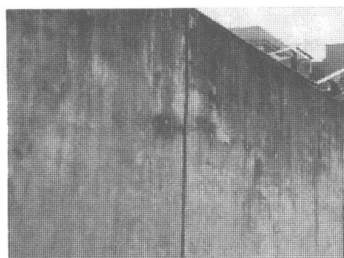


写真-1 笠木のない壁面の汚染形状 (建物A)

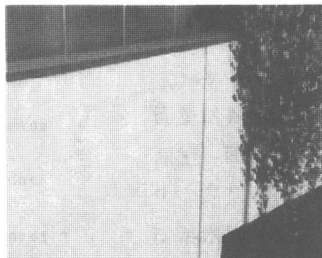


写真-2 金属笠木壁面の汚染形状 (建物A)

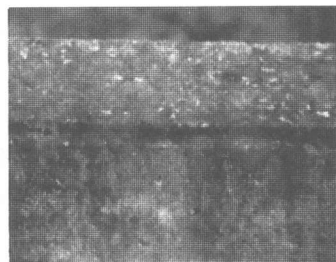


写真-3 天端水平面の汚染状況

壁面の汚染形状は橋高らの分類²⁾による”よだれ状”の汚染が発生している。本調査では開口等のない一般壁面を対象としており、汚染形態は降雨時の雨水の流下による濡れ色の発生形状と類似していることから、天端水平面からの雨水の流下の影響を受ける典型的な汚染の発生状況といえる。汚染部分の色は黒色もしくは緑黒色を呈しており、汚染の程度は天端近傍では大きく、下方に行くにしたがって減少している。

写真-2に示す金属笠木を有する壁面では均等な変色は見られるものの大きな汚染は発生していない。

3.2 汚染物質

汚染部分に付着する物質は、建物A、Bともに塵埃や土粒子の他、微生物が観察された。微生物の種類は詳細には同定されていないが、色や形状から判断して、黒色のクラドスポリウムやアスペルギルス等のかび類や藻類と判断される。またコンクリート天端水平面や天端近くの壁面では写真-3に示すように、表層のペーストの流出が見られ、茶色のダイダイゴケが観察された。壁面上部水平面のペースト流出は、竣工後5年の建物Bでは細骨材の露出が一部見られる程度であるが、竣工後24年の建物Aでは粗骨材が露出している部分もあり、劣化の程度が大きく微生物の発生の程度も大きい。

壁上部水平面や壁面上部のよだれ状汚染として知覚されるものは大部分がかびや藻類などの微生物によるものであった。壁面中部や下部では微生物の発生は目立たず、塵埃の付着や表層の劣化などによりほぼ均等に変色しているため、汚染として知覚されにくくなっている。

3.3 建物Aの汚染の調査結果

(1) 壁面の鉛直方向の汚染分布

図-3に天端および壁面の高さ方向の明度 L^* の分布を、図-4に表面の平均粗さ R_a の分布を示す。図中の各点は同形状の壁面の測定値の平均である。

笠木のない壁の場合、天端水平面および壁面上部はよだれ状の汚染が発生しており、明度 L^* は金属笠木壁より低く、天端から下方に向かって増加している。粗さ R_a は天端水平面で大きく、壁面下部に向かって減少している。これより汚染による明度の低下と表面粗さの増加に何らかの関連があることが考えられる。

(2) 笠木の有無の影響

図-3、4より、笠木を有する壁面ではコンクリート天端壁に比べ、明度は高く、粗さは小さい。また両者の高さ方向の変化も小さい。図-5には、笠木の有無、雨掛りの有無の条件での、壁面中央位置での明度と粗さの比較を示す。金属笠木壁は笠木のない壁面よりも明度は高く、粗さは小さく、汚染の発生および表面劣化が低減されている。金属笠木壁面では降雨水は直接壁面に掛っているものの、笠木の水切り効果により、壁面天端から壁面に直接雨水が流下してはいない。このため壁面の汚染発生には降雨水が直接当たることよりも、天端水平面より流下する雨水の影響が大きいと言える。雨掛りのない外部壁の明度が低いのは、気流により付着した塵埃が雨水により流されずに堆積するためと考えられる。

