

マスコンクリート用ひび割れ誘発目地工法の開発と適用

酒 井 正 樹 神 代 泰 道
堀 田 和 宏 都 築 正 則

Development and Application of Crack-Control Joints for Massive Concrete

Masaki Sakai Yasumichi Koshiro
Kazuhiro Hotta Masanori Tsuzuki

Abstract

Most underground retaining walls are constructed from massive concrete, which causes thermal cracks to appear in wall due to heat generation. Crack control joints are generally used as countermeasures to prevent cracking, but they necessitate section loss rates of approximately 20% -30% of a wall's diameter. The authors developed a new crack-control joint, installed only in the surface region where tensile stress is caused by the temperature differential between the inner and outer layers of massive concrete. Temperature stress analysis confirmed that tensile stress was concentrated in the experimental crack-control joint. In field application to walls at a construction site, cracking was not observed anywhere other than the installation location of the experimental crack-control joint.

概 要

地下擁壁の多くはマスコンクリートとなり、温度ひび割れの発生が懸念される。一般に壁状部材ではひび割れ誘発目地による対策が有効であるが、壁厚の2～3割程度の断面欠損率が必要とされるため、断面寸法の大きな地下擁壁への適用は、施工手間やコスト増加の観点から合理的ではなかった。そこで、マスコンクリート特有の打込み直後に内外温度差が生じる現象を利用して、打ち込み直後に引張応力が発生する表層領域のみに誘発目地を設置する新たなマスコンクリート用ひび割れ誘発目地工法を開発した。本工法によれば、設置が容易で、小さい断面欠損率で温度ひび割れを誘発できる。温度応力解析により、誘発目地部に引張応力の集中が認められることを事前に確認し、実構造物へと適用した。適用の結果、ひび割れ誘発目地の設置箇所以外でのひび割れ発生は認められず、本工法の効果が確認された。

1. はじめに

マスコンクリートの打込み直後は、セメントの水和発熱により、部材の中心部では温度が上昇し、部材の中心部と表層には内外温度差が生じるため、コンクリートの熱膨張の差から、表層に温度ひび割れが発生しやすい(これを、内部拘束による温度ひび割れという)。また、その後の温度降下時には、コンクリートの熱収縮が地盤に拘束されることで、断面を貫通する鉛直方向の温度ひび割れが発生しやすい(これを、外部拘束による温度ひび割れという)。地下擁壁をはじめとする壁状部材では、特に外部拘束による温度ひび割れが発生するリスクが高く、漏水や鉄筋腐食を抑制するため、ひび割れ発生を防止もしくは低減する対策を講じる必要がある。

壁状部材の温度ひび割れ対策として、コンクリートの調査面からは、低発熱性のセメントの使用、膨張材の使用、単位セメント量を小さくするなど、施工面では打込み温度の低減などが挙げられる。これらは、いずれも温度ひび割れの直接的な原因である温度応力を小さくする対策である。一方、温度ひび割れの発生位置を制御して、その位置で漏水や鉄筋腐食の対策を行う「ひび割れ誘発

目地工法」も極めて有効な対策工法とされる。

本報では、マスコンクリートの打込み直後に生じる内外温度差を利用して、小さい断面欠損率で外部拘束による温度ひび割れを誘発できるマスコンクリート用ひび割れ誘発目地工法を開発し、実構造物へと適用した結果について述べる。

2. 本工法の概要

ひび割れ誘発目地工法については、これまでに各種の方法が提案されている。いずれも、特定の断面内に応力を集中させてひび割れを誘発するために、断面欠損材(以下、欠損材という)を壁厚の2～3割程度となるように設置する必要がある。しかしながら、マスコンクリート部材では、欠損材の寸法が大きくなりすぎる。また、型枠面に設置する化粧目地との直線性を確保するためには、コンクリート打込み時の側圧に対する十分な剛性が必要であり、欠損材がずれないように構造鉄筋に強固に固定した上で、コンクリートを打ち込む必要がある。また、設置間隔が長くなると、誘発目地から外れた箇所にひび割れが発生しやすくなる。このように、マスコンクリー

