

ボックスラーメン構造物における 温度ひび割れの制御方法に関する調査, 研究

田附伸一¹・石橋忠良²・古山章一³・大庭光商⁴

¹正会員 東日本旅客鉄道株式会社 建設工事事務所 構造技術センター 主席
(〒151-8578 東京都渋谷区代々木 2-2-2)

²フェロー会員 工博 東日本旅客鉄道株式会社 建設工事事務所 構造技術センター 所長
(同上)

³正会員 東日本旅客鉄道株式会社 東北工事事務所 奥羽課 担当課長
(〒980-8580 宮城県仙台市青葉区五橋 1-1-1)

⁴正会員 東日本旅客鉄道株式会社 東北工事事務所 工事管理室 副課長
(同上)

ボックスラーメン構造物は、地中構造物として多く活用されている。一般に底版コンクリートの打設後、側壁、頂版を構築するが、この場合、側壁に温度ひび割れが発生しやすく、このひび割れから漏水等の問題が生じている。本研究は、ボックスラーメン構造物の温度ひび割れの制御を目的として、実構造物に施工された温度ひび割れ誘発目地と温度ひび割れ発生状況の調査・分析を行なったものである。その結果、断面欠損率、L/H（誘発目地間隔Lと構造物高さHとの比）、温度降下量の3つの要因と温度ひび割れ発生との関係から、温度ひび割れを効果的に制御するための知見を得た。

Key Words : *box rigid frame structure, temperature crack, crack inducement joint, temperature depression quantity*

1. はじめに

コンクリートの水和反応による温度変化に起因するひび割れ（以下、温度ひび割れという）は、ボックスラーメン構造物やマスコンクリート構造物においてしばしば発生する。コンクリートが硬化する過程で、温度変化によるコンクリートの膨張・収縮を拘束されるとコンクリート内に応力が生じる。この応力は温度応力と呼ばれ、内部拘束による応力と外部拘束による応力に分けられる。内部拘束による応力が原因で発生するひび割れは、表面に不規則に発生し、外部拘束による応力が原因で発生するひび割れは、コンクリート断面を貫通するひび割れとなる。ボックスラーメン構造物における温度ひび割れは、側壁が厚いほど、構造物延長が長いほど発生する確率が高くなる。

ボックスラーメン構造物の側壁は、既に施工した底版コンクリートが拘束体となるため、温度ひび割れが発生しやすい。このように部材下端を拘束されるような壁状構造物では、一般的に壁厚50cm以上となる場合、

マスコンクリートとして、温度ひび割れの検討を要するとされている¹⁾。底版コンクリートの外部拘束により、側壁には鉛直方向に断面を貫通する温度ひび割れが生じるため、漏水や鉄筋腐食の原因となる。このような背景から、ボックスラーメン構造物の水密性・耐久性を向上させるために、温度ひび割れの発生を制御する目的で、温度ひび割れ誘発目地（以下、誘発目地という）の設置が実施されてきた。

誘発目地は、構造物の長手方向に一定間隔で断面欠損部を設け、その断面欠損部に温度ひび割れの発生を制御する方法であり、誘発目地部内に配置した止水板により漏水や鉄筋の腐食を防止する。

温度ひび割れの発生を確実に制御するためには、誘発目地間隔および断面欠損率の設定が重要となる。一般的に誘発目地間隔は4m~5m、断面欠損率は20%以上とされている²⁾が、過去に誘発目地を施工した構造物で、この条件を満足させた場合でも誘発目地部以外の箇所に温度ひび割れが発生し、十分なひび割れ制御効果が得られないものがあつた。著者らは、ボックスラ

