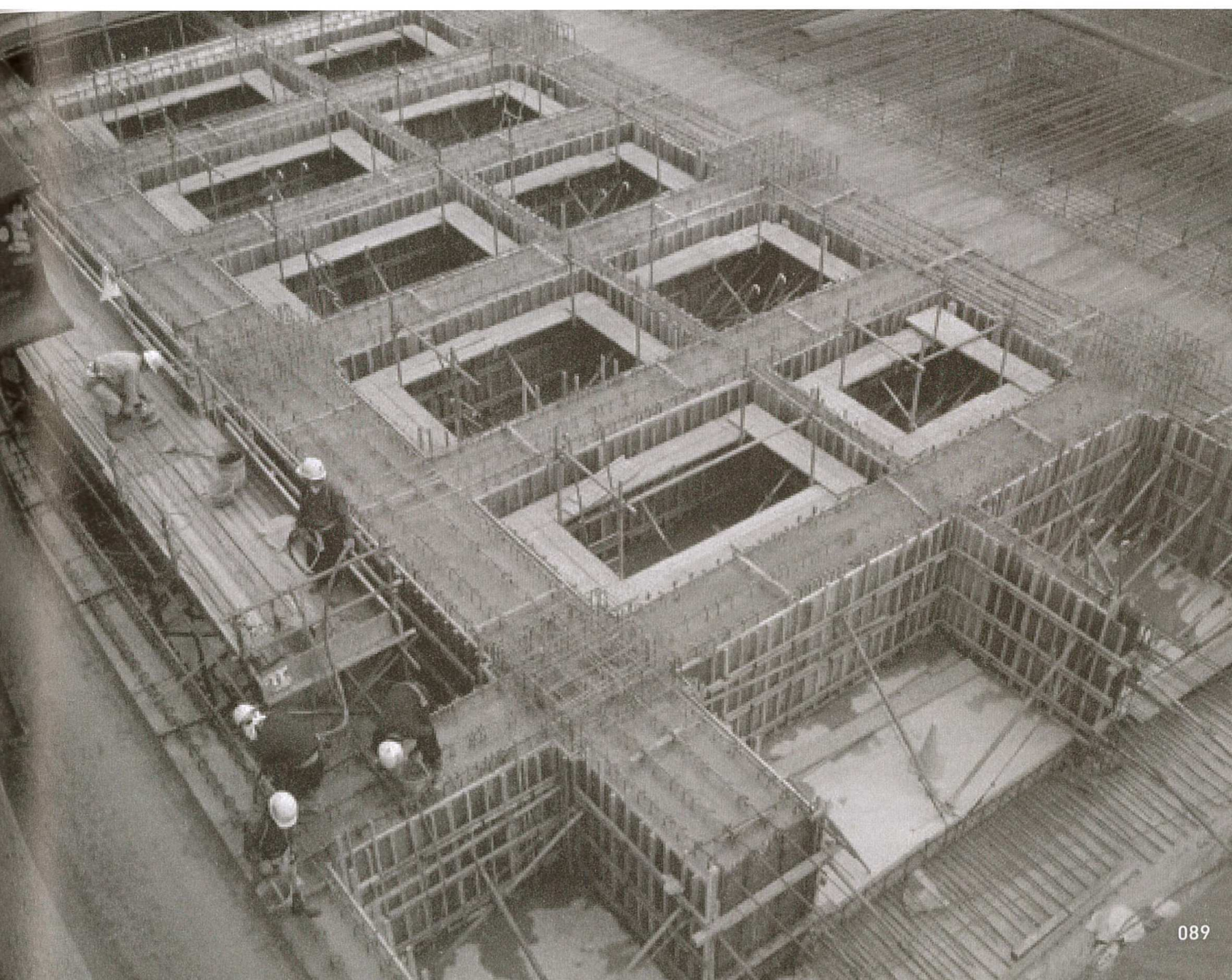


CHAPTER 6

誤解だらけの 温度ひび割れ対策



温度ひび割れは 温度低下時に注意

➡ 時間の経過とともに広がる外部拘束ひび割れ

マスコンクリートの温度ひび割れは、水和熱が大量発生する温度上昇時に起こりやすい——。そんな先入観を抱きがちだが、実際は温度低下時の収縮ひび割れに注意が必要だ。その理由を発生メカニズムに基づいて解説する。

ここまでは、乾燥収縮によるひび割れを取り上げてきた。ここでは、収縮と並んで問題となることが多いマスコンクリート（以下、マスコン）の温度ひび割れについて解説する。

マスコンクリートの定義

まず、温度ひび割れを発生させやすいマスコンとは何か。その定義を押さえておこう。

日本建築学会の「建築工事標準仕様書・同解説 JASS5鉄筋コンクリート工事」（以下、JASS5）では、「部材断面の最小寸法が大きく、かつセメントの水和熱による温度上昇で有害なひび割れが入る恐れのある部分のコンクリート」とだけ定義している。その目安として最小断面が壁状部材で80cm以上、マット状または柱状の部材で100cm以上と規定している（図1）。

マット状に比べて壁状部材で最小断面寸法が小さいのは、温度ひび割

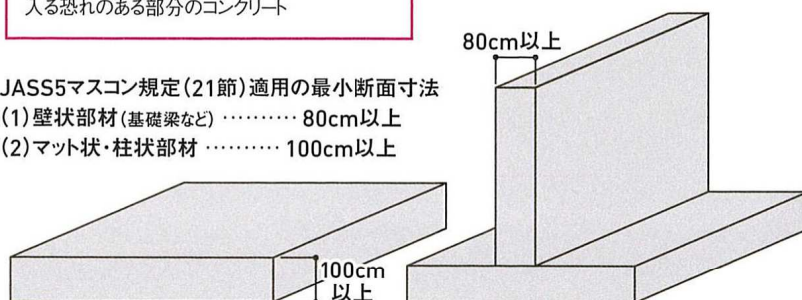
図1 マスコンクリートの定義

JASS5によるマスコンクリートの定義

部材断面の最小寸法が大きく、かつセメントの水和熱による温度上昇で有害なひび割れが入る恐れのある部分のコンクリート

JASS5マスコン規定(21節)適用の最小断面寸法

- (1) 壁状部材(基礎梁など) …… 80cm以上
- (2) マット状・柱状部材 …… 100cm以上



JASS5では、マスコンクリートの目安として最小断面が壁状部材で80cm以上、マット状または柱状の部材で100cm以上としている（資料：日本建築学会のJASS5をもとに筆者が作成）