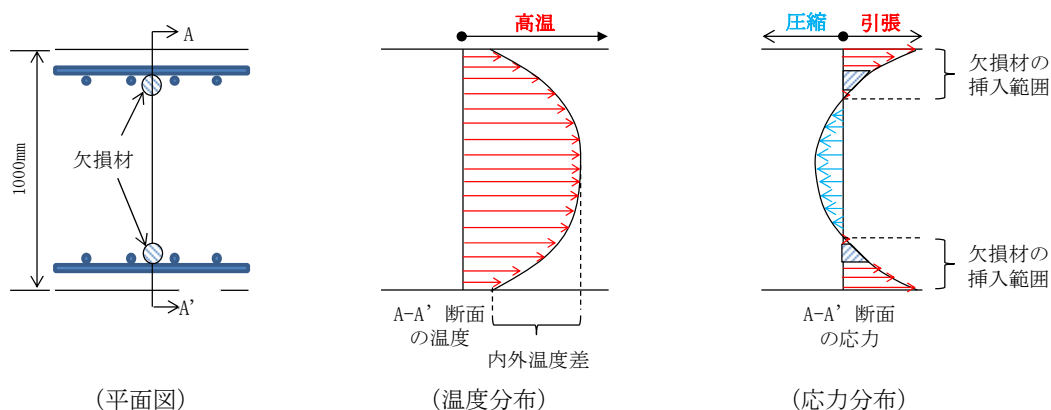


Fig. 1 温度上昇時の温度および応力分布のイメージ (Step 1)

Image of Temperature and Stress Distribution at the Time of Temperature Rising

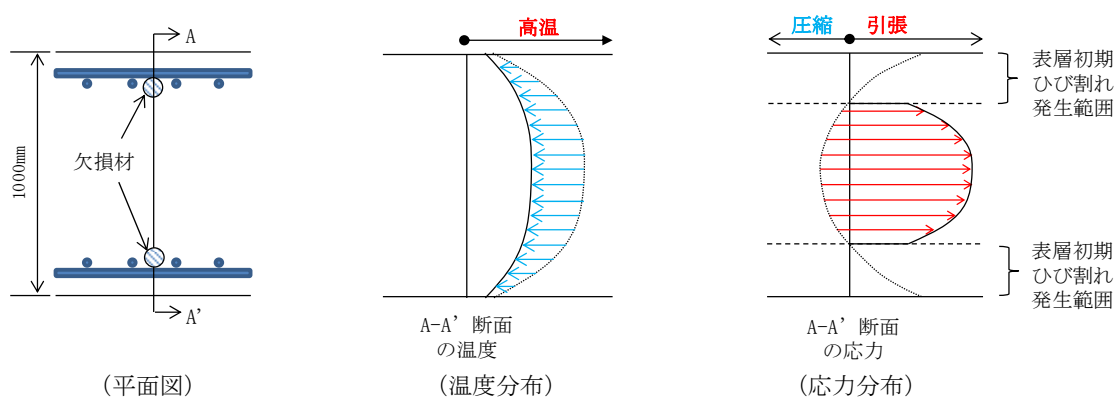


Fig. 2 温度降下時の温度および応力分布のイメージ (Step 2)

Image of Temperature and Stress Distribution at the Time of Temperature Descending

トへの誘発目地の設置は、施工に手間がかかり、費用も増大した。そこで、簡易に設置が可能で、小さい断面欠損率で外部拘束による温度ひび割れを誘発できる、新たなマスコンクリート用ひび割れ誘発目地工法を考案した。

本工法は、2段階のステップに分けて説明することができる。Fig. 1は、温度上昇時の温度および応力分布のイメージである。マスコンクリートの打込み直後には、セメントの水和発熱により、部材の中心部では温度が上昇し、断面内の温度分布は、部材の中心部が高く、表層部では低くなる。この内外温度差により、内部拘束の温度応力として、断面内の中心部には圧縮応力、表層部には引張応力が発生する。なお、この引張応力が発生する領域は壁厚の20～30%である。本工法はこの引張応力が発生する領域に欠損材を設置することを特徴とする。

Fig. 2は、温度降下時の温度および応力分布のイメージである。先に示した第一段階として、温度上昇時において内部拘束の温度応力により発生する表層部の引張領域に欠損材を設置してひび割れを誘発する。第二段階として、その後の温度降下時において発生する引張応力に対して、第一段階で発生した表層領域のひび割れ自体が断面欠損となることで、外部拘束の温度応力による貫通性のひび割れを誘発させやすくする。このため、壁厚に対