一メン構造物の温度ひび割れ制御を目的として、実際の構造物における誘発目地の施工および温度ひび割れの発生状況について調査・分析を行ってきた。

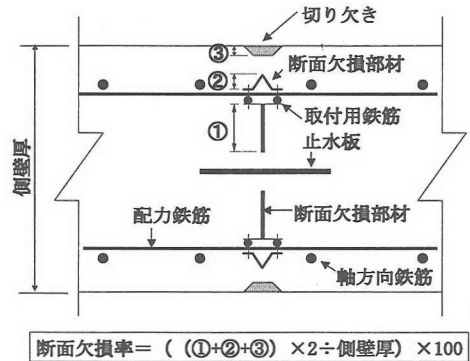
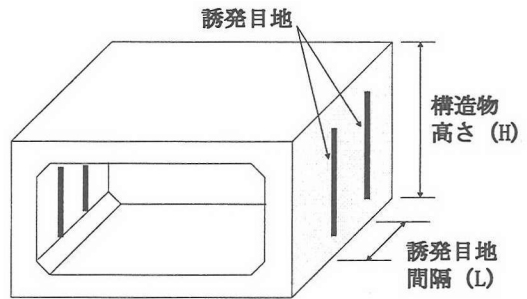
本稿では、誘発目地のパラメータである L/H (誘発目地間隔 L と構造物高さ H の比) と断面欠損率の温度ひび割れとの関係から得た知見、および施工管理に用いる温度降下量²⁾の簡易推定式について報告する。

2. 誘発目地と温度ひび割れ

(1) 誘発目地

誘発目地部に温度ひび割れを制御し、誘発目地部以外の発生を防ぐには、適切な誘発目地間隔を設定する必要がある。また、誘発目地部にひび割れを制御できるように、確実に部材断面を欠損させる必要がある。

図-1 にボックスラーメン構造物の L/H、断面欠損率の略図を示す。L/H は構造物に設置する誘発目地間隔 (L) と構造物高さ (H) との比である。断面欠損率は、断面欠損部材の断面方向の長さや切り欠き深さ等の合計と側壁部材厚さとの比を百分率で示したものである。



$$\text{断面欠損率} = (①+②+③) \times 2 \div \text{側壁厚} \times 100$$

図-1 L/H・断面欠損率

(2) 実構造物の調査

表-1 にボックスラーメン構造物の施工を通じて調査した結果を、図-2 にボックスラーメン構造物の大きさの分布を示す。人道用、車道用を含めて 37 のボックスラーメン構造物であり、構造物の延長は 9.0m~24.7m、構造物高さは 3.0m~9.8m の範囲である。単位セメント量は 268kg/m³~322kg/m³、水セメント比 (W/C) は 48.5%~55.0%、側壁部材の厚さは 0.3~1.25m の範囲である。

誘発目地を設置した 29 構造物は、断面欠損率が 20% 以上確保されており、誘発目地間隔 (L) は、4.0m~8.0m である。

誘発目地を設置していない 8 構造物の L/H は、構造物延長を L として示した。

温度ひび割れ発生の有無の確認は、コンクリート打設から 4 週目までの間に、構造物の側壁部を中心に目視により行なった。

表-1 の温度ひび割れの発生箇所「誘発目地部」と示している構造物は、誘発目地部に温度ひび割れを制御できたものである。「誘発目地部外」と示している構造物は、誘発目地部には温度ひび割れの発生が見られず、それ以外の箇所温度ひび割れの発生を確認したものである。「誘発目地部内外」と示している構造物は、誘発目地部とそれ以外の箇所の両方に温度ひび割れが発生したものである。誘発目地を設置していない

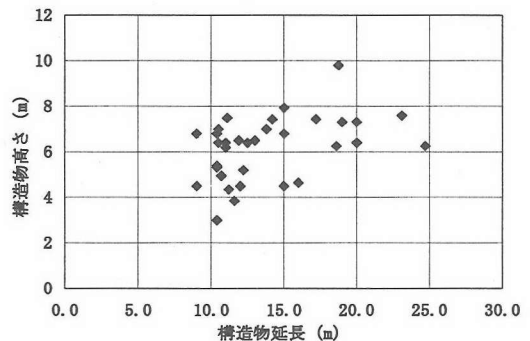


図-2 調査したボックスラーメン構造物の大きさ

構造物については、温度ひび割れの発生本数を示した。また、「中間部に○本」と示した構造物はひび割れ誘発目地を設置していない構造物であり、側壁部を等間隔に分割するようにひび割れが発生している。