3.4 建物Bの汚染の調査結果

(1) 壁面の汚染状況

建物Bの調査対象壁面は、すべて笠木を有しない独立壁である。壁面は天端水平面の勾配、コンクリートの品質が異なる他は同形状であり、隣接して

同時期に施工されているため、各種要因が壁面の汚染に及ぼす影響が比較できる。

写真4～8に壁面の状況を示す。写真4は壁面の裏側方向に下る水勾配天端を有する壁面（壁面①）であり、隣接する建物の影になり日照時間の少ない東面である。写真5、6は天端形状が水平であり、それぞれ日照時間の短い東面（壁面②）、日照時間の長い西面（壁面③）である。これらの使用コンクリートは水セメント比59%の普通コンクリートである。写真7、8は水セメント比32%のコンクリートを用いた壁で、天端面は水平であり、それぞれ東面（壁面④）、西面（壁面⑤）を向いている。

(2) 天端の勾配および日射の影響

勾配天端の壁面①（写真4）では汚染はほとんど発生していないのに対し、水平天端面の壁面②、③（写真5、6）では黒色のよだれ状汚染が大きく発生している。各壁面の天端よりの汚染平均流下長さを図6に示す。汚染の平均流下長さは、日射量の少ない壁面②が60.0cmと最も大きく、日射量の多い壁面③でも22.6cmであり、天端より雨水が流下しない壁面①とは明らかな差が見られる。壁面②、③の天端水平面では塵埃の付着とともに、黒色のかび、藻類が発生しており、天端面に堆積した塵埃、微生物が壁面の両側に流下して汚染を形成している。

図7にはこれらの壁面の明度と粗さの測定結果を示す。逆勾配天端を有する壁面①では、明度は高く、壁面での明度と粗さの高さ方向の変化は小さい。平面天端壁面②、③では、天端に近い上部ほど明度が大きく低下し粗さも増加している。また日射量の

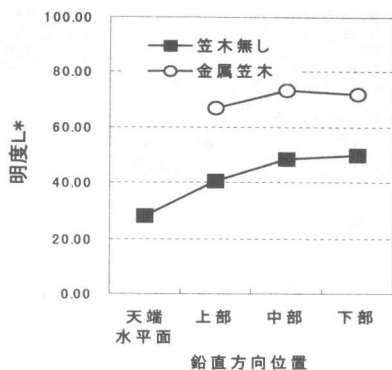


図-3 明度L*の高さ方向の分布（建物A）

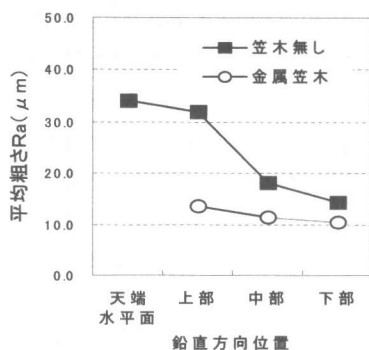


図-4 表面粗さRaの高さ方向の分布（建物A）

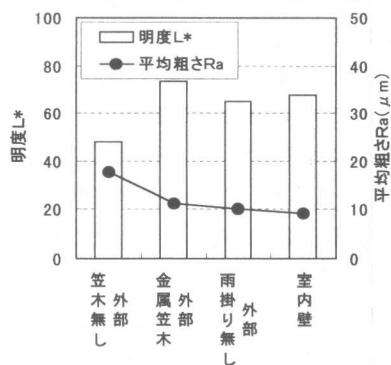


図-5 壁面の明度、粗さに及ぼす雨水の影響

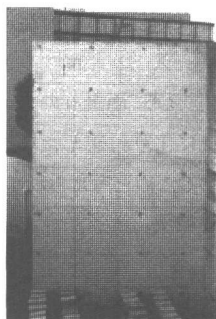


写真-4 壁面①

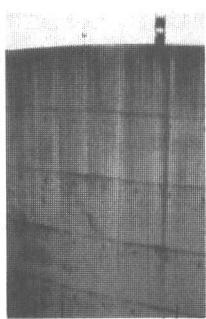


写真-5 壁面②

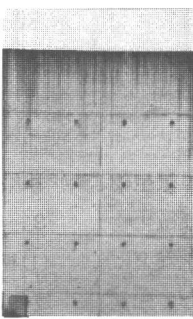


写真-6 壁面③

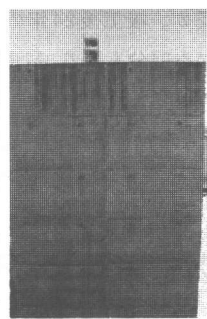


写真-7 壁面④

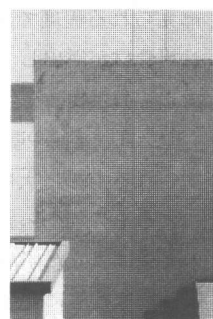


写真-8 壁面⑤

(W/C59%、水勾配)