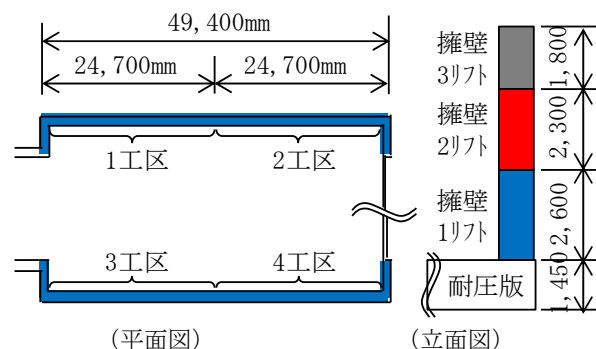


Fig. 3 本工法を適用した地下擁壁

Retaining Wall under the Ground which Applied This Method

しては小さい欠損率でひび割れの誘発が可能となる。

3. 本工法の適用

本工法を実際の建築物に対して適用した。対象建築物は、地下1階に免震層を有する運動施設の周囲に配置された地下擁壁(Fig. 3)である。地下擁壁の壁厚は1,000mm、高さは6,700mmであり、1辺の最大長さは49,400mmである。打込みは高さ方向に3回に分け、10日間隔で行った。

1リフト目の高さは2,600mm, 2リフト目は2,300mm, 3リフト目では1,800mmとした。また, 1回の打込み長さは24,700mmとした。コンクリートの設計基準強度は36N/mm²であり, 打込み時期は1月であった。なお, 地下擁壁の背面は直接ソイルセメント連続壁(以下, SMWという)に接する条件であった。

3.1 ひび割れ誘発目地なしの検討

ひび割れ誘発目地の設置を検討するにあたり, ひび割れ誘発目地を計画しない場合の, 温度ひび割れ発生の危険性に対する検討を行った。検討手法は, 日本建築学会「マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説」²⁾(以下, マスコン指針という)に基づく温度応力解析とし, 施工条件の確認を行った。

温度ならびに温度応力解析には, 3次元の有限要素法を用いた。温度解析では非定常熱伝導解析とし, 応力解析ではコンクリートの打込み直後からの若材齢コンクリートの弾性係数の発現性状や, クリープ性状を反映した。なお, 本検討では, ひび割れの発生要因を温度変化に伴う膨張・収縮としたため, 自己収縮および乾燥収縮の影響は考慮していない。温度ひび割れ発生の危険性は, 式(1)に示すひび割れ指数で評価した。ひび割れ指数の算定には, コンクリート打込み後からの材齢に養生温度の影響を加えた有効材齢を用いた。本検討では, ひび割れの発生は許容するが, 過大なひび割れ幅とはならないように制御するため, ひび割れ指数の目標値を1.0以上とした。

$$I = \frac{f(t_e)}{\sigma(t_e)} \quad (1)$$

I: ひび割れ指数

t_e: 有効材齢(日)

f(t_e): 有効材齢t_eにおける引張強度(N/mm²)

σ(t_e): 有効材齢t_eにおける温度応力(N/mm²)

コンクリートの調合をTable 1に示す。コンクリートの呼び強度は42, 指定スランプは15cmとした。セメントの種類は中庸熱ポルトランドセメント(M)とし, 水セメント比は37.0%, 単位セメント量は465kg/m³とした。温度解析に用いるコンクリートの断熱温度上昇特性は, マスコン指針に示される式(2)を用いた。なお, 式(2)の定数であるK, αは, セメントの種類に応じて設定し, Table 1に併せて示した。

$$Q(t) = K(1 - e^{-\alpha t}) \quad (2)$$

Q(t): 材齢tまでの断熱温度上昇量(°C)

t: 材齢(日)

K: 最終断熱温度上昇量(°C)

α: 断熱温度上昇速度を表す係数

解析に用いた熱特性をTable 2に示す。各材料の比熱, 熱伝導率, 密度は, マスコン指針を参考として設定した。

解析に用いた材料特性をTable 3に示す。コンクリート

の圧縮強度は, 材齢28日で配合強度が発現するものとして設定した。コンクリートの圧縮強度, 引張強度, ヤング係数およびクリープひずみは, マスコン指針に示される式(3)~式(6)により計算した。地盤の材料係数は, マスコン指針を参考として設定した。なお, SMWのヤング係数については, 日本建築学会の「山留め設計・施工指針」³⁾を参考として設定した。

$$f_c(t) = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{(t - s_f)/t_0} \right)^{1/2} \right] \right\} f_{c28} \quad (3)$$

f_c(t): 材齢tの圧縮強度(N/mm²)

t: 材齢(日)

t₀: 材齢を無次元化する値で1日

f_{c28}: 材齢28日の圧縮強度(N/mm²)

s: セメント種類に関わる係数(M: 0.60)

s_f: 硬化原点のための補正項(M: 0)

$$f(t) = 0.18 \times f_c(t)^{0.75} \quad (4)$$

f(t): 材齢tの引張強度(N/mm²)

t: 材齢(日)

f_c(t): 材齢t日の圧縮強度(N/mm²)

$$E(t) = 3.35 \times 10^4 \times k_1 \times k_2 \times (\gamma/2.4)^2 \times (f_c(t)/60)^{1/3} \quad (5)$$