れがより生じやすく、適用条件を厳しくしているからだ。ちなみに、セメントが初期硬化する際に生じる水和熱は非常に大きく、大きい断面の部材では内部の最高温度は80℃を超えることもある。

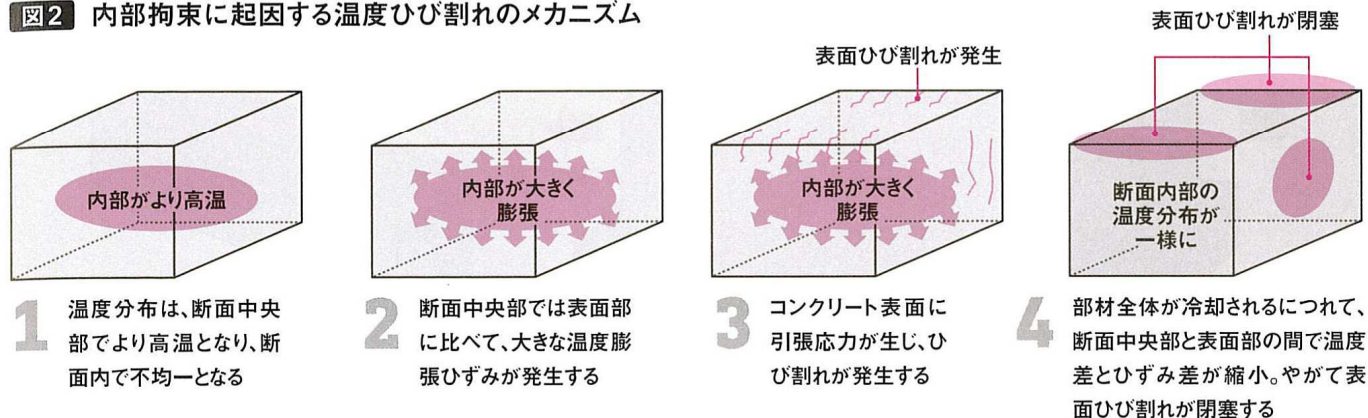
温度ひび割れの種類

マスコンの温度ひび割れには、内

部拘束に起因するものと外部拘束に起因するものの2つの種類があり、それぞれ発生の状況やメカニズムが大きく異なる。

第一の内部拘束ひび割れは、断面内部が外周部より高い温度になることで膨張し、外周部が引っ張られるために生じる（図2）。この現象は、餅を焼いたときに表面に割れ目が生じる現象に似ている。しかし、時間が

図2 内部拘束に起因する温度ひび割れのメカニズム



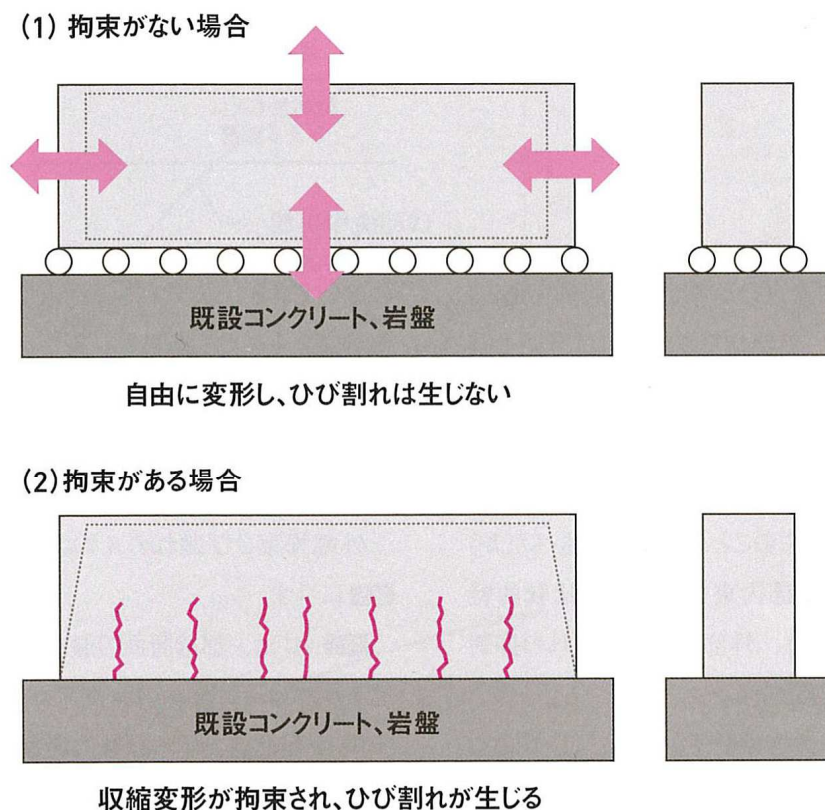
内部拘束に起因するひび割れは、断面内部が膨張し、外周部が引っ張られるために生じる。しかし、冷却されると表面ひび割れが閉塞する（資料：図5 まで特記以外は鹿島）

経過して断面内部の温度が低下して平準化すると、内部拘束ひび割れは閉じる性質がある。従って、内部拘束ひび割れはあまり問題としなくてよいとされている。

本丸は第二の外部拘束ひび割れであり、これは適切に対策を講じなくてはならない（図3）。

セメントの水和熱により初期に温度が上昇し、その後、外部からの冷却で低下すると、部材は全体として膨張した後に収縮することになる。このとき、コンクリートが岩盤や既設コンクリートの上に打設されていると、この膨張と収縮の変形が妨げられ、特に温度低下時には硬化して弾性係数が大きくなったコンクリートの収縮が拘束されるので、大きな引張応力が発生しひび割れに至る。

