

論文 東北地方における温度ひび割れ指数簡易判定式の提案

石川 雅美^{*1}・熊谷 貴士^{*2}・子田 康弘^{*3}・岩城 一郎^{*4}

要旨: 壁状構造物における温度ひび割れ対策として、ひび割れ誘発目地の施工が有効である。しかしながら、施工段階において、ひび割れ誘発目地をどの程度の間隔で設置するかについての明確な指標はなく、その都度 CP 法等を用いて検討を行っているのが現状である。本研究では、東北地方において施工される標準的な断面のボックスカルバートを対象として、壁厚、誘発目地間隔、施工時期および施工場所をパラメータとした FEM による 3 元温度応力解析を実施し、これらのパラメータとひび割れ指数との関係を整理した。さらに、ひび割れ指数を求めるための簡易算定式を提案した。

キーワード: マスコンクリート、ひび割れ誘発目地、温度ひび割れ、ボックスカルバート

1. はじめに

東北地方においては幹線道路や鉄道などの多くが盛土構造として整備されていることから、ボックスカルバートの施工例が他の地域に比べて多くなっている。このような壁状構造物の温度ひび割れ対策としては、ひび割れ誘発目地が最も有効な対策であり、現在、広く用いられている。しかしながら、ひび割れ誘発目地を具体的にどの程度の間隔で設置するかについて、明確な指標はなく、CP 法等を用いてその都度検討を行っているのが現状である。

そこで本研究では、東北地方で建設される標準的な断面のボックスカルバートに対して、ひび割れ誘発目地の間隔と温度ひび割れ指数の関係を整理して、簡易的に温度ひび割れ指数を算定する式を提案した。

具体的には、ひび割れ誘発目地を考慮した 2 種類のボックスカルバートの 3 元 FEM メッシュを作成し、東北各地の月平均気温を用いて温度応力解析を行った。さらに平均湿度を用いて、コンクリート標準示方書の乾燥収縮式に従い、乾燥収縮の影響も考慮している。解析パラメータは、1)壁厚、2)ひび割れ誘発目地間隔、3)施工時期、4)施工場所の 4 つである。なお、コンクリートの配合は高炉 B 種、 $f_{ck}=24\text{N/mm}^2$ の 1 種類のみとした。

これらのパラメータ毎に、全部で 192 ケースの温度応力解析を実施し、東北の都市別、打設時期別に温度ひび割れ指数とひび割れ誘発目地間隔の関係を整理し、これを算出するための簡易式を提案した。

2. 解析条件

2.1 解析モデルおよび解析ケース

ASTEA-MACS V4. (RCCM 社) を用いて 3 次元有限

非定熱伝導解析および温度応力解析を行った。解析モデルは国土交通省の函渠の設計標準を参考とした壁厚 800mm のボックスカルバート(図-1)と、JR 東日本の標準的な壁厚 1200mm のボックスカルバート(図-2)である。両者ともに長さ方向は 30m とした。解析モデルは対称性を考慮し、ボックスカルバートの 4 分の 1 部分(長さ

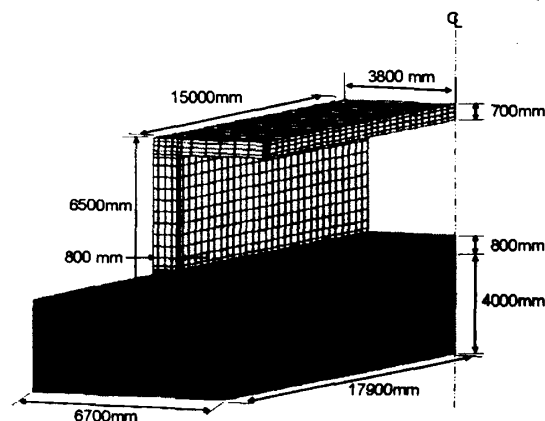


図-1 解析モデル(壁厚 800mm)