E(t): 材齢tのヤング係数(N/mm²)

t: 材齢(日)

γ: コンクリートの単位容積質量(t/m³)

f_c(t): 材齢tの圧縮強度(N/mm²)

k₁, k₂: 骨材, 混和材による係数(ともに1.0)

Table 1 コンクリートの調合

Mix Proportion of Concrete				
セメント 種類	水セメント比 W/C (%)	単位セメント量 (kg/m ³)	式(2)の係数	
			K	α
M	37.0	465	37.0	60.7

Table 2 解析に用いた熱特性

Analysis Input Value of Thermal Coefficient			
項目	コンクリート	地盤	SMW
比熱(kJ/kg°C)	1.15	2.60	2.60
熱伝導率(W/m°C)	2.70	1.0	1.0
密度(kg/m ³)	2348	1800	1800

Table 3 解析に用いた材料特性

Analysis Input Value of Material Coefficient			
項目	コンクリート	地盤	SMW
圧縮強度(N/mm ²)	式(3)	1	—
引張強度(N/mm ²)	式(4)	10	—
ヤング係数(N/mm ²)	式(5)	50	130
クリープひずみ	式(6)	—	—
ポアソン比(-)	0.2	0.3	0.3
線膨張係数(μ/°C)	10	10	10

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \times \left[\frac{(t - t_0)/t_1}{\beta_H + (t - t_0)/t_1} \right]^{0.3} \quad (6)$$

$$\phi_0 = 1.05 \times (E_c(t_0)/E_{c28})^{-1.04}$$

$$\beta_H = c \times (E_c(t_0)/E_{c28})^4 + 7.6$$

$$c = 117 - 1.11 \times f_{c28}$$

$\phi(t, t_0)$: 材齢28日のヤング係数を基準とした

載荷時材齢を考慮したクリープ係数

ϕ_0 : クリープ係数の終局値

β_H : クリープの進行速度を表す係数

t_0 : 載荷時有効材齢(日)

t_e : 有効材齢(日)

t_1 : 材齢を規格化する値で1日

$E_c(t_0)$: 載荷時材齢 t_0 におけるヤング係数(N/mm²)

E_{c28} : 有効材齢28日のヤング係数(N/mm²)

f_{c28} : 有効材齢28日の圧縮強度(N/mm²)

温度応力解析の解析モデルをFig. 4に示す。解析モデルは、左右の対称性を考慮した1/2モデルとした。境界条件は、コンクリートの上面は散水養生、側面は木製型枠とし、型枠は2日の存置後に脱型する条件とした。各境界における熱伝達率は、マスコン指針を参考として設定した。なお、1/2モデルとした対称切断面については、コンクリートおよび地盤が連続しているため、境界面から熱が入りしない断熱境界とした。

壁厚の中心位置における温度ならびに応力の解析結果をTable 4、解析結果のコンター図をFig. 5、Fig. 6にそれぞれに示す。ここでは、壁厚の中心位置で最高温度となった位置で算定された外部拘束応力を採用した。また、コンター図は時刻歴における最大値をプロットした。

壁厚の中心位置における最高温度は、1リフト目では44.4℃、2リフト目では43.0℃、3リフト目では41.7℃となった。また、最大引張応力は、1リフト目では3.39N/mm²、2リフト目では2.73N/mm²、3リフト目では2.36N/mm²となった。とりわけ、1リフト目と2リフト目では、ひび割れ指数に直すと、目標ひび割れ指数1.0を下回っており、温度ひび割れが発生しやすい状況であった。