図3 外部拘束に起因するひび割れは乾燥収縮ひび割れと類似



温度上昇が終わって温度低下が始まると、部材は収縮する。このとき、コンクリートが岩盤や既設コンクリートの上に打設されていると、変形が拘束されて引張応力が発生し、ひび割れに至る

外部拘束型が危険な理由

内部拘束と外部拘束によるひび割れを図4 でまとめて比較した。内部拘束ひび割れは部材の温度が上昇する期間で生じるので、材齢1～3日

程度までの初期段階で起こりやすい。

これに対して、外部拘束ひび割れは温度低下時に進行するので、材齢1週間後ぐらいから発生し始める。

また、内部拘束ひび割れは、表面だけの浅いもので材軸方向を中心に、直交方向にも生じる。これは、部材を貫通し材軸直交方向だけに生じる

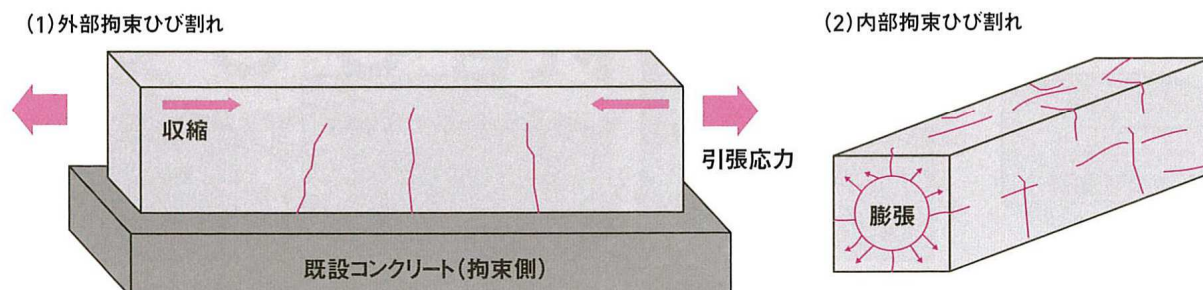


図4

内部拘束ひび割れと 外部拘束ひび割れの違い

内部拘束ひび割れは、材齢1～3日程度の初期段階で起こりやすい。外部拘束ひび割れは温度低下時に進行するので、材齢1週間後ぐらいから発生し、時間の経過とともに拡大する傾向がある

	外部拘束ひび割れ	内部拘束ひび割れ
発生時期	部材温度が低下している過程 (材齢1週間程度以降)	部材温度が上昇している過程 (材齢1～3日程度まで)
ひび割れの形態	材軸に直交方向、断面を貫通するひび割れ	材軸方向を中心に様々な方向、表面だけの浅いひび割れ
ひび割れ幅の経時変化	時間の経過とともに拡大する傾向	時間の経過により閉塞
耐久性などに与える影響	大きい	比較的小さい

外部拘束ひび割れと対照的である。また、外部拘束ひび割れは時間の経過とともに拡大する傾向があるが、内部拘束ひび割れはいずれ閉塞して見えなくなる。

これらのことから、先に述べたように、内部拘束ひび割れは比較的小さいとされ、外部拘束ひび割れの抑制が重要となる。

外部拘束ひび割れは、(1) 自由な収縮が妨げられ、(2) 引張応力が発生し、(3) ひび割れ強度を超えるとひび割れが発生するというプロセスで進行する。このメカニズムは、これまで説明してきた乾燥収縮によるひび割れと似ている。

異なるのは収縮変形の原因で、乾燥収縮ひずみによるものか、温度低下による温度収縮ひずみによるものか

の違いである。以下、外部拘束ひび割れに焦点を当て説明する。

ひび割れの発生メカニズム

外部拘束ひび割れのメカニズムを図5に示す。

図5 (1) は、部材断面の温度履歴である。経過日数 t_0 の時点でコンクリートが打ち込まれ、部材の温度は T_0 だった。その後、材齢 t_1 (実際は1～3日程度) までに温度が急激に T_1 まで上昇して、その後時間の経過とともにゆっくりと低下して t_2 の時点で T_0 に戻る。

この温度変化に伴い、外部拘束されたマスコンクリート部材には、図5 (2) の応力が発生する。温度が上昇している t_0 から t_1 の期間では部材は

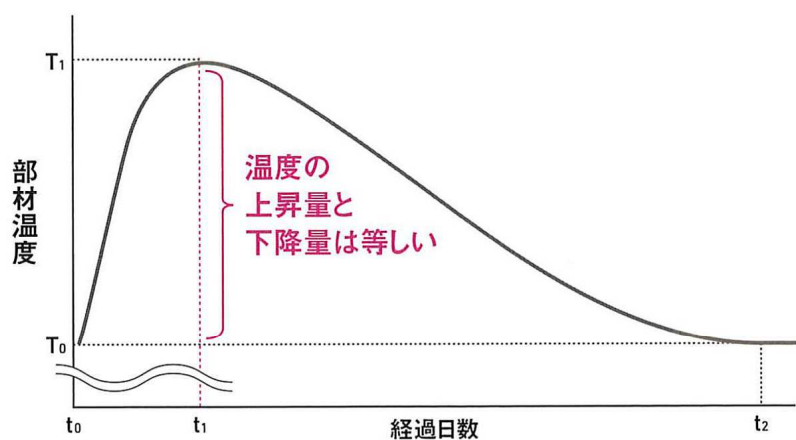
膨張し、その膨張が拘束されることによって圧縮応力 Δa が t_1 の時点で生じる。

その後、圧縮応力は急激に減少し、さらに引張応力 Δb が卓越して、ある時点でひび割れ強度を超えひび割れが発生する。このプロセスの重要な点は、 t_1 での圧縮応力 Δa がその後の引張応力 Δb に比べ小さいことである。

