

論文 福島県におけるボックスカルバートの温度ひび割れハザードマップの構築

子田 康弘^{*1}・岩城 一郎^{*2}・石川 雅美^{*3}

要旨：マスコンクリートの温度ひび割れ制御は、構造物の耐久性向上の点からも重要である。温度ひび割れの発生は、各地固有の気象条件に依存すると考えられるが、その影響は十分に評価されていない。そこで本研究ではボックスカルバートを対象に、福島県の3地方(浜通り, 中通り, 会津)の気象条件を考慮した温度応力解析を行い、そのひび割れ発生確率を検討した。その結果、ひび割れ発生確率は、各地の気象条件に依存し、打込み時期ごとに大きく変化することを明らかにした。以上の結果に基づき、GIS を用い、福島県内のひび割れ発生確率を分布図として表わした温度ひび割れハザードマップの構築を行った。

キーワード：温度ひび割れ, ボックスカルバート, 気象条件, ひび割れ発生確率, ハザードマップ

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の大型化や大量急速施工といった影響により、温度ひび割れの発生が深刻化している。そのため、温度ひび割れの発生が懸念されるコンクリート構造物は、部材寸法に拘わらずマスコンクリートとして扱われる。マスコンクリートの施工にあたっては、コンクリートの温度調整、運搬、打込み、養生等を適切に計画し、実施しなければならず¹⁾、製造から施工にわたって注意深い配慮が必要となる。こうした温度ひび割れの問題に対し、各自治体ではその対応に苦慮しているが、自治体や地元建設業者では温度ひび割れに対する解析技術が十分に備わっていないため、ひび割れ発生確率が潜在的に高くなる地域や季節に対する認識が不十分であると言わざるを得ない。また、東北地方は、道路・鉄道等の構造物の多くが盛土構造で作られるため、必然的にこれらを横断するボックスカルバートを施工するケースが多く、この種の構造物の温度ひび割れが問題になりやすい地方と言える。加えて、福島県は、浜通り、中通り、会津という気象条件の全く異なる3地方からなり、同一県内であっても地域や季節によって温度ひび割れの発生確率が相当に異なることが予想される。

以上の背景から、本研究では、福島県をモデルケースとし、県内の気象条件(温度および相対湿度の年間推移)が温度ひび割れに及ぼす影響を明らかにするため、ボックスカルバートを対象に、福島県の3地方の気象条件を考慮した温度応力解析を行い、そのひび割れ発生確率を検討した。温度応力解析は、打込み時期を2月、5月、8月、11月とし、県内各地点の温度および湿度の年間推移を考慮し実施した。以上の解析結果より、GIS を用いて、福島県内の打込み時期(春夏秋冬)ごとのひび割れ発生確

率を分布図として視覚的に表現した温度ひび割れハザードマップの構築を行った。

2. 温度応力解析の概要

温度応力解析は、著者らによる既応の研究²⁾に従い行った。その概要を以下に示す。

2.1 解析モデル

ASTEAM-MACS Ver.5 (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、図-1に示すように、ボックスカルバートとしては比較的壁厚が厚く、温度ひび割れの影響が出やすいと判断される壁厚1200mmを対象とした。図に示すように、カルバート長は30mであるが、解析上、対称性を考慮してボックスカルバートの4分の1部分(長さ15m)とした。また、図-1に示す解析モデルには、ボックスカルバートの側壁部に設けるひび割れ誘発目地をモデル化する

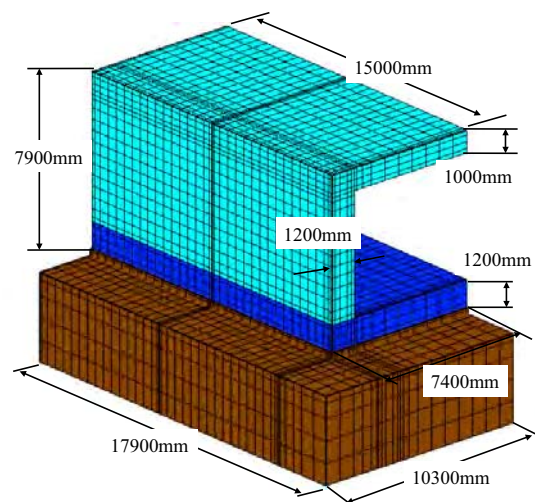


図-1 解析モデル(壁厚 1200mm)

*1 日本大学 工学部土木工学科専任講師 博(工) (正会員)

*2 日本大学 工学部土木工学科准教授 博(工) (正会員)