構造物番号 11 および 24 は、温度ひび割れが発生しなかった構造物である。

(3) L/H と温度ひび割れとの関係

図-3 に L/H と温度ひび割れの関係を示す。表-1 の「誘発目地部外」のデータを除く 35 構造物のデータを示したものである。

図中の○は誘発目地部のみ温度ひび割れが発生し、誘発目地部以外の箇所では、温度ひび割れが発生しな

表-1 ボックスラーメン構造物調査結果

構造物 番号	延長 (m)	高さ H(m)	側壁厚 (m)	誘発目地間 隔L(m)	L/H	断面欠損率 (%)	単位セメント量 (kg/m ³)	W/C (%)	N値	温度ひび割れの 発生箇所
1	16.0	4.7	0.35	5.0	1.1	40.0	277	54.9	50	誘発目地部
2	10.5	7.0	0.80	5.3	0.8	42.5	283	53.4	50	誘発目地部
3	23.1	7.6	0.80	4.6	0.6	42.5	308	49.3	50	誘発目地部
4	18.8	9.8	0.80	6.9	0.7	42.5	308	49.3	50	誘発目地部
5	10.4	5.3	0.45	5.2	1.0	75.6	285	53.7	10	誘発目地部
6	18.6	6.3	0.85	6.0	1.0	54.1	299	52.5	50	誘発目地部内外
7	24.7	6.3	0.85	8.0	1.3	54.1	299	52.5	50	誘発目地部内外
8	17.2	7.4	0.75	—※1	2.3※2	—	298	52.7	50	中間部に3本
9	14.2	7.4	0.75	—※1	1.9※2	—	298	52.7	50	中間部に1本
10	13.8	7.0	0.80	—※1	2.0※2	—	290	51.0	50	中間部に1本
11	20.0	7.3	0.75	—※1	2.7※2	—	290	51.0	50	発生せず
12	19.0	7.3	0.75	—※1	2.6※2	—	290	51.0	50	中間部に1本
13	15.0	7.9	1.25	7.5	0.9	42.4	295	55.0	50	誘発目地部内外
14	15.0	7.9	1.25	7.5	0.9	26.4	295	55.0	50	誘発目地部外
15	15.0	4.5	1.25	5.0	1.1	42.4	295	55.0	50	誘発目地部内外
16	9.0	4.5	1.25	—※1	2.0※2	—	295	55.0	50	中間部に3本
17	9.0	4.5	1.25	—※1	2.0※2	—	295	55.0	50	中間部に3本
18	12.0	4.5	1.25	4.0	0.9	42.4	295	55.0	50	誘発目地部
19	12.0	4.5	1.25	4.0	0.9	26.4	295	55.0	50	誘発目地部外
20	9.0	6.8	1.00	4.5	0.7	46.0	306	51.6	50	誘発目地部
21	15.0	6.8	1.00	5.0	0.7	46.0	306	51.6	50	誘発目地部
22	11.0	6.2	0.80	5.5	0.9	47.5	306	54.9	30	誘発目地部
23	11.6	3.9	0.60	5.8	1.5	56.7	300	52.7	15	誘発目地部
24	20.0	6.4	1.00	6.5	1.0	50.0	312	48.5	10	発生せず
25	10.4	3.0	0.30	5.2	1.7	46.6	299	54.1	25	誘発目地部
26	10.4	3.0	0.30	5.2	1.7	46.6	300	52.7	15	誘発目地部
27	10.4	5.4	0.80	5.2	1.0	56.7	310	52.6	50	誘発目地部
28	12.2	5.2	0.75	6.1	1.2	45.3	316	51.2	20	誘発目地部
29	11.2	4.4	0.45	5.6	1.3	75.5	300	50.7	5	誘発目地部
30	10.4	6.8	0.70	5.2	0.8	46.6	304	49.7	5	誘発目地部
31	10.7	5.0	0.70	5.4	1.1	46.6	308※3	53.0	5	誘発目地部
32	12.5	6.4	0.70	6.2	1.0	45.7	300	52.7	5	誘発目地部
33	11.0	6.4	0.70	5.5	0.9	45.7	300	52.7	5	誘発目地部
34	10.5	6.4	0.70	5.2	0.8	45.7	300	52.7	5	誘発目地部
35	13.0	6.5	0.80	6.5	1.0	37.5	322※3	51.9	10	誘発目地部
36	11.9	6.5	0.80	5.9	0.9	37.5	322※3	51.9	10	誘発目地部
37	11.1	7.5	0.75	—※1	1.5※2	—	268	54.5	10	中間部に2本