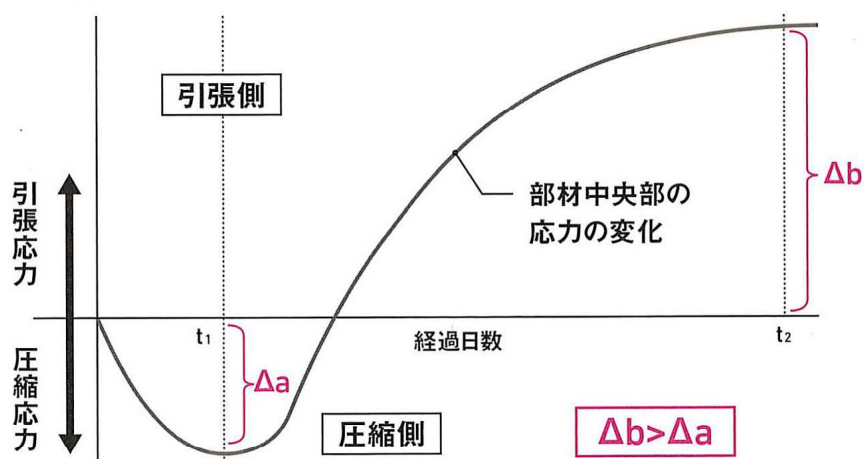
この点に疑問を感じる読者もおられるかもしれない。図5 (1) で述べた通り、温度上昇分と温度低下分が等しいなら、それに伴う膨張と圧縮のひずみも同じになり、結果として内部応力も差し引きゼロになりそうである。ところが、実際には収縮による引張応力が、膨張による圧縮応力を大きく上回る。

【図5】 温度低下時の弾性係数が大きい

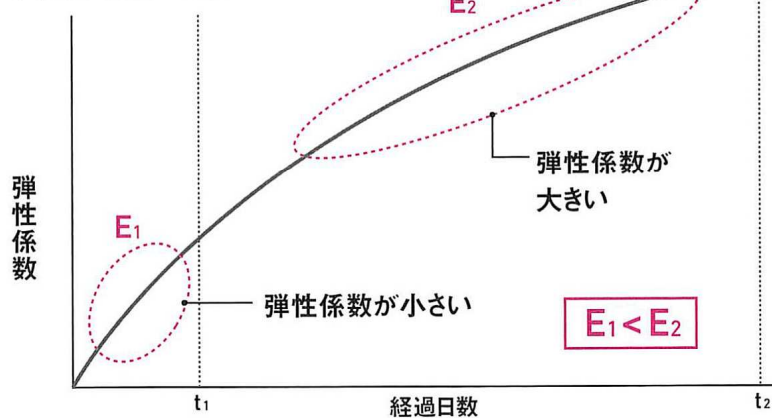
(1) 温度の変化



(2) 応力の変化



(3) 弾性係数の変化



膨張時の温度上昇量と収縮時の温度下降量は等しいのに、コンクリートの引張りと圧縮の応力は等しくならない。昇温時と降温時で、コンクリートの弾性係数が大きく異なるからだ

弾性係数の違いに起因

このメカニズムを示したのが図5 (3)である。注目すべき点は、コンクリートの弾性係数が、時間の経過とともに変化していることだ。温度上昇時の t_0 から t_1 の間は、コンクリートが硬化する過程であり、まだ弾性係数 E_1 は小さい。しかし、 t_1 の前後で高い温度を受け、さらに材齢も経過したコンクリートは水和反応が大きく進み、弾性係数 E_2 は E_1 に比べ顕著に増進する。ここが重要なポイントである。

その結果、発生する応力は、温度ひずみ×弾性係数で表現されるから、同じ温度ひずみに対して温度上昇時の E_1 のときの応力 Δa と下降時の E_2 による Δb では後者が大きくなる。これが図5 (2)の原因となる。

大規模な基礎梁に要注意

実際のマスコンクリート部材の例を写真1に示す。これは基礎梁の写真で、升目状に大きな梁部材を施工している。

写真2は、写真1の環境下で発生した温度ひび割れを示したものだ。縦向きのひび割れが2mピッチ程度に生じている。このひび割れは、梁の両側面に生じていたことから貫通ひび割れと推測される。梁部材が基部のマットに拘束されて生じており、外部拘束型の温度ひび割れの典型と言えるものだ。

以上の説明から、温度ひび割れは、内部拘束よりも外部拘束によるひび割れのほうが問題となることを理解して

写真1 大規模な基礎梁に注意



土木構造物に比べると、建築の構造物でマスコンクリートを打設するケースは比較的少ない。しかし、左のような大規模な基礎梁を施工するときには、温度ひび割れに対する配慮が必要になる (写真: 下も鹿島)

写真2 縦向きに温度ひび割れが発生

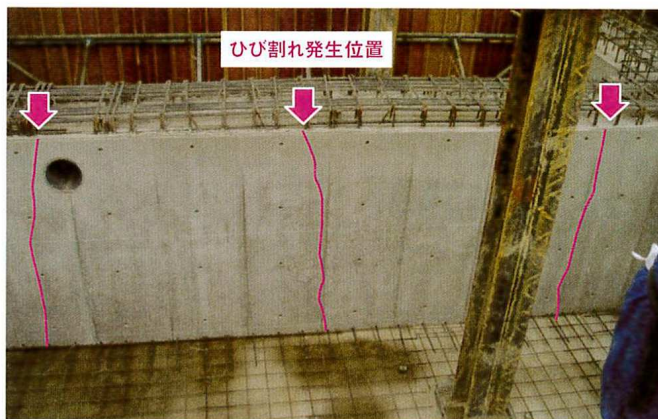


写真1の環境下で施工したところ、縦向きのひび割れが約2m間隔で生じた。基礎梁が基部のマットに拘束されて生じた、外部拘束型のひび割れと推測される。梁の両側面に生じていたので、断面を貫通したひび割れの可能性がある

いただけたと思う。

その理由を掘り下げていくと、コンクリートが硬化している過程で弾性係数が変化するために生じるコンクリート特有の現象であることが分かる。このメカニズムとマスコンクリートの定義をま

めて理解しておけば、温度ひび割れのリスク軽減につながると思われる。

ここで説明した温度ひび割れのメカニズムを踏まえて、次のページから効果的なひび割れ制御方法について述べていこう。

ここがポイント

温度上昇時の内部拘束型より、
温度低下時の外部拘束型のほうが、
ひび割れにはリスクが大きい

コンクリートの弾性係数は
温度上昇時より低下時の方が大きくなる。
これが、温度低下時にひび割れリスクが増大する理由である

セメント量を削減しても 温度ひび割れに効果なし

➡「拘束度」と「線膨張係数」が効いてくる

温度ひび割れの抑制策として、真っ先に思い浮かぶのは単位セメント量の削減だろう。しかし、削減量には限度があり、たとえ減らしたとしても、ひび割れ抑制の効果はさほど期待できない。その理由を解説する。