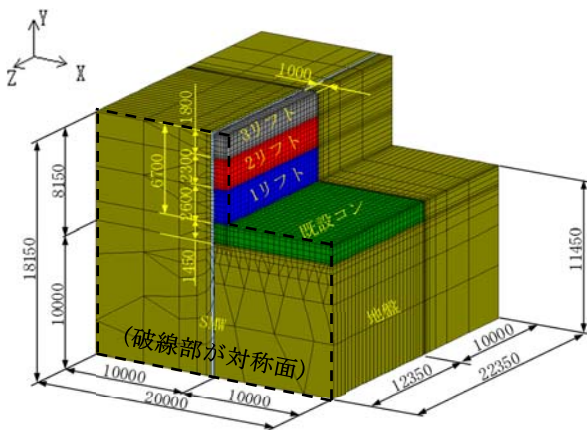


Fig. 4 解析モデル (対称性を考慮した1/2モデル)
Analysis Model (a half model)

Table 4 温度応力解析結果 (壁厚の中心位置)

Analysis Results of Temperature Stress
(Center section of the member)

打込み リフト	打込み 温度 (℃)	最高 温度 (℃)	最大引張 応力 (N/mm ²)	ひび割れ 指数の 最小値
1 リフト	12.0	44.4	3.39	0.73
2 リフト	11.4	43.0	2.73	0.89
3 リフト	11.3	41.7	2.36	1.03

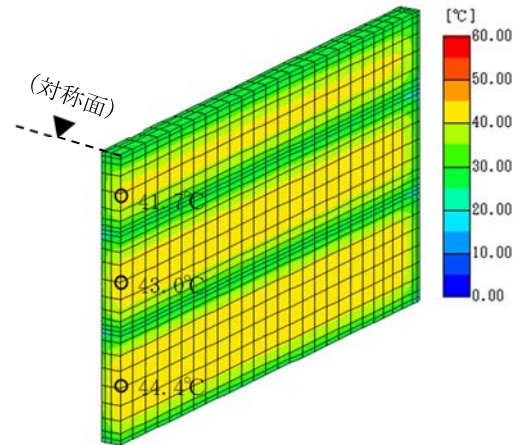
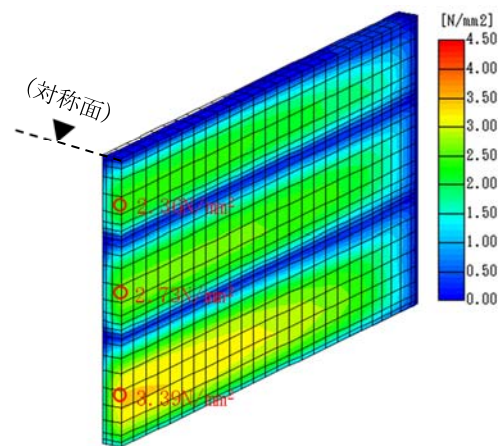
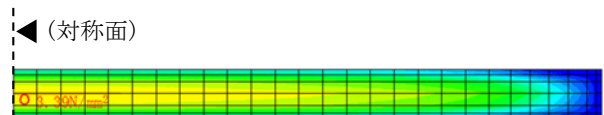


Fig. 5 温度解析結果のコンター図 (壁厚の中心位置)

Analysis Results of Temperature
(Center section of the member)



(a) 壁厚の中心位置の図



(b) 1リフト目の打込み高さ中央を上から見た図

Fig. 6 応力解析結果のコンター図 (壁厚の中心位置)

Analysis Results of Temperature Stress
(Center section of the member)

3.2 ひび割れ誘発目地ありの検討

ひび割れ誘発目地なしの場合、温度応力解析による検討では、温度ひび割れが発生しやすい状況と評価されたため、本ひび割れ誘発目地工法の適用を検討した。ひび割れ誘発目地の設置状況をFig. 7、配置をFig. 8に示す。

先に検討した、ひび割れ誘発目地なしの場合の温度応力解析結果から、温度上昇時に内部拘束によって発生する表層部の引張領域の範囲は、Fig. 7に示すとおり表層から240mm程度と算定された。そのため、この範囲に2～3割の欠損率を確保するように欠損材の大きさを決定した。欠損材は、呼び径65mm（外径76mm）の硬質ポリ塩化ビニル管とし、これを建物側の表層付近の鉄筋に固定した。なお、欠損材の断面欠損率は、表層部の引張領域の範囲240mmに対しては32%となるが、壁厚1,000mmに対しては7.6%に過ぎない。SMWに接する外部側では、非定常熱伝導解析の結果、内外温度差は小さかったため、ひび割れ誘発目地は屋内側のみに設置した。