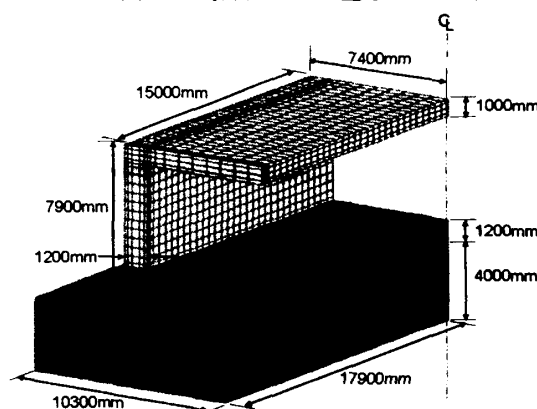


図-2 解析モデル(壁厚 1200mm)

*1 東北学院大学 工学部環境建設工学科 教授 工博 (正会員)

*2 東北学院大学 工学部環境土木工学科

*3 日本大学工学部 工学部土木工学科 助手 (正会員)

*4 日本大学工学部 工学部土木工学科 准教授 (正会員)

15m)とした。

解析地点は東北6県の県庁所在地とした。打設時期は2月、5月、8月、11月とし、解析期間として5月、8月は8ヶ月間行い、2月、11月では1年間解析を行った。打設工程として、底版の打込みを解析対象月の1日とし、次に側壁および頂版の打込みをその月の15日とした。また、ひび割れ誘発目地間隔は両モデルともに、30m(目地なし)、15m間隔、7.5m間隔、5m間隔の4つの場合とした。以上より、解析ケースは全部で6(析地点)×4(設時期)×2(壁厚)×4(目地間隔)=192である。解析パラメータを表-1に示す。

表-1 解析パラメータ

解析場所	打設時期	壁厚	目地間隔
青森	2月	800mm	30m
盛岡	5月		15m
秋田			
仙台	8月	1200mm	7.5m
山形	11月		5m
福島			

2.2 コンクリートの物性値

コンクリートの圧縮強度は、最も一般的に用いられる設計基準強度 24N/mm^2 のものを仮定した。セメントの種類は高炉B種とした。今回の解析では、コンクリートの配合はこの1種のみとした。東北地方において、設計基準強度 24N/mm^2 のコンクリートでは、単位セメント量として 300kg/m^3 を使用する例が最も多い。また、単位水量(W)= $170(\text{kg/m}^3)$ として、 W/C は56.7%とした。コンクリートの圧縮強度と材齢の関係を図-3に示す。

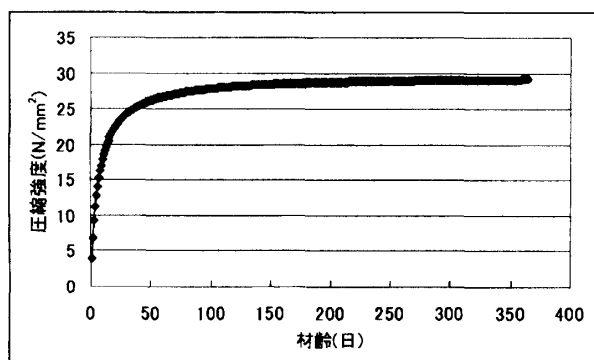


図-3 圧縮強度

誘発目地部の断面欠損率は田附らの報告¹⁾を参考に40%となるように、解析モデルの誘発目地部のコンクリートの引張強度を40%低減した。したがって、材齢91

日の引張強度は一般部のコンクリートで 2.3N/mm^2 であるのに対して、誘発目地部では 1.4N/mm^2 である。

引張強度以外のコンクリートならびに誘発目地の物性値は、表-2に示すコンクリートの一般的な値とした。地盤の物性値も併せて表-2に示す。

表-2 コンクリートの物性値

物性値	コンクリート	地盤
圧縮強度式	$f_{ck} = \{1/(6.2+0.93t)\} \cdot f_{ck(91)}$	10N/mm^2
引張強度式	$0.44\sqrt{f_{ck}}$	10N/mm^2
ヤング係数式	$4700\sqrt{f_{ck}}$	4000N/mm^2
熱伝導率	$2.6(\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C})$	$2.0(\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C})$
密度	$2300(\text{kg/m}^3)$	$2600(\text{kg/m}^3)$
比熱	$1.1(\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C})$	$0.8(\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C})$
線膨張係数	$10 \times 10^{-6}/(^\circ\text{C})$	$10 \times 10^{-6}/(^\circ\text{C})$
ポアソン比	0.18	0.25