※1:温度ひび割れ誘発目地を設置していない構造物

※3:コンクリート設計基準強度27N/mm²,その他は24N/mm²

※2:構造物延長をLとして算出

かったもの、×は誘発目地部以外の箇所に温度ひび割れが発生したもの、△は温度ひび割れの発生が誘発目地部、またはそれ以外の箇所でも発生しなかったものを示す。

L/Hは0.6~2.7の範囲で施工されている。L/Hが0.9以上では、温度ひび割れが誘発目地部以外の箇所でも発生しており、温度ひび割れの発生を誘発目地部に制御できていなかった。

(4) 断面欠損率と温度ひび割れとの関係

図-4に断面欠損率と温度ひび割れとの関係を示す。

表-1の誘発目地を設置した29構造物のデータを示したものである。

図中の○は誘発目地部にのみ温度ひび割れが発生し、誘発目地部以外の箇所では、温度ひび割れが発生しなかったもの、×は誘発目地部以外の箇所に温度ひび割れが発生したもの、△は温度ひび割れの発生が誘発目地部、またはそれ以外の箇所でも発生しなかったものを示す。

断面欠損率は、26.4%~75.6%の範囲で施工されており、温度ひび割れは概ね断面欠損部に制御されている。しかし、断面欠損率を26.4%で施工した構造物に

○ 誘発目地部にのみひび割れ発生
 × 誘発目地部外にひび割れ発生
 △ ひび割れ発生せず

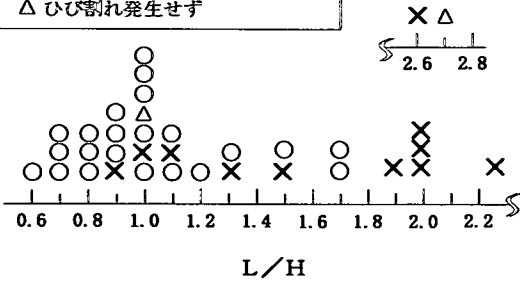


図-3 L/Hと温度ひび割れ

○ 誘発目地部にのみひび割れ発生
 × 誘発目地部外にひび割れ発生
 △ ひび割れ発生せず

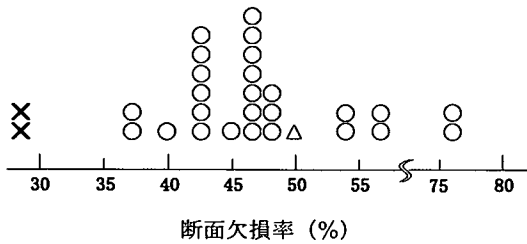


図-4 断面欠損率と温度ひび割れ

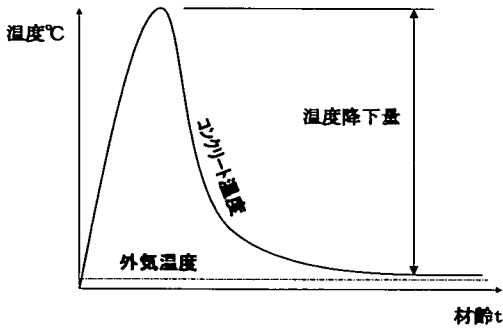


図-5 温度履歴モデル

において、誘発目地部以外に温度ひび割れが発生しており、そのひび割れから漏水が生じていることを確認した。これに対して、断面欠損率37.5%以上の構造物については、誘発目地部以外にひび割れの発生は見られず、漏水も確認されなかった。

3. 温度降下量と温度ひび割れ

(1) 温度降下量の推定

温度降下量とは、水和反応によるコンクリートの温度上昇のピーク値と、コンクリートの膨張・収縮が収

束して、温度が外気温度と同程度になったときの温度差を示すものである。この温度降下量が小さいほど、発生する温度応力も小さくなる。

図-5にコンクリートの温度履歴モデルを示す。

温度降下量は、使用するセメント材料や構造物の部材厚さ、単位セメント量、コンクリート打設時の初期温度および外気温度等により影響を受けることが知られている。温度降下量は、単位セメント量が少ないほど、コンクリート打設時の初期温度が低いほど小さくなる。