ひび割れ誘発目地の設置間隔は、建物の柱スパンである4.4mとし、表層には化粧目地を設けた。なお、硬質ポリ塩化ビニル管の内部にはグラウトを充填した。また、ひび割れ誘発目地を設置した周囲の横筋には、防錆剤を塗布した。

本工法の考え方に基いて、ひび割れ誘発目地を表層領域のみに設置することで、先に示した温度降下時の温

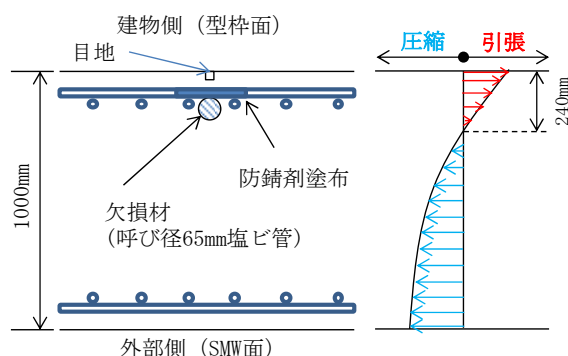


Fig. 7 誘発目地の設置状況
Setting Situation of Crack Control Joint

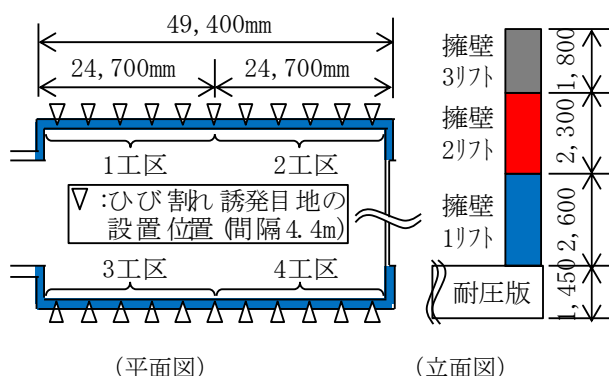


Fig. 8 ひび割れ誘発目地の配置
Setting Position of Crack Control Joint

度および応力分布のイメージ (Fig. 2) のとおり、ひび割れ誘発目地部において引張応力が集中するかどうかの確認のため、温度応力解析による事前検討を行った。解析条件のうち、コンクリートの調合、解析に用いた熱特性および材料特性は、3.1節における解析条件と同一とした。

ひび割れ誘発目地部の解析モデルをFig. 9に示す。本工事において、ひび割れ誘発目地は4,400mmピッチで設置する計画であり、解析モデルでは、計画した打込み長さ

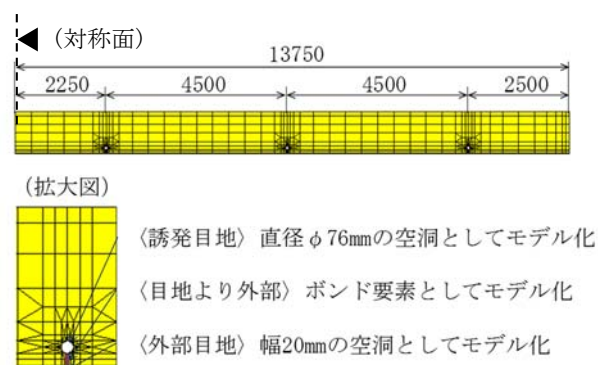


Fig. 9 誘発目地部の解析モデル
(対称性を考慮した1/2モデル)
Analysis Model of Crack Control Joint (a half model)

Table 5 誘発目地部の温度応力解析結果
(壁厚の中心位置)

打込み リフト	打込み 温度 (℃)	最高 温度 (℃)	最大引張 応力 (N/mm ²)	ひび割れ 指数
1 リフト	13.1	47.7	4.07	0.75
2 リフト	11.5	44.4	3.54	0.88
3 リフト	16.8	52.3	3.57	0.75

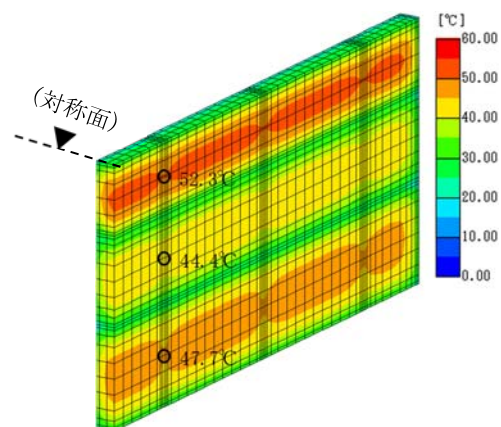


Fig. 10 誘発目地部の温度解析結果のコンター図
(壁厚の中心位置)
Analysis Results of Temperature
(Center section of the member)