2.3 初期条件および境界条件

コンクリートの打込み温度は、一般には外気温プラス 5°C とされているが、寒冷期では 4°C を下回らないように外気温 $+6^\circ\text{C}$ とした。ただし、打込み温度が 30°C を超える場合は打込み温度を 30°C とした。コンクリート打設直前の地盤の温度分布は地表面では外気温と等しくし、最下端(地表面より深さ4mの位置)は各都市の年平均気温とし、地表面と地盤最下端とを線形補間した。なお、最

表-3 コンクリートの打込み温度

青森	2月	5月	8月	11月
底版	4.8	16.5	28.1	15.5
壁・頂版	4.9	19.1	29	12.4

盛岡	2月	5月	8月	11月
底版	4.1	17.1	28.5	14.8
壁・頂版	4.4	19.8	29.2	11.7

秋田	2月	5月	8月	11月
底版	6.1	17.7	29.7	16.1
壁・頂版	6.2	20.2	30	13.6

仙台	2月	5月	8月	11月
底版	7.6	18.5	29.1	18
壁・頂版	7.7	20.9	30	15.1

山形	2月	5月	8月	11月
底版	5.3	18.6	29.9	16.2
壁・頂版	5.8	21.4	30	13.2

福島	2月	5月	8月	11月
底版	7.6	19.9	30	17.9
壁・頂版	7.8	22.5	30	15

下端は固定温度境界である。

型枠存置期間および養生は打設開始から 5 日間とし、側面は合板型枠、打上り面は湛水(5cm 未満)養生を仮定した。養生中の熱伝達率は型枠、打上り面ともに $8(\text{W}/\text{m}^2\text{C})$ である。脱枠後、および養生終了後の熱伝達係数は $14(\text{W}/\text{m}^2\text{C})$ とした。

表-1 に示した各解析地点の外気温を図-4 に示す。これらの都市では冬は盛岡が最も寒く、夏は福島が最も暑い。1 年の寒暖の差は、盛岡が最も大きく 25.3°C であり、逆に最も小さいのは仙台で 22.6°C である。

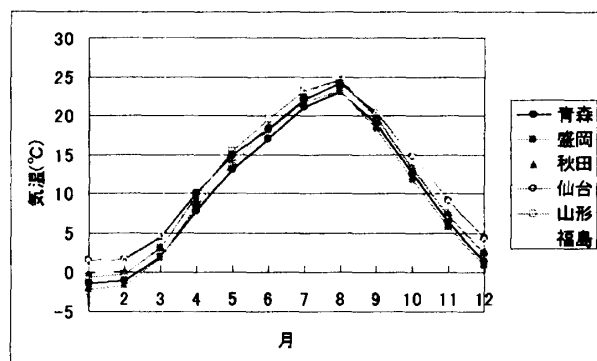


図-4 各都市の外気温

2.4 乾燥収縮の影響

本解析検討では、温度の影響に加えて、乾燥収縮ひずみの影響も加味することにした。乾燥収縮ひずみは土木学会コンクリート標準示方書で示されている次式を用いた。(1)式は普通セメントを用いたコンクリートを対象としたものであるが、同示方書の記述には「セメントの種類による影響は比較的少ない」とあることから、高炉セメントを仮定している本解析でもこの式を用いた。

$$\varepsilon'_{cs} = \left[1 - \exp \left\{ -0.108(t - t_0)^{0.56} \right\} \right] \cdot \varepsilon'_{sh} \quad (1)$$

$$\varepsilon'_{sh} = -50 + 78 \left[1 - \exp(RH - 100) \right] + 38 \log_e W - 5 \left[\log_e (V/S) / 10 \right]^2 \quad (2)$$

ここで、

ε'_{sh} : 収縮ひずみの最終値

RH: 相対湿度(%)

W: 単位水量(kg/m^3)

V: 体積(mm^3)

S: 外気に接する表面積(mm^2)

V/S: 体積表面比(mm)