(W/C59%、日射少)

(W/C59%、日射多)

(W/C32%、日射少)

(W/C32%、日射多)

少ない壁面②は壁面③に比べ、明度が小さく粗さがやや大きい。

竣工当初同程度であった表面の状態が、汚染の発生に差が生じたのは、天端水平面よりの流下水の影響が大きく、雨水の流下がない場合は汚染の進行は非常に遅い。平面天端壁では、天端面に堆積した塵埃や微生物が雨水により両側壁面に流下、付着し、上部から徐々に表面の劣化と汚染が進行していったと考えられる。また、雨水の流下がほぼ同程度と考えられる東西面で汚染と劣化に差が生じている。東西面の日射量の違いは、壁面の湿潤状態の差と考えられ、日射量が多い壁面③では、微生物の繁殖に必要な水分が確保されにくいいため汚染が少ないと考えられる。

(3) 水セメント比の影響

図-6に示すように、水セメント比32%のコンクリートを用いた壁面④、⑤では、よだれ状汚染の発生が少なく、特に日射の多い西面(⑤)では、天端水平面からのよだれ状汚染はほとんど認識されない。竣工時の明度、粗さが異なるため直接比較はできないが、図-7、8に示すように、水セメント比の低い壁面④、⑤では、明度、粗さも鉛直方向の変化量が小さい。水セメント比の低下により、一般には組織が緻密となり、劣化に対する抵抗性が増す。また水セメント比の低下により吸水速度係数が低下する⁴⁾。これらの理由から塵埃粒子や微生物の雨水の浸透による固着や微生物の繁殖が阻害され、汚染の発生が抑制されると考えられる。

4. コンクリート壁面の汚染進行機構の考察

今回の調査結果および既往の知見より、コンクリート壁面の汚染の進行機構について考察した。

コンクリート表面に固着する汚染物質は、塵埃およびかび、藻類などの微生物である。汚染の程度の小さい箇所では塵埃の付着が観察されたが、汚染の激しいよだれ状の汚染部分では、かびや藻類が多く付着しており明度が低い。

今回の調査では、天端に笠木を有する壁面や逆側に水勾配のある壁面では汚染はほとんど見られない。また、明度の低下で表わされる汚染と表面粗さは高

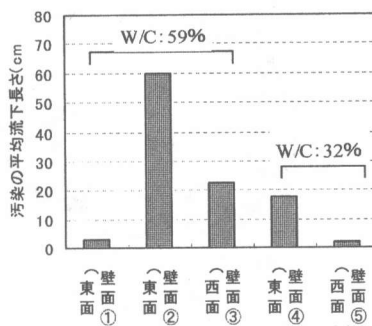


図-6 汚染の平均流下長さ

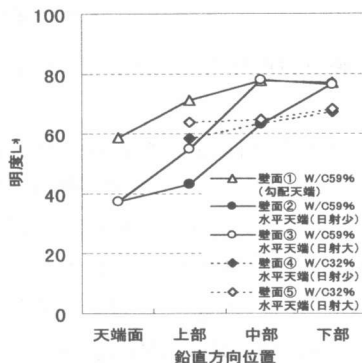


図-7 明度の測定結果 (建物B)

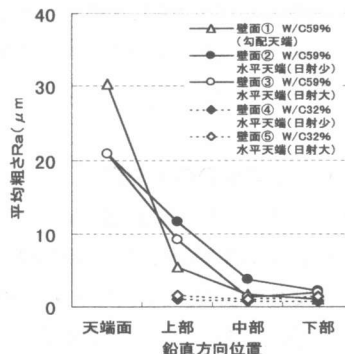


図-8 粗さの測定結果 (建物B)

さ方向に増加していることから、汚染は天端から下方に向かって進行していくと考えられる。以上より壁面に直接当たる気流や降雨水による汚染物質の付着は小さく、天端水平面に堆積した塵埃粒子や微生物が雨水とともに壁面に流下して固着する事象が汚染の第1段階と考えられる。

塵埃が堆積、付着した後、仕入りが検討したように、藻類が堆積した塵埃、雨水から栄養分と水分を得て増殖し、その後死滅した藻類を栄養源としてかび類が繁殖し汚染度が高まる。かび類の増殖には