に相当する5スパン分 (Fig. 9は、1/2モデルのため2.5スパン分) を再現した。使用した欠損材は、呼び径65mm (外径76mm) の硬質ポリ塩化ビニル管であるが、温度応力解析による検討では、コンクリートとの付着力は無視できるものと仮定して、欠損材の部分を空洞としてモデル化した。また、欠損材より表層側 (欠損材と化粧目地の間の領域) のコンクリートについては、発生した温度応力がコンクリートの引張強度を上回った時点で、コンクリートにひび割れが発生するものと仮定して、ひび割れ発生以後の応力伝達を行わないボンド要素とした。

壁厚の中心位置における誘発目地部の温度ならびに応力の解析結果をTable 5, 解析結果のコンター図をFig. 10, Fig. 11にそれぞれに示す。

壁厚の中心位置における最高温度は、誘発目地なしの場合 (Table 4) と比較して、 1.4°C ～ 10.6°C 高くなった。これは、計画時点からの打込み日の変更に伴い、コンクリートの打込み温度が高くなったことによる。誘発目地部の最大引張応力は、誘発目地なしの場合 (Table 4) と比較して、約2割大きくなった。また、引張応力は打込み長さの中央部に近いほど大きく、端部へ近づくほど小さくなった。これは、長手方向における打込み長さの中央ほど外部拘束が大きくなるためと考えられ、誘発目地なし場合の温度応力解析結果で得られた傾向と同様であった。

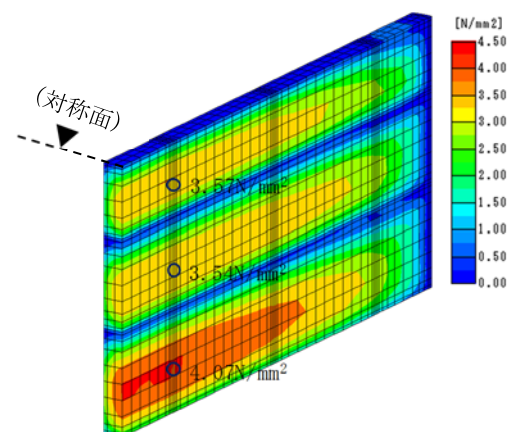
断面中心部における応力と誘発目地部における応力を打込み長さに沿って抜き出したものをFig. 12に示す。誘発目地部において、温度応力が局所的に大きくなることが確認された。

以上より、誘発目地部に発生した応力集中により表層領域にひび割れが発生し、このひび割れが、以降の温度降下時に断面の内部に向かって進展していくことで、貫通ひび割れが形成されていくものと推察された。

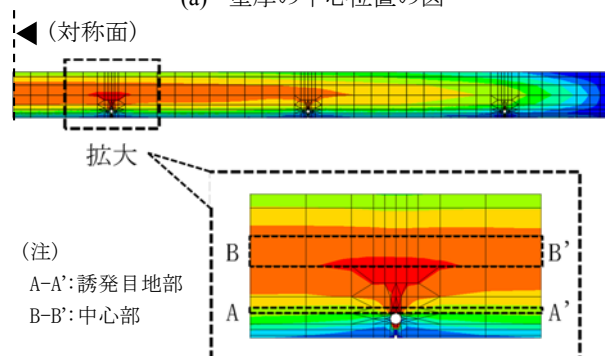
3.3 実適用結果

コンクリートの打込みから7～8ヶ月経過後に、ひび割れ誘発目地を適用した箇所について、目視によりひび割れ発生の有無の確認を行った。ひび割れ調査結果のまとめをTable 6に、ひび割れ発生位置をFig. 13に示す。なお、工事の進行に伴って、一部の箇所ではひび割れの発生状況が確認できなかった。ひび割れ誘発目地に発生したひび割れの状況をPhoto 1に示す。