なお、(2)式の ε'_{sh} 算出においては、図-5 に示す各都市の相対湿度(RH)の年平均値を用いた。東北各地の年平均相対湿度は、降雪量の多い地域ほど高い傾向にある。式(2)により求めた各都市の乾燥収縮ひずみ ε'_{cs} を図-6 に示す。

年平均相対湿度の低い福島では乾燥収縮ひずみが約 90μ と大きいものに対して、年平均相対湿度の高い青森と山形では材齢 1 年後でもひずみ量はごくわずかであり、乾燥収縮の影響は他地点に比べてかなり小さいものと考えられる。

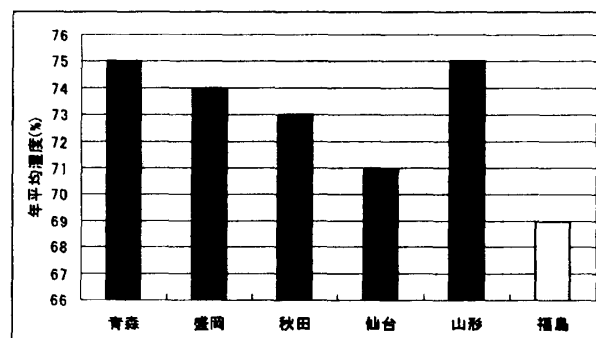


図-5 各都市の年平均湿度

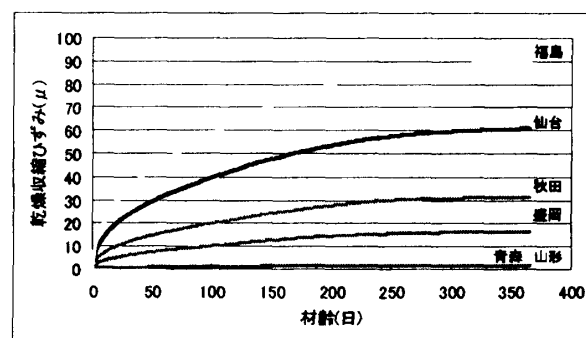


図-6 各都市の乾燥収縮ひずみ

2.5 鉄筋およびひび割れ誘発目地のモデル化

解析モデルでは、鉄筋をトラス要素とし、コンクリート要素の節点位置に挿入した。したがって鉄筋間隔はメッシュ幅(350mm~500mm)となっている。鉄筋比は両モデルともに 0.13% とした。この鉄筋比となるように、鉄筋 1 本あたりの断面積を壁厚 800mm のモデルでは 2.42cm^2 、壁厚 1200mm のモデルでは 3.79cm^2 とした。鉄筋量を以下の表-4 に示す。なお、底版には鉄筋要素を入れていない。

表-4 鉄筋量

	壁厚 800mm	壁厚 1200mm
側壁断面積	40000cm^2	68400cm^2
鉄筋断面積	$2.42(\text{cm}^2/\text{本})$	$3.79(\text{cm}^2/\text{本})$
鉄筋数	22(本)	24(本)
鉄筋比	0.13%	0.13%

ひび割れ誘発目地部にはジョイント要素を挿入し、先に述べた引張強度(目地部は一般部の 60%の値)を超えたとき、ジョイント要素を切り離すことで、ひび割れの

挙動を表した。さらに誘発目地部のひび割れ幅を抑制するため、付着喪失長さを片側 150mm とし、図-7 に示すように、目地中心位置から片側 150mm の位置までは、鉄筋とコンクリート要素の節点は結合されていない。こととした。