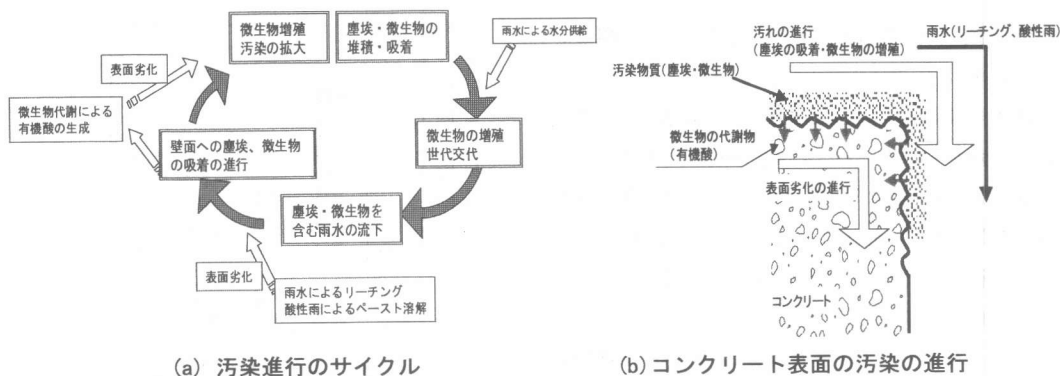


図-9 壁面の汚染機構の模式図

栄養源として細菌類の影響も大きい⁵⁾ことも指摘されている。

打設直後のコンクリートは強アルカリ性であり、微生物が繁殖しにくい条件である。しかし、壁面の明度の低下と粗さの増大は相関が高いことから、汚染進行の過程で、酸性の雨水や微生物の代謝により表層のペースト分のリーチングが起こり、pHの低下や、表面の凹凸の増大、吸水性の増加などが起こる。その結果、汚染物質の付着が容易になったり、微生物の繁殖条件が高まり、汚染の進行がさらに加速されると考えられる。以上の汚染進行過程とコンクリート壁面の状況の模式図を図-9に示す。

5. コンクリート壁面の防汚対策

本検討結果より考えられる防汚対策を以下に示す。ただし、本検討は雨水の影響を受ける一般的なコンクリート壁面の汚染進行を対象としている。汚染の進行は仕上げ面の材料、建物の形状や、環境条件、主汚染物質などにより複雑な影響を受けるため、建物の固有の条件を考慮することが必要である。

(1) 設計上の対策

壁面天端に堆積した塵埃、微生物の流下を防止し、壁面をできるだけ乾燥状態に保つことが効果が高いと言える。このため壁面天端への笠木の設置や、水勾配により天端からの流下水が直接壁面に掛らないようにすることが重要である。

(2) 材料・調合上の対策

塵埃や微生物の付着や、微生物の増殖に必要な水分の保持を妨げるよう、コンクリート表面の吸水性

を低下させ、緻密で平滑な表面が長期間保持されるような材料・調合とする。水セメント比の低減が有効である。

6. まとめ

- (1) 雨水の影響を受ける一般的なコンクリート打放し壁面の汚染発生の主原因は、壁面天端に堆積した塵埃、微生物が雨水とともに壁面に流下し、表面の劣化と微生物の増殖が進行することによる。
- (2) 一般的なコンクリート壁面では、壁面上部から下方に向かって、汚染が進行し、壁面の明度が低下し、表面の粗さが増大する。
- (3) 壁面の汚染の低減には、壁の天端水平面に堆積、増殖した塵埃や微生物の壁面への流下の防止や、水セメント比の低減によるコンクリート表面の劣化、吸水の防止が有効である。

参考文献

- 1) 仕入豊和ほか：コンクリート壁面の汚れ，セメント・コンクリート，No. 461，pp. 22-33，1985
- 2) 橋高義典：建築物外壁面の汚染の調査および基礎的考察，日本建築学会構造系論文報告集，第370号，pp. 11-18，1986
- 3) 橋高義典ら：画像解析手法によるコンクリート壁面の汚染度測定方法，セメントコンクリート論文集，No. 44，pp. 702-707，1990
- 4) 長滝重義ら：コンクリート構造物の汚れに影響を及ぼす要因とその評価手法，セメントコンクリート論文集，No. 46，pp. 386-391，1992
- 5) 小竹森浩ら：微生物によるコンクリートの表面汚染機構に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 17，No. 1，pp. 273-278，1995