1リフトでは、ひび割れ誘発目地の調査箇所22ヶ所に対し16ヶ所 (73%) でひび割れの発生を確認した。ひび割れ誘発目地に発生したひび割れ幅は $0.05\sim 0.3\text{mm}$ であった。2リフトでは、調査箇所13ヶ所に対し10ヶ所 (77%) でひび割れの発生を確認した。誘発目地に発生したひび割れ幅は $0.1\sim 0.3\text{mm}$ であった。3リフトでは、調査箇所8ヶ所に対し2ヶ所 (25%) でひび割れの発生を確認した。誘発目地に発生したひび割れ幅は 0.05mm であった。いずれも誘発目地部以外の箇所でひび割れの発生は認められなかった。なお、ひび割れ誘発目地の設置箇所において、ひび割れ発生が認められなかった位置は、打込み長さの両端の近傍が多かったが、これは、温度応力解析におい



(a) 壁厚の中心位置の図



(b) 1リフト目の打込み高さ中央を上から見た図

Fig. 11 誘発目地部の温度応力解析結果のコンター図 (壁厚の中心位置)

Analysis Result Figure of Temperature Stress Contrast (Center section of the member)

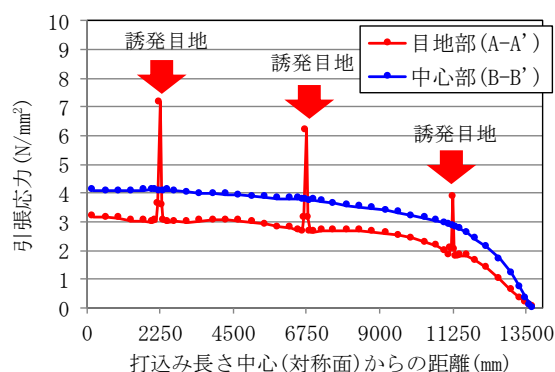


Fig. 12 温度応力解析結果 (壁厚の中心位置)

Analysis Results of Temperature Stress (Center section of the member)

Table 6 ひび割れ調査結果

Result of Crack Survey by Sight

打込みリフト	調査箇所数	目地部のひび割れ箇所	ひび割れ誘発率	目地部のひび割れ幅	目地以外のひび割れ
1リフト	22	16	73%	0.05～0.3	なし
2リフト	13	10	77%	0.1～0.3	なし
3リフト	8	2	25%	0.05	なし

て引張応力が小さく算定された箇所と概ね一致している。

以上より、目視調査の結果、誘発目地位置以外のひび割れの発生は認められず、高いひび割れ集中率となり、本工法の効果が確認された。

4. まとめ

マスコンクリート特有の現象を利用したひび割れ誘発目地工法を開発し、実構造物へ適用した。その結果、以下のことが分かった。

- 1) 内外温度差によって発生するコンクリート表層部の引張領域に断面欠損材を設置することで、壁厚1000mmに対して76mmと、標準に対して小さい断面欠損でも、温度降下に伴う温度ひび割れを誘発目地位置に発生させることができた。
- 2) 目視調査の結果、誘発目地位置以外のひび割れの発生は認められず、高い集中率であった。
- 3) 本工法は小さい断面欠損率で温度ひび割れを誘発できるため、配筋条件の制約を受けず、設置が容易で、費用対効果の高いひび割れ誘発目地工法であると考えられる。

参考文献

- 1) 近松竜一，阿部諭史，桜井邦昭：マスコンクリート用ひび割れ誘発目地工法「センタープレート目地」の開発，大林組技術研究所報No. 75, 2000.12
- 2) 日本建築学会編：マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針（案）・同解説，240p，2008.2
- 3) 日本建築学会編：山留め設計・施工指針，382p，2002.6

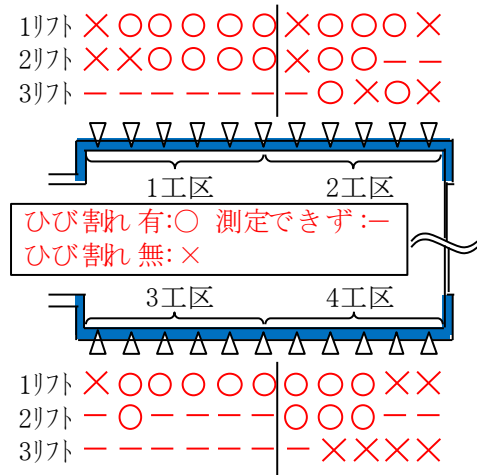


Fig. 13 ひび割れ発生位置
The Positions of Generating Concrete Crack



Photo 1 誘発目地に発生したひび割れの状況
Concrete Crack of Crack Control Joint Position