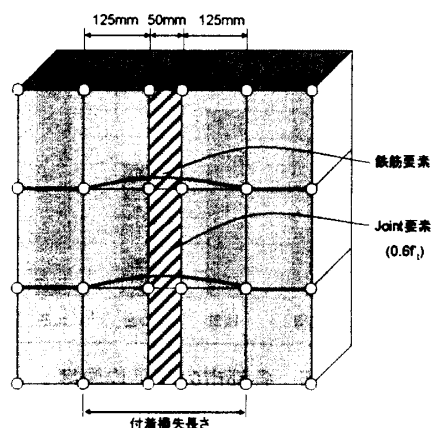


図-7 ひび割れ誘発目地のモデル化

3. 解析結果

ひび割れ指数を算出する解析モデル上での着目点を図-8 に示す。着目点は壁厚 800mm のモデルの場合、側壁中央下から 750mm、壁厚 1200mm のモデルの場合では側壁中央下から 1350mm のところである。側壁長手方向の位置としては、両モデルにおいて対称軸の位置からそれぞれ、1)目地なしの場合では 0mm(対称面)、2)目地間隔 15m の場合対称面より 7250mm、3)目地間隔 7.5m の場合対称面より 3250mm、4)目地間隔 5m の場合 2250mm である。

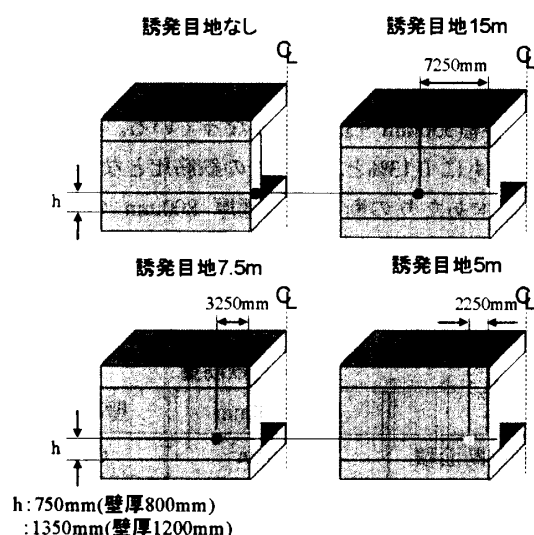


図-8 解析結果の着目点

解析結果の一例として、解析地点を仙台、壁厚 1200mm、8 月打設とした場合の温度履歴、応力履歴およびひび割れ指数の履歴をそれぞれ図-9、図-10 および図-11 に示す。コンクリートの温度は目地間隔の違いによる差は

ない。応力履歴をみると、ひび割れの発生によりひび割れ誘発目地近傍で応力が解放されるため、誘発目地を多く設けたモデルほど応力の値が小さくなる。当然ではあるが、誘発目地なし、目地間隔 15m、7.5m、5m の順に応力が低減されることがわかる。したがってひび割れ指数も、誘発目地を多く設けた順に大きくなる。これ以外の解析地点、壁厚、打設時期についても同様の結果が得られた。