コンクリートの温度降下量は、温度解析により推定するのが一般的であるが、解析作業には時間と労力を要する。今回、コンクリートの温度降下量の推定を簡易に行なうことを目的として、次のような手順で検討を行なった。まず、側壁部材厚さ、コンクリート打設時の温度、外気温度をパラメータとした温度解析を行い、側壁部材厚さと温度降下量との関係を明らかにする。その結果を用いて、施工実績データのコンクリート打設時の温度、外気温度、側壁部材厚さから、各構

表-2 温度解析緒元

側壁部材厚さ (cm)		50・75・100・125
コンクリート温度 (°C)		10・15・20・25・30
外気温度 (°C)		0・5・10・15・20・25・30
単位セメント量 (kg/m ³)		300
コンクリート打設順序		底版打設から30日後に側壁部・頂版打設
物性値	比熱 (kJ/kg°C)	コンクリート 1.155 地盤 0.795
	熱伝導率 (W/m°C)	コンクリート 2.70 地盤 3.45
	密度 (kg/m ³)	コンクリート 2450 地盤 2650
	熱伝達率 (W/m ² °C)	8.0

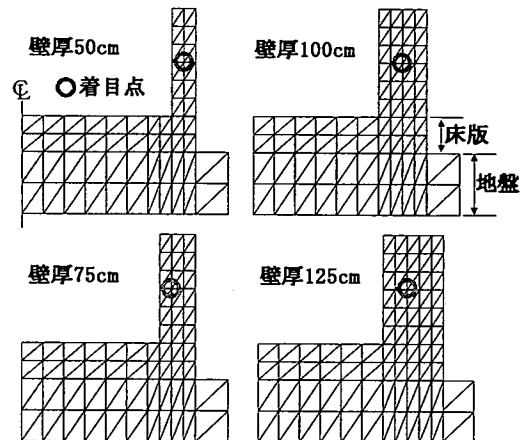


図-6 解析モデル

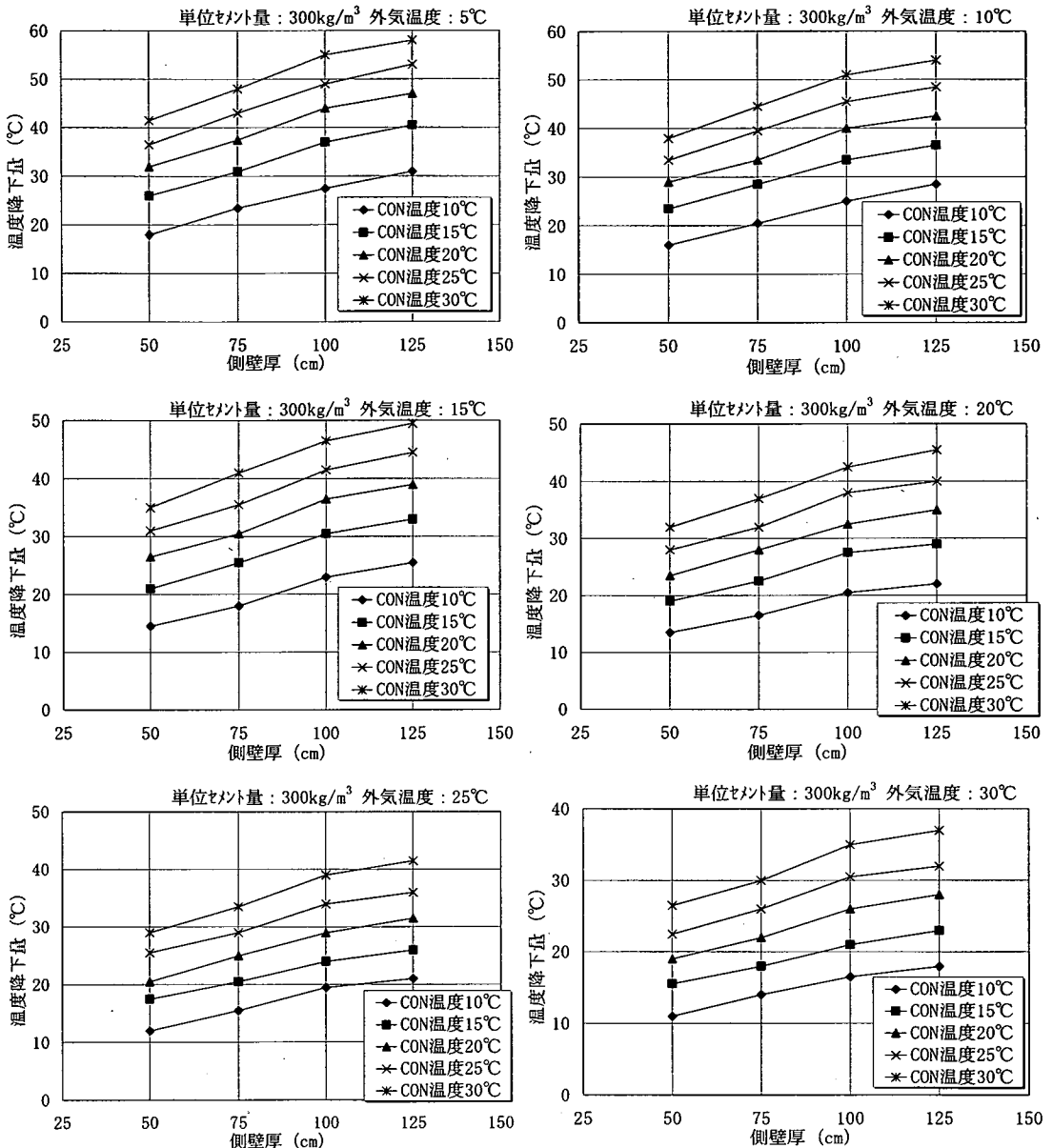


図-7 温度解析結果

造物の温度降下量を推定することとした。

温度解析には、日本コンクリート工学協会の2次元FEM温度解析ソフトを使用した。

表-2に温度解析の緒元を示す。コンクリート打設時の温度は10°C~30°C、外気温度は5°C~30°Cのどちらも5°C刻みで設定し、単位セメント量は普通ポルトランドセメント300kg/m³で解析を行った。解析モデルは側壁部材厚さを50cm、75cm、100cm、125cmの4種類とし、地盤および下床板コンクリートの厚さは変化させていない。

図-6に解析モデルのメッシュを示す。解析モデル