*3 東北学院大学 工学部環境建設工学科教授 工博 (正会員)

ことで考慮してあり、その間隔は、7.5m である。なお、このモデルの打込みは、底版の後、側壁と頂版を同時に打込むという設定にした。

2.2 ひび割れ誘発目地および鉄筋のモデル化

図-2 に示すように、ひび割れ誘発目地、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。従って、鉄筋間隔はメッシュ幅(350mm~500mm)となっている。鉄筋比は 0.13% とした。この鉄筋比となるように、鉄筋 1 本当当たりの断面積を 3.79cm² とした。鉄筋量を以下の表-1 に示す。なお、底版には鉄筋要素を入れていない。

2.3 コンクリートの物性

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/mm² のものを仮定した。セメントの種類は高炉 B 種とした。東北地方において、設計基準強度 24N/mm² のコンクリートでは、単位セメント量として 300kg/m³ を使用する例が最も多いため、この値を用いた。また、単位水量を 170(kg/m³)、水セメント比 W/C を 56.7% とした。なお、誘発目地部の断面欠損率は田附らの調査報告³⁾を参考にすると 40% であり、これを考慮するため、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% 低減させた。表-2 には、コンクリートの物性値と、地盤の物性値を示す。

2.4 乾燥収縮ひずみの考慮

本解析では、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。これは、昨年度の研究成果²⁾より、温度ひび割れ発生確率に及ぼす相対湿度の影響、すなわち乾燥収縮の影響は多大で、年間の相対湿度が低い地域は、ひび割れ発生確率が高くなる結果を得ているためである。本解析の乾燥収縮ひずみは、コンクリート標準示方書 設計編⁴⁾で示される式(1)を用いた。式(1)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。

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

$\epsilon'_{sh} = -50 + 78[1 - \exp(RH - 100)] + 38 \log_e W - 5[\log_e(V/S)/10]^2$
ここで、 ϵ'_{sh} は収縮ひずみの最終値、 t_0 と t は乾燥開始および乾燥中のコンクリートの有効材齢(日)、 RH は相対湿度(%), W は単位水量(kg/m³)、 V は体積(mm³)、 S は外気に接する表面積(mm²)、 V/S は体積表面積比(mm)である。

なお、本モデルの V/S は、 $V/S=527$ mm であり、式(1)の上限値よりも大きい。が、 V/S の影響を現状の解析モデルによって検証ができないため、今回は上限値 ($V/S=300$ mm) を適用している。

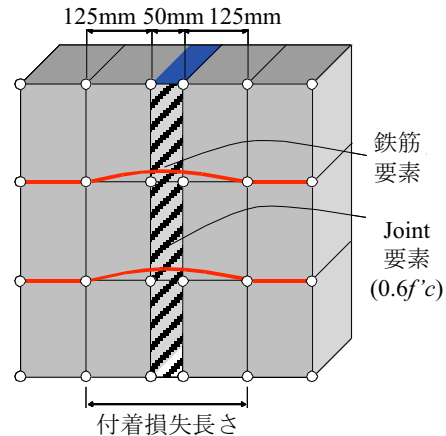


図-2 ひび割れ誘発目地のモデル化

表-1 解析モデルの鉄筋量

側壁断面積	68400cm ²
鉄筋断面積	3.79(cm ² /本)
鉄筋数	24(本)
鉄筋比	0.13%

表-2 コンクリートおよび地盤の物性値

物性値	コンクリート	地盤
圧縮強度式	$f_{ck} = \{t / (6.2 + 0.93t)\} \cdot f_{ck}(91)$	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(W/m・°C)	2.0(W/m・°C)
密度	2300(kg/m ³)	2600(kg/m ³)
比熱	1.1(kJ/kg・°C)	0.8(kJ/kg・°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

表-3 解析ケース

解析場所	打込み時期	解析期間	目地間隔
小名浜		1ヶ月	7.5m
福島	2月, 5月	2ヶ月	
白河	8月, 11月	6ヶ月	
若松		12ヶ月	

2.5 福島県内の温度応力の解析

(1) 解析ケース

本解析では、表-3 に示すように、打込み時期を 2 月、5 月、8 月、11 月の 4 ケースとした。また、解析期間(1ヶ月、2ヶ月、6ヶ月、12ヶ月の 4 ケース)をパラメータとし、各解析期間における当該地点の平均相対湿度を入力した。また、年間の相対湿度の変化が大きい地域ではこれを十分に考慮する必要がある一方で、現行の解析モデルでは解析期間(例えば 1 年間)を通した相対湿度の変