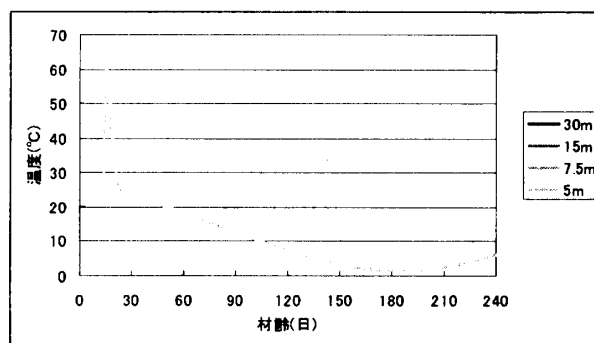


図-9 温度履歴

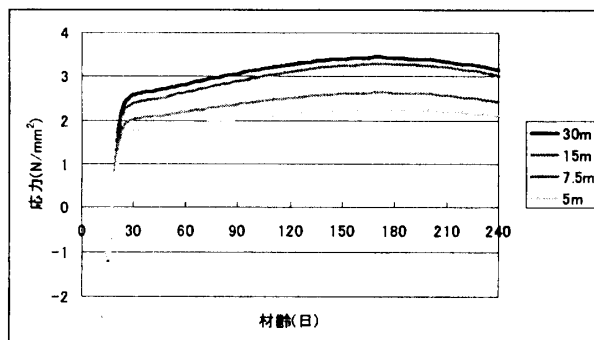


図-10 応力履歴

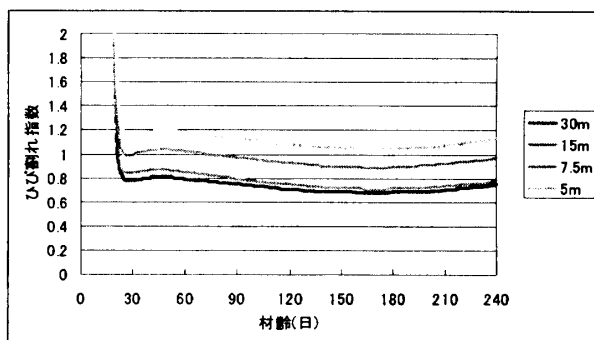


図-11 ひび割れ指数履歴

全 192 の解析ケースより最小ひび割れ指数を求め、コンクリート標準示方書の解説図 4.2.1 を参照して、ひび割れ発生確率としてまとめたものを図-12～図-19 に示す。結果は全体として壁厚 800mm より壁厚 1200mm の方が、ひび割れ発生確率が高くなる。ひび割れが発生

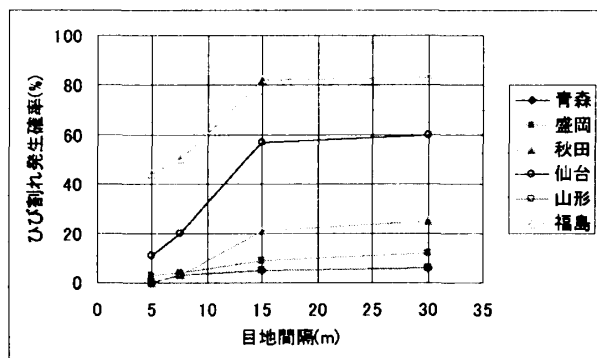


図-12 ひび割れ発生確率(壁厚 800mm, 2月打設)

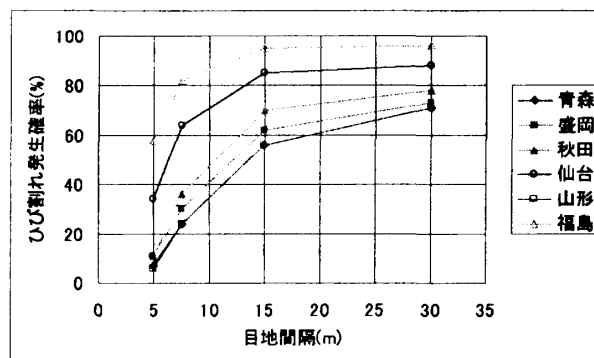


図-16 ひび割れ発生確率(壁厚 1200mm, 2月打設)

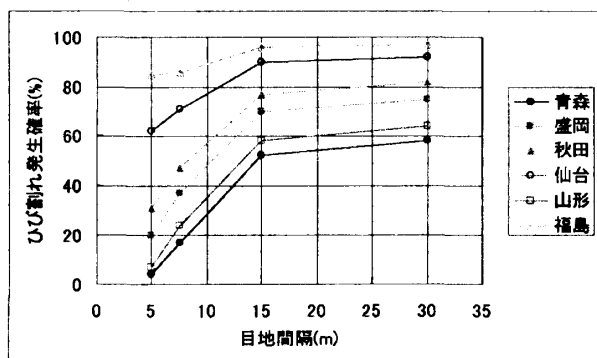


図-13 ひび割れ発生確率(壁厚 800mm, 5月打設)

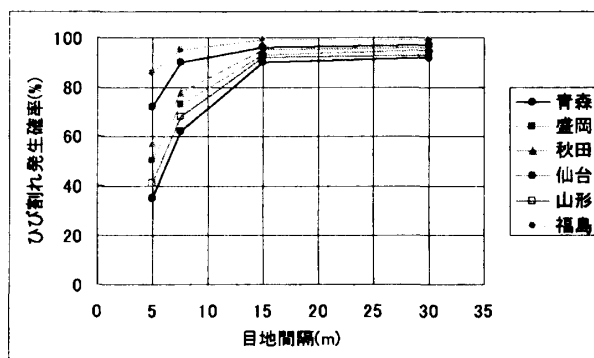


図-17 ひび割れ発生確率(壁厚 1200mm, 5月打設)