前ページまでではマスコンクリートの温度ひび割れの発生メカニズムについて説明した。これを受けて、温度ひび割れ発生リスクの指標と、これを用いた効果的な温度ひび割れ抑制対策について述べる。

まず、温度ひび割れを抑制するうえで、ぜひ知っておきたいポイントを2つ挙げておきたい(図1)。

1つは、単位セメント量を削減しても、温度ひび割れの抑制効果が限定的だということだ。これは多くの建築技術者が誤解しているの、最初にその誤解を解いておきたい。もう1つのポイントは、温度ひび割れを抑制するときに、何を指標とするかという問題である。この指標には、応力強度比(温度応力とひび割れ強度の比)が用いられる。

温度ひび割れ抑制のポイント

最初に、1つ目のポイントについて詳しく説明する。

図1 温度ひび割れを抑制するための2つのポイント

1 セメント量削減によるひび割れ抑制効果は限定的

単位セメント量を削減すれば、水和熱が減少して温度ひび割れの発生を抑制できると思いがち。しかし実際には、水和熱による温度上昇やひび割れの発生に対する抑制効果は、限定的だ

2 応力強度比でひび割れリスクを制御する

応力強度比(=温度応力の予測値÷ひび割れ強度の予測値)でリスクを管理する。漏水抵抗性を確保するには、応力強度比を0.8以下に、耐久性を確保するには1.3以下に収めることが目安となる

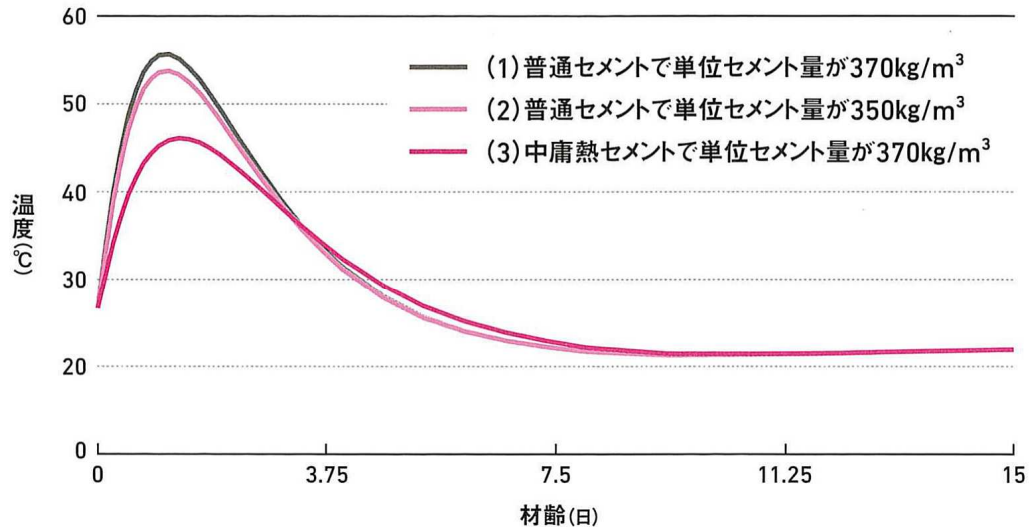
1つは、セメント量を減らしても温度ひび割れの抑制効果が限定的であること。もう1つは、応力強度比(温度応力/ひび割れ強度の予測値)を指標として温度ひび割れを制御することだ(資料: 図8まで特記以外は筆者)

温度ひび割れを抑制するために、多くの建築技術者がまず考えるのは単位セメント量の削減だろう。温度ひび割れの原因は、セメントの水和熱による部材内部の温度上昇である。水和熱量を小さくするには、セメント量の抑制を試みるのはごく自然な考え方である。

しかし、セメント量を減らすといっても限界がある。なぜなら、建築部材

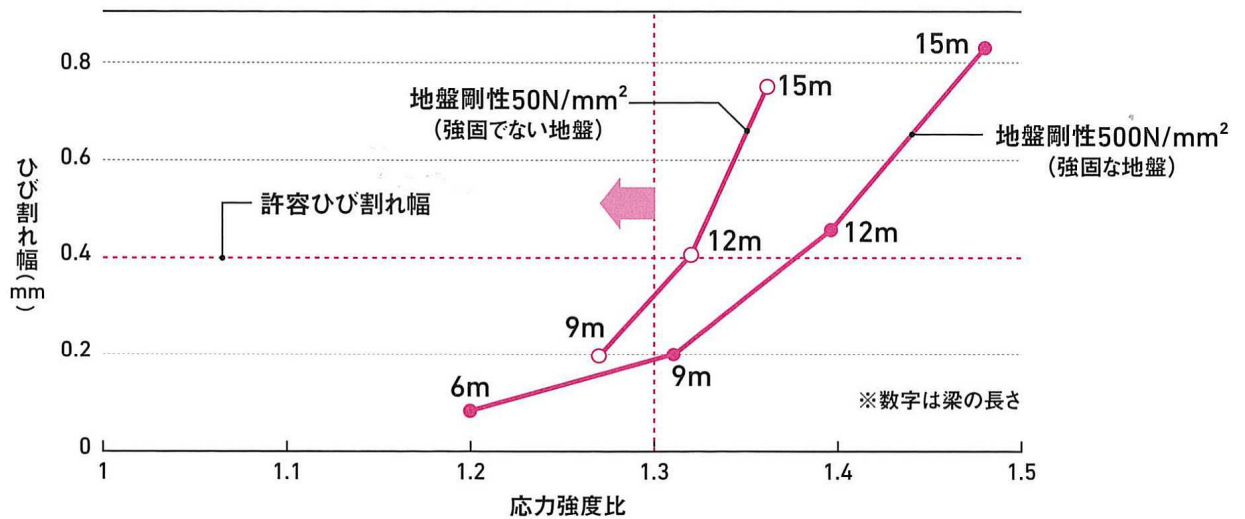
では鉄筋を密に配置するので、スランプ値は15cm程度が下限であり、それより小さくすることが難しい。さらに、強度確保の点から水セメント比は呼び強度ごとに固定されており、セメント量を小さくするために水セメント比を増大させるのは許されないからである。これらの制約から単位セメント量の削減は、最大でもマイナス20kg/m³程度が限度とされている。