をL型の擁壁タイプとした理由は、温度ひび割れの発生への影響は、打設されるコンクリート部材の高さが支配的であり、ボックスラーメン構造もL型擁壁も側壁部に同様な温度ひび割れが発生することから、簡易的に解析モデルをL型の擁壁タイプで行なった。

温度解析結果の着目点は側壁部において最も温度上昇量が高い節点とした。

(2) 温度降下量の近似式の提案

図-7にコンクリート温度毎の温度解析結果を示す。外気温度を5°Cずつ変化させており、横軸には側壁厚

外気温度を 5°C ずつ変化させており、横軸には側壁厚さ、縦軸には温度降下量を示す。凡例の CON 温度とは、コンクリートの初期温度を示す。

側壁厚さが大きいほど、CON 温度が高いほど温度降下量は大きくなる。また、外気温度が 5°C 下がると、温度降下量は 2°C~5°C 程度大きくなる。この結果から、温度降下量は側壁厚さ、コンクリート温度に比例して大きくなり、コンクリート温度が外気温度に対して高くなるほど、温度降下量は大きくなる傾向を示した。

この解析結果から、簡易に温度降下量の推定値を算出する近似式を導き出した。以下に近似式を示す。

$$\Delta T_{(n)} = a \cdot B + (b \cdot T_o - c \cdot n) \quad (1)$$

- $\Delta T_{(n)}$: 外気温度 $n^\circ\text{C}$ のときの温度降下量 ($^\circ\text{C}$)
- B : 側壁の部材厚さ (cm)
- T_o : コンクリート打設時の温度 ($^\circ\text{C}$)
- n : 外気温度 ($^\circ\text{C}$)
- a, b, c : 定数 (表-3)

表-3 (1)式中の定数 a, b, c

外気温度 ($^\circ\text{C}$)	a	b	c
0	0.196	1.274	-
5	0.205	1.260	0.834
10	0.191	1.200	0.512
15	0.174	1.123	0.354
20	0.153	1.045	0.254
25	0.141	0.933	0.181
30	0.120	0.858	0.135