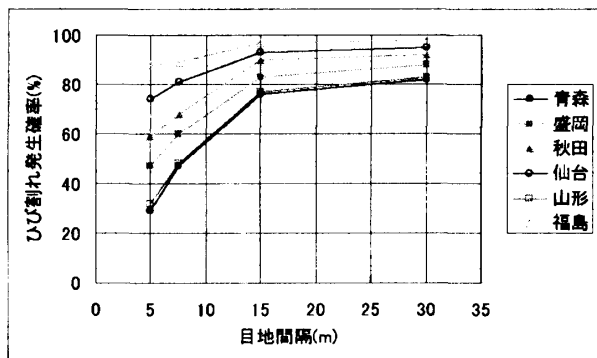


図-14 ひび割れ発生確率(壁厚 800mm, 8月打設)

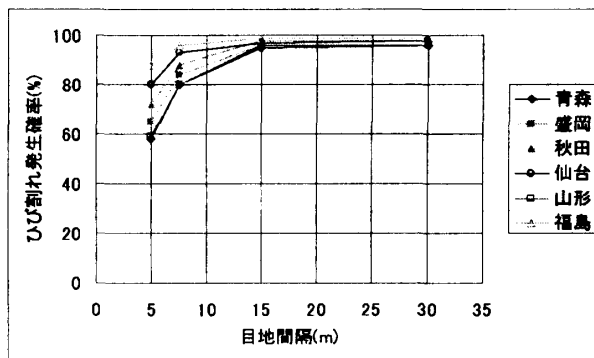


図-18 ひび割れ発生確率(壁厚 1200mm, 8月打設)

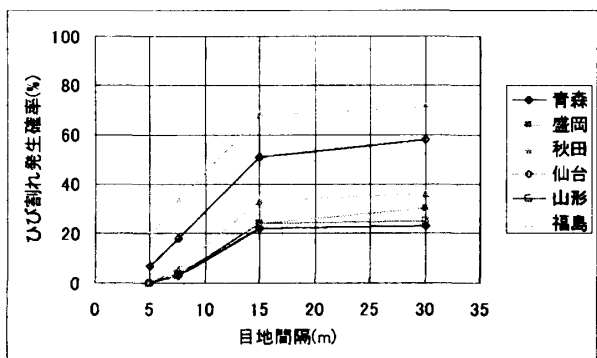


図-15 ひび割れ発生確率(壁厚 800mm, 11月打設)

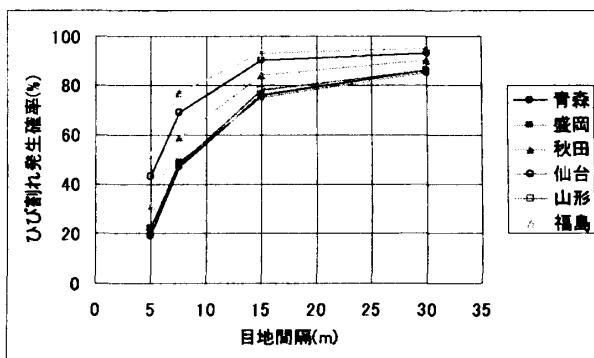


図-19 ひび割れ発生確率(壁厚 1200mm, 11月打設)

しやすい時期は、2月、11月の寒い時期より5月、8月の気温の高い時期である。福島市は東北の中で気温が最も高く、また相対湿度が最も低いいため、ひび割れ発生確率が最も高い都市となった。

図-12～19を参照することで、東北各地で施工されるボックスカルバートにおいて、所要の温度ひび割れ指数を満足するための、ひび割れ誘発目地間隔を求めることができる。

4. 近似式の提案

図-12～19のグラフの中間値を補うため、壁厚、施工場所および施工時期をパラメータとし、誘発目地とひび割れ指数の関係を求める簡易式を提案する。まず、ひび割れ指数を算出する近似式として以下の式(3)を用いることとする。

$$I_{cr} = A \sin \left\{ \frac{2\pi(x - N_0)}{12} \right\} + \overline{I_{cr}} \quad (3)$$