図-3 福島県の地形の概要⁵⁾



図-4 福島県3地方の区分と解析14地点の位置

化を入力値として考慮することができない。そのため、本研究では解析期間(その間の平均相対湿度)を変化させ、この影響を考慮することとした。

解析地点は福島県の地理的特徴である浜通り、中通り、会津の3地方をさらに、気象庁に相対湿度データの記録がある4地点(小名浜、福島、白河、若松)に代表される4地域(浜通り、中通り北部、中通り南部、会津)に分け、それぞれの地域を網羅した合計14地点を対象とした。このうち、上記4地点を除く10地点には温度データはあるものの相対湿度データはないため、今回は各地域の代表地の相対湿度で代用することとした。

なお、打込み工程として、底版の打込みを解析対象月の1日とし、側壁および頂版の打込みをその月の15日とした。

(2) 初期条件および境界条件

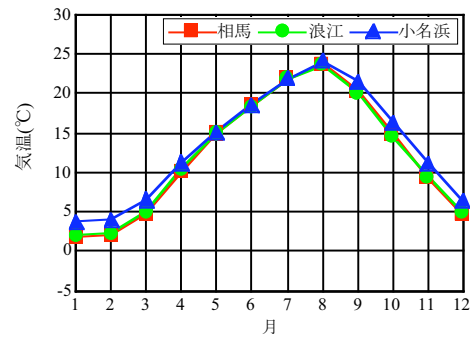
コンクリートの打込み温度は、一般には外気温+5℃とされているが、本解析モデルでは、一律+6℃としている。これは、冬季の外気温が氷点下を大きく下回る地点の打込み温度を5℃以上とするためである。しかし、このような設定でも5℃を上回らない地点があり、この場合に限り、その地点の打込み温度を4℃に設定した。一方、夏季に外気温が25℃を上回る場合には打込み温度を30℃とした。コンクリート打込み直前の地盤の温度分布は地表面では外気温と等しくし、最下端(地表面より深さ4mの位置)は解析地点の解析期間における平均気温とし、地表面と地盤最下端とを線形補間した。なお、最下端は固定温度境界である。

型枠存置期間および養生は打込み開始から5日間とし、側面は合板型枠、打上り面は湛水(1cm未満)養生を仮定した。養生中の熱伝達率は型枠、打上り面共に8(W/m²C)である。そして、脱枠後、および養生終了後の熱伝達係数は14(W/m²C)とした。

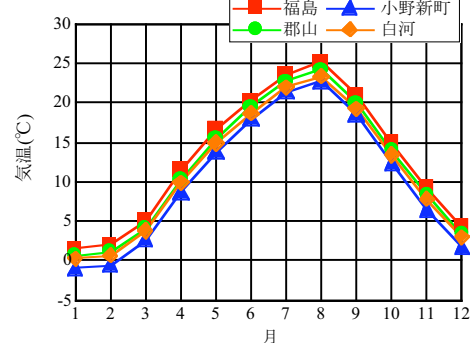
3. 福島県内の気候の概要

3.1 福島県の地理的概要

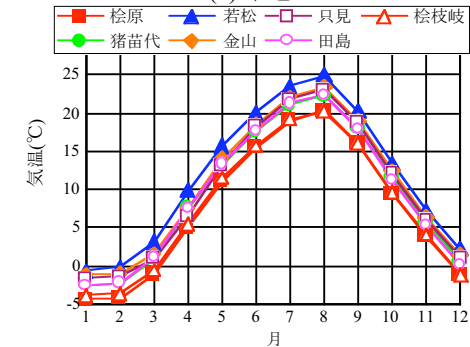
福島県は、図-3⁵⁾に示すように、東側に阿武隈高地、



(a) 浜通り



(b) 中通り



(c) 会津

図-5 3地方の気温変化

県中央に奥羽山脈、西側に越後山脈がいずれも南北に連なっている。これら山地や丘陵地を境として、図-4に示すように、地理的に東から浜通り、中通り、会津と3地方に分類されている。浜通りは、太平洋に沿った低地帯であり、中通りは、大部分が平坦地で盆地を形成し、会津は、山地が占める地方である。このような地理的特