式(1)の定数 a, b, c は、それぞれ外気温度 0°C から 30°C までの 5°C きざみで算出したものである。外気温度が表中の値の間にある場合は、それぞれの係数を内挿して算出する。

また、単位セメント量が $10\text{kg}/\text{m}^3$ 増減すると温度降下量が約 1°C 増減することから、単位セメント量の影響を考慮するため、 $300\text{kg}/\text{m}^3$ を基準として増減 $10\text{kg}/\text{m}^3$ につき、式(1)で算出した温度降下量から 1°C 増減することとした。

この近似式は、L 型断面の擁壁タイプの温度解析から導き出していることから、ボックスラーメン構造物の温度解析との相関を確認するために、表-1 中の構造物番号 15, 23, 24, 26, 31 において、実際に温度解析を行ない温度降下量の解析値と比較した。上記の 5 構造物は無作為に選択したものである。図-8 に比較結果を示す。

近似式から計算した温度降下量と、5 構造物の温度

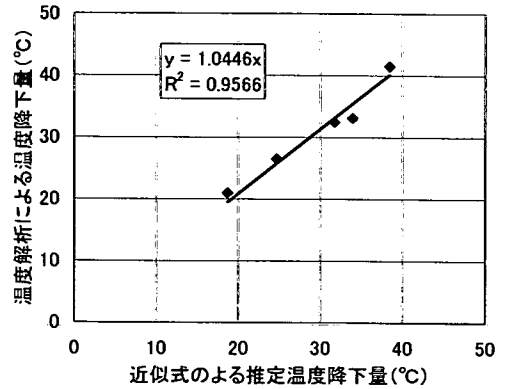


図-8 比較結果

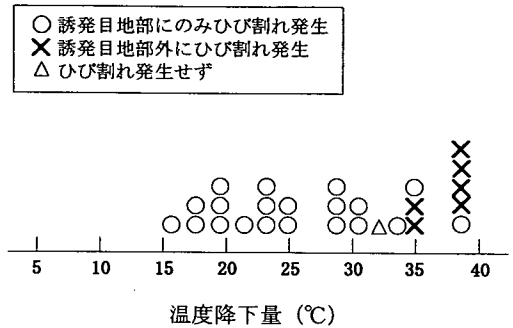


図-9 温度降下量と温度ひび割れ

解析から得た温度降下量と比較した結果、相関係数は 0.985 であった。近似式は、ボックスラーメン構造物の温度解析結果と良い相関を示しており、ボックスラーメン構造物の温度降下量を推定できるものと考えられる。

(3) 温度降下量と温度ひび割れとの関係

図-9 には、前述の近似式から推定した温度降下量と温度ひび割れとの関係を示す。表-1 の誘発目地を施工した 29 構造物のうち、構造物番号 23 と 27 を除いた 27 構造物を示した。23 と 27 は、温度降下量推定のためのデータが不足していたために除くこととした。

図中の○は誘発目地部にのみ温度ひび割れが発生し、誘発目地部以外の箇所では、温度ひび割れが発生しなかったもの、×は誘発目地部以外の箇所に温度ひび割れが発生したもの、△は温度ひび割れの発生が誘発目地部、またはそれ以外の箇所でも発生しなかったものを示す。