ここで、 x は打設月、 N_0 は I_{cr} が平均となる月、 $\overline{I_{cr}}$ は I_{cr} の平均である。ここに、

$$A = (a_1 B + a_2) \cdot \ln(T) + (b_1 B + b_2) \quad (4)$$

$$\overline{I_{cr}} = (c_1 B + c_2) \cdot T^{(d_1 B + d_2)} \quad (5)$$

$$N_0 = e_1 B + e_2 \quad (6)$$

T : 誘発目地間隔(m)

B : 壁厚(mm)

$a_1, a_2, b_1, \dots, e_2$: 解析地点での係数

である。表-5に各解析地点での係数 $a_1, a_2, b_1, \dots, e_2$ を示す。式(3)による近似の一例として、解析地点仙台、壁厚800mmの結果とを図-20に示す。これにより、この近似式で3次元FEM解析の結果を概ね補間できているものと思われる。その他の都市、および壁厚1200mmの場合も、図-20とほぼ同様の精度で近似できていることを確認した。

5 まとめ

東北地方の各都市において施工される壁厚800mmと1200mmのボックスカルバートを対象として、3次元FEMによる温度応力解析を行い、ひび割れ誘発目地間隔とひび割れ発生確率の関係を整理した。さらに、ひび割れ誘発目地間隔とひび割れ発生指数との関係を近似する式を提案した。

本研究において実施した解析の結果から、壁厚800mmで、かつ2月、11月と外気温が低いケースでは、同じひび割れ誘発目地間隔でも、各都市によってひび割れ指数が大きく異なることが認められた。これは、気温が低く、壁厚が薄くなると、相対的に乾燥収縮の影響が卓越してくるためと考えられる。このため、年平均湿度の高い青

森、山形ではひび割れ発生確率が他の都市に比べて小さくなっていることが明らかとなった。

表-5 係数一覧表

	青森	盛岡	秋田
a_1	0.95×10^{-4}	0.44×10^{-4}	1.79×10^{-4}
a_2	-0.142	-0.08	-0.253
b_1	-6.3×10^{-4}	-5.13×10^{-4}	-8.47×10^{-4}
b_2	1.02	0.9	1.32
c_1	-12×10^{-4}	-4.56×10^{-4}	-8.8×10^{-4}
c_2	3.4	2.49	2.89
d_1	-0.76×10^{-4}	-1.83×10^{-4}	-0.85×10^{-4}
d_2	-0.132	-0.0141	-0.127
e_1	8.06×10^{-4}	4.88×10^{-4}	8.12×10^{-4}
e_2	-2.51	-2.4	-2.7

	仙台	山形	福島
a_1	1.44×10^{-4}	0.73×10^{-4}	0.46×10^{-4}
a_2	-0.188	-0.126	-0.083
b_1	-6.26×10^{-4}	-5.89×10^{-4}	-3.25×10^{-4}
b_2	0.96	1.01	0.61
c_1	-3.42×10^{-4}	-10.83×10^{-4}	-0.35×10^{-4}
c_2	2.05	3.24	1.49
d_1	-1.37×10^{-4}	-0.89×10^{-4}	-1.88×10^{-4}
d_2	-0.056	-0.1164	-0.005
e_1	8×10^{-4}	7.44×10^{-4}	5.56×10^{-4}
e_2	-3.02	-2.5	-3.2

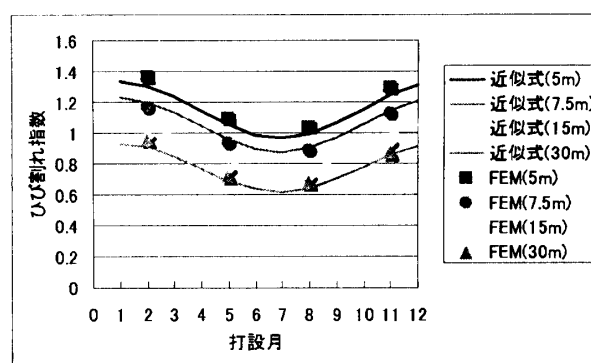


図-20 近似式と解析値の比較図

参考文献

- 1) 田附伸一, 石橋忠良, 古山章一, 大庭光商, 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, 土木学会論文集, No.739/V-60, 265-272,2