【図2】 セメント量を20kg /m³減らしても2℃しか下がらない



普通セメントで単位セメント量を20kg /m³減らしても、コンクリートの中心温度は2℃程度しか下がらない。
ただし、中庸熱セメントに変えると、約10℃の温度低下が見られた

【図3】 応力強度比が1.3以下であれば有害なひび割れは生じにくい



基礎梁コンクリートの応力強度比の変化による、ひび割れ幅の変化を示した。
梁の長さが9m以下では、応力強度比が1.3以下であればひび割れ幅は0.4mm以下に収まる
(資料：日本建築学会の「マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針」)

図4 温度応力は4つの要素に左右される

$$\sigma_t = \Delta T \times \lambda \times \alpha \times E_c$$

σ_t	温度応力
ΔT	温度変化
λ	拘束度（収縮や膨張を拘束する度合い）
α	線膨張係数（1℃当たりの長さ変化の割合）
E_c	ヤング係数

温度応力は、温度変化、拘束度（コンクリートの収縮や膨張を拘束する度合い）、線膨張係数（1℃の温度変化で生じるひずみ）、ヤング係数の積で表される。これらの数値が小さいほど温度応力も小さくなる

それでは、マイナス20kg/m³のセメント量削減でどれほどの効果があるのだろうか。

これを示したのが図2である。水セメント比50%の普通セメントを用いたコンクリートで、単位セメント量を370kg/m³から350kg/m³に減らす場合を想定。1m厚さの部材を対象として、中心部の温度変化を示した。この図から、20kgのセメント量を削減しても、温度上昇の差はわずか2℃程度にすぎないことが分かる。ひび割れリスクの抑制にはほとんど効果がない。

温度ひび割れリスクの指標

続いて、2つ目のポイントについて解説する。

日本建築学会の「マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針」（以下マスコン指針）では、温度ひび割れリスクの指標として、応力強度

比が採用されている。応力強度比は、設計時に算定される温度応力の予測値をひび割れ強度の予測値で除した値で、大きいほどひび割れリスクが大きいことを表す。

マスコン指針では、地下外壁など漏水の懸念があって、漏水抵抗性を確保したい場合には応力強度比を0.8以下に、一般的な環境では鉄筋の腐食を抑制し耐久性を確保することを念頭に1.3以下に抑えることを目標値として示している。

前者は、温度ひび割れをできるだけ回避する、後者はひび割れを許容するが有害とならないように抑制するという考えに基づいている。この場合の有害とは、ひび割れ幅0.4mmを超える場合を指し、応力強度比がおおむね1.3以下であれば、ひび割れ幅0.4mm以下を実現できるとの解析結果による（図3）。

以上の前提を踏まえ、ここからは応力強度比を小さくし、設計や施工

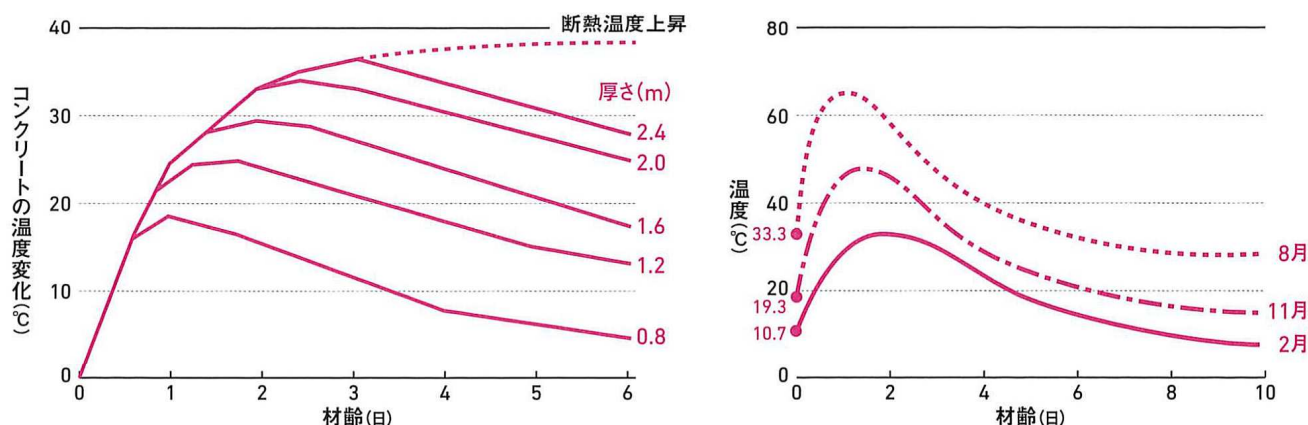
をこれらの許容範囲に収めるための具体的な方策について述べる。なお、応力強度比の分母であるひび割れ強度は、コンクリートによる違いが小さいので、応力強度比を小さくすることは分子にある温度応力を低減することとほぼ同義となる。

温度応力の算定式

マスコンクリート部材の温度応力 σ_t は、単純化すると図4のように表される。この図にあるように、 σ_t は、(1) 温度変化 ΔT 、(2) 拘束度 λ 、(3) 線膨張係数 α などの積として表される。これらの値が小さいほど温度応力は小さく、温度ひび割れのリスクが軽減される。