温度降下量が、 35°C 以上で温度ひび割れを誘発目地部に制御できていないことから、温度ひび割れの発生には温度降下量が影響していると考えられる。

図-10 には、表-1 に示した構造物の L/H と温度

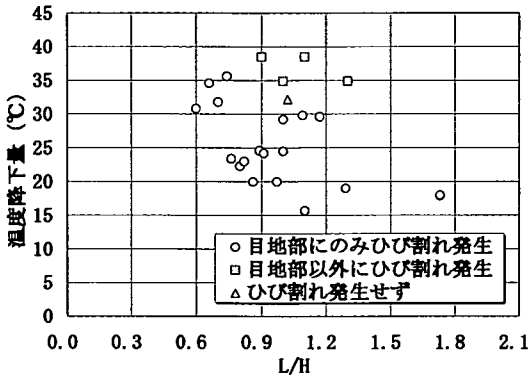


図-10 L/Hと温度降下量

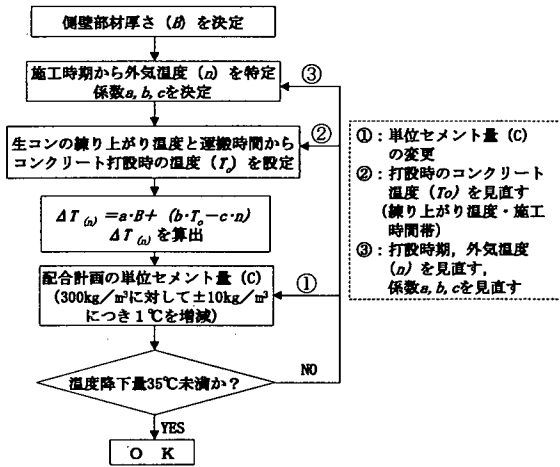


図-11 温度降下量の管理手順

ータを示した。

L/Hが0.9以上、かつ温度降下量が35℃以上の範囲において、温度ひび割れが誘発目地部に制御できていなかった。この結果から、温度ひび割れの効果的な制御には、L/Hを0.9以下とすることに加えて、温度降下量が35℃を下回るよう、コンクリート配合の単位セメント量を修正する等の施工管理が重要であると考えられる。

図-11に具体的な管理手順を示す。式(1)を用いて温度降下量を算出し35℃未満となるように施工管理することとなる。以下、その概要を簡単に述べる。

- ①側壁部材厚さ (B) を決定する。
- ②施工時期から外気温度 (n) を特定し、式(1)の係数 a, b, c を決定する。
- ③コンクリートの練り上がり温度と運搬時間からコンクリート打設時の温度 (T₀) を設定。
- ④式(1)に各値を代入し、温度降下量 ΔT(n) を算出。
- ⑤配合の単位セメント量を確認し、300kg/m³ に対して

±10kg/m³につき1℃を増減する。

- ⑥単位セメント量を考慮した温度降下量が35℃未満であるかどうか確認。
- ⑦温度降下量35℃を超える場合、(I) 配合計画の単位セメント量を変更する、(II) コンクリート打設時の温度の設定を見直す、(III) 工期に余裕があれば施工時期を変更して外気温度を見直す、の順で検討を行う。再度、温度降下量を算出して35℃未満となるように計画する。

4. まとめ

本研究は、ボックスラーメン構造物に生じる温度ひび割れの発生位置を制御し、構造物の水密性の向上を目的として、温度ひび割れ誘発目地と温度ひび割れ状況の調査・分析を行なったものである。その結果、次の範囲のボックスラーメン構造物において以下の知見が得られた。

検討範囲

- ・構造物延長：9.0～24.7m
- ・構造物高さ：3.0～9.8m
- ・側壁部材厚さ：0.3～1.25m
- ・単位セメント量：268kg/m³～322kg/m³、
- ・W/C：48.5%～55.0%

- (1) 断面欠損率を37.5%以上で施工した結果、誘発目地部にひび割れの発生を制御できたことから、温度ひび割れ誘発目地が機能するためには、断面欠損率を37.5%以上確保する必要があると考えられる。
- (2) L/Hを0.9以下とすることに加えて、温度降下量が35℃を下回るようにコンクリート配合の単位セメント量を修正する等の施工管理を行うことで、より確実な温度ひび割れ制御ができる。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書[施工編] (耐久性照査型、平成11年度版)、1999.1.
- 2) たとえば日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針、pp.60-61、1986.3.
- 3) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針、pp.39-40、1986.3.
- 4) 土木学会：最新のマスコンクリート技術、pp.66-86、1996.11.

(2002. 3. 4 受付)

STUDY ON THE TEMPERATURE CRACK CONTROL OF BOX RIGID FRAME STRUCTURE

Shinichi TATSUKI, Tadayoshi ISHIBASHI, Shoichi FURUYAMA
and Mitsuaki OBA

The box rigid-frame is mostly applied to underground structures. The leakage is one of the problems resulting from temperature cracks in side wall segment of the box rigid-frame. This paper/research shows the survey and analysis of conditions causing temperature cracks and installation of temperature crack inducement joints. As a result, we obtained several factors that control temperature cracks of the box rigid-frame effectively.