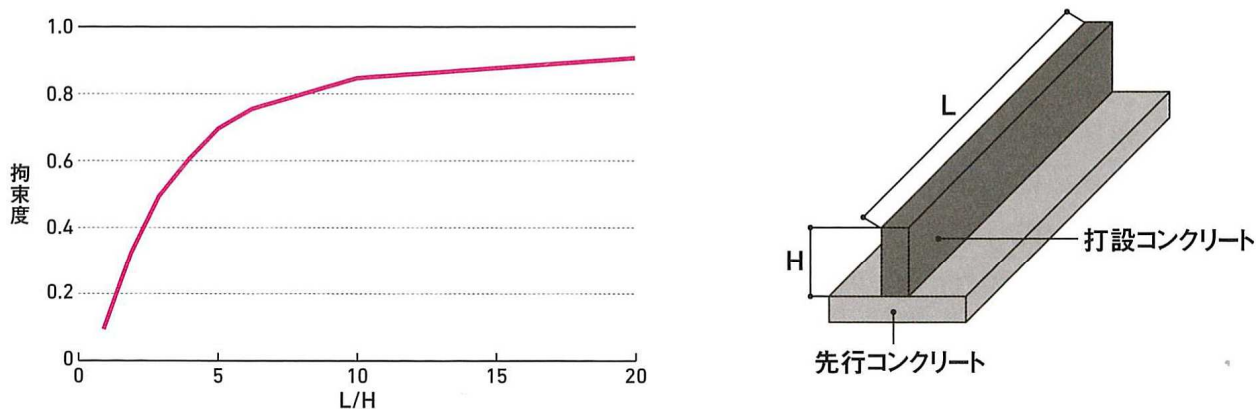
第一の要因である ΔT は、単位セメント量を低減しても効果的に下げることができないことを図2で述べた。しかし同じ図から、セメントの種類を中庸熱セメントに変えると、同じセメン

図5 温度上昇は部材の厚さと施工時期に左右される



左図は、コンクリートの部材厚さによって、コンクリートの温度がどう変化するかを示したものの。厚さが大きいほど温度上昇が大きい。
右図は、施工時期の違いによるコンクリートの温度変化を示したものの。夏季施工では30℃近い温度変化がある（資料：日本建築学会のマスコン指針）

図6 「長くて低い壁」は温度ひび割れが発生しやすい



左のグラフは、基礎梁が先行コンクリートから受ける拘束度を調べたもの。基礎梁の長さLと高さHの比による変化を示した。
梁の長さが大きく、高さが小さいほど拘束度が増大する傾向がある

ト量でも普通セメントに比べ温度変化が顕著に小さくなることが分かる。

このようにセメントの種類を変更することは有効であるが、普通セメントを高炉セメントB種に変更しても、これまで一般にいわれてきた傾向と異なり、ほとんど効果は見られない。この点に

は注意が必要である。

また、図5にあるように部材の厚さ、施工時期により ΔT は大きく異なる。

図5 左で、部材厚さの影響は大きく（部材の長さではないことに注意）、厚くなるほど顕著に ΔT が増大する。また、図5 右の施工時期も影響が大

きい。特に夏季施工の温度変化が大きいので注意したい。

拘束度の抑制も重要に

拘束度 λ とは、自由な変形を妨げられる度合いである。乾燥収縮による

ひび割れでも、ひび割れの発生に影響を与える要素として、繰り返し説明してきた。

λ は、温度ひび割れでも同様に重要である。乾燥収縮ひび割れの場合は、部位で拘束度がおおむね決まり、パラペットや基礎梁上の壁部材などで拘束度が大きくなることを述べた。マスコンクリート部材の場合の拘束度は、一度に施工する数量に大きな影響を受ける。

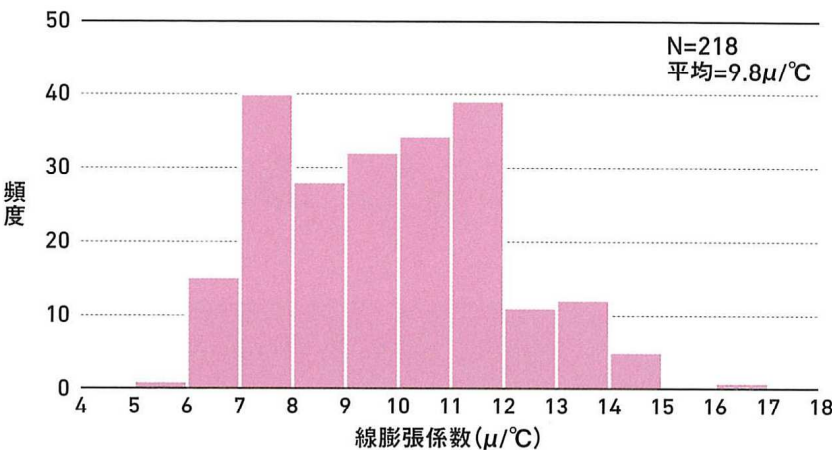
図6は、基礎梁の施工を例に取り、先行して打設したコンクリートからどのような拘束を受けるかを調べたものだ。基礎梁の長さLと高さHの比によって、拘束度がどう変化するかを示した。図からL/Hが大きくなるほど（Lが大きく、Hが小さいほど）拘束度が増大する傾向が分かる。つまり、基礎梁が先行コンクリートから受ける拘束度は、施工する長さLを小さくすれば効果的に低減でき、施工高さHを高くするほどよい。

図6から、2mの高さの梁を長さ30m施工するのと比べ（L/H=15）、同じ高さで長さ10mの施工（L/H=5）では拘束度が0.2程度低減でき、図4に従えば温度応力は20%程度小さくできることになる。

線膨張係数の影響

最後に述べる線膨張係数 α は、重要性があまり知られていないが、その影響は非常に大きい。 α は、1℃の温度変化に対して生じるひずみを表している。図4から、他が同一の条件であっても温度応力は α に比例して増

図7 コンクリートの線膨張係数にはばらつきがある



コンクリートの線膨張係数は、平均で10μ/℃程度だが、ばらつきが大きい。5～15の範囲に広く分布している

図8 ばらつきの原因は骨材の種類による違い

線膨張係数がばらつく原因の1つは、骨材の種類による違いだ。石灰岩の碎石骨材では小さく、砂岩などは大きい（資料：日本建築学会のマスコン指針）

骨材の種類	コンクリートの線膨張係数 (× 10 ⁻⁶ /°C)
砂利	12.2
花こう岩	8.6
珪岩	12.2
粗粒玄武岩	8.5
砂岩	10.1
石灰岩	6.1

減するから、その影響は一般に最も重要視されるΔ Tと同様に大きい。

α は、平均で10μ/℃程度であることが知られている。しかし、コンクリートによってばらつきが大きく、5～15の範囲に広く分布している（図7）。このばらつきの原因の1つは、使用す

る骨材の種類であることが知られている。 α は、石灰岩の碎石骨材では小さく、砂岩などでは大きい（図8）。このことから、石灰岩碎石の骨材を使用することがマスコンクリートの温度ひび割れ抑制に有効であることを覚えておいてほしい。

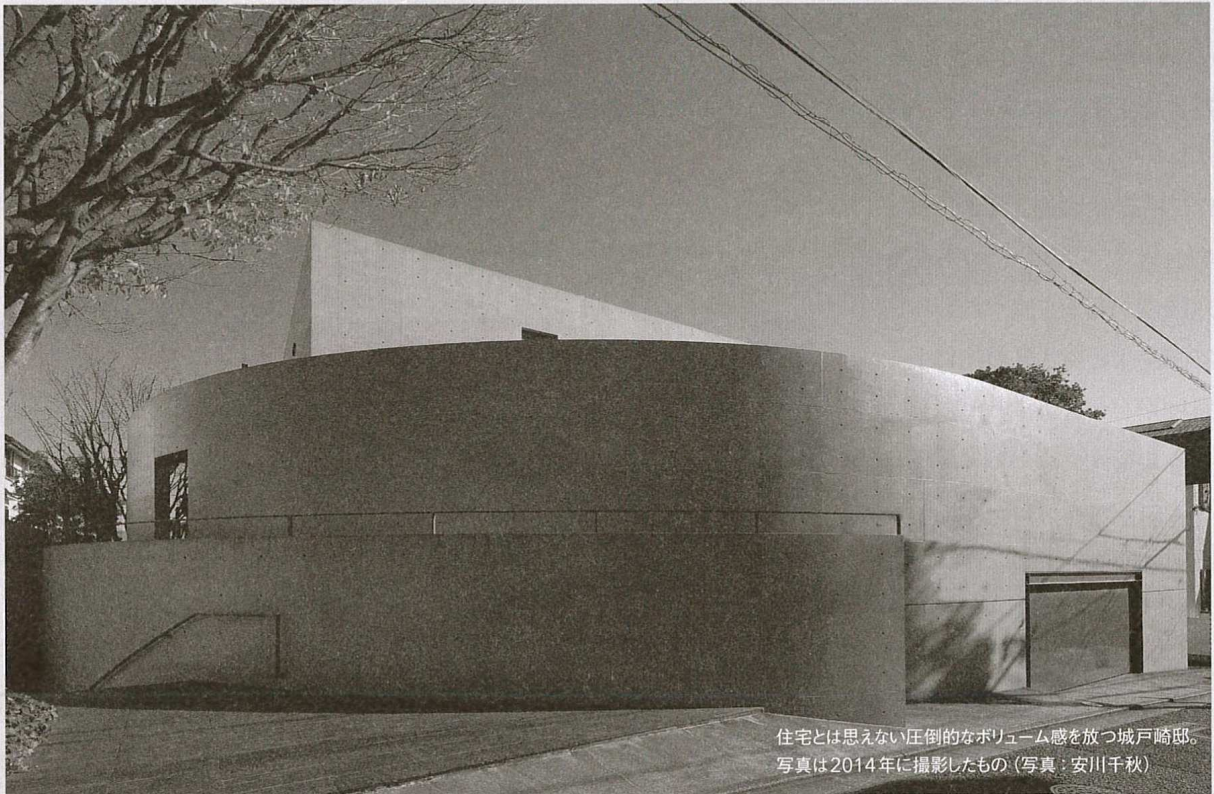
ここがポイント

温度ひび割れを抑制するには、
温度変化量、拘束度、線膨張係数などに
着目する必要がある

コンクリートの線膨張係数は、ばらつきが大きい。
その原因の1つは、**骨材の種類による影響**である

コンクリートこぼれ話 ②

名作に見る補修の大切さ



住宅とは思えない圧倒的なボリューム感を放つ城戸崎邸。
写真は2014年に撮影したもの(写真:安川千秋)

西

の住吉、東の城戸崎——。東京・世田谷区の閑静な住宅地に建つ城戸崎邸は、安藤忠雄氏の代表作の1つです。

この住宅を初めて見た人は、新築の住宅だと思うかもしれません。1986年の完成から約30年が経過するのに、打ち放しコンクリートの外観には、汚れやクラックがほとんど見当たりません。建て主でもあり、建築家でもある城戸崎博孝氏(城戸崎建築研究所代表)が、絶えず最先端の補修、塗装技術を導入しながら、美観や耐久性の維持に並々ならぬ熱意を注いできたからです。

最初に補修したのは、竣工から8年が経過した95年8月のこと。まず、躯体の微細なひび割れにエポキシ樹脂を注入して補修。続いて、浸透性吸水防止剤を塗布した上に中塗り材を重ね、フッ素樹脂クリア塗料を上塗りして二回施工しました。

2001年には、樹液による汚れが激しかった北面の壁6m²に、前年に市販され始めたばかりの光触媒塗料を塗布しています。光触媒塗料とは、紫外線によって有機物を分解するセルフクリーニング機能を備えた塗料です。

さらに、11年3月には静電反発塗料(光酸化塗料)をコンパネ幅の上部2面に試験的に施工しました。光酸化塗料の特徴は、汚れを壁面に寄せ付けられない性質を備えていること。もともと、有機物系の汚れはプラスの電化を帯びたものが多いのですが、光酸化塗料にもプラスの電荷を持たせることで相互に電気的な反発力を生む仕組みです。まだ、導入実績の少ない新しい塗料です。

城戸崎氏が汚れや耐久性に細心の注意を払ってきたからこそ、新築同然の美観を維持しているのでしょう。城戸崎邸は、メンテナンスの大切さを教えてくれる住宅です。

(文責=日経アーキテクチャ編集)