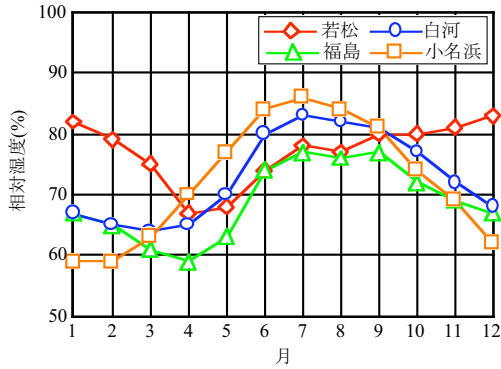


図-6 4地域の相対湿度の変化

徴により、3地方の気候は大きく異なる。

3.2 福島県3地域の年間の気温と相対湿度の変化

福島県の気候は、浜通りの場合、海洋性の気候であり、寒暖の差が3地方の中で最も小さく、冬も氷点下になることはまれである。中通りは夏季に暑く、冬の降雪量はさほど多くはないが寒冷地域である。会津の場合、夏季は比較的暑く、冬季は寒さが厳しく、積雪のため多湿となる。

このような3地方の気候の特徴を把握するため、気象庁が公表している気象統計情報⁹⁾より、福島県3地方、14地点(図-4参照)における過去30年の月間の平均気温および平均相対湿度の1年間の変化を調査した。図-5と図-6は、平均気温および平均相対湿度の変化を示す図である。図-5より、平均気温は各地点で相当異なることがわかる。夏季は、3地方ともに最も平均気温が高い地点で約25℃に達する。一方、冬季は、最も寒い地点が図-5(c)の会津の桜原、檜枝岐地点の約-4℃であり、中通りは0℃前後、浜通りは0℃を下回ることがない。この図より、福島県内では、夏季が5℃、冬季が8℃程度の気温差が生じることがわかる。次に、図-6に示す平均相対湿度の変化には、4地域(若松、福島、白河、小名浜)の平均相対湿度を示している。図より、1月と12月の相対湿度は高い順に若松、白河、福島、小名浜である。一方、5月から8月にかけては、逆に小名浜が一番高くなっている。また、福島は、年間を通して相対湿度が低く、年平均相対湿度が最も低い地点になっている。

このような地域ごとの気温と相対湿度の変化の違いは、福島県内で施工されるボックスカルバートの配合、部材寸法が同じであっても、そのひび割れ発生確率は相当異なることを示唆している。これより、福島県内のボックスカルバートの温度応力解析を実施し、県内の温度ひび割れハザードマップの構築を行うこととした。

4. 解析期間がひび割れ発生確率に及ぼす影響

図-7は、2月を打込み時期とした若松、福島、白河、小名浜の各解析期間によるひび割れ発生確率を示した

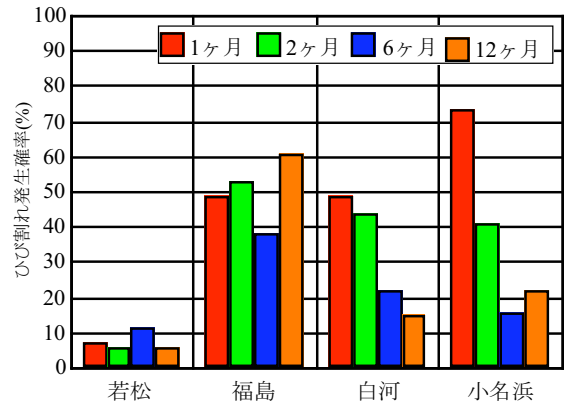


図-7 解析期間によるひび割れ発生確率 (打込み時期2月)

表-4 相対湿度の入力値(打込み時期2月の場合)

打込み時期	解析期間	平均相対湿度(%)			
		若松	福島	白河	小名浜
2月	1ヶ月	79	65	65	59
	2ヶ月	77	63	65	67
	6ヶ月	74	67	71	73
	12ヶ月	77	69	73	72

図である。また、表-4には、その際の相対湿度の入力値を示した。なお、ひび割れ発生確率は、コンクリート標準示方書 設計編⁴⁾の解説を参照し、求めている。その際に必要なひび割れ指数は、解析モデル上の側壁中央下から1350mmで、側壁長手方向の位置を対称軸から3250mm位置を採用している。

図より、同じ地点であっても解析期間が異なることでひび割れ発生確率が大きく異なることがわかる。これは、表-4に示すように、解析期間における当該地点での平均相対湿度が影響しており、総じて、相対湿度の入力値が小さくなるとひび割れ発生確率は高くなる傾向にある。これまでの解析では、相対湿度として一般に年平均相対湿度を入力していたが、各解析期間における平均相対湿度がこれを大きく下回る場合には、ひび割れ発生確率を危険側の評価とする恐れがある。例えば、小名浜の場合、解析期間12カ月に比べ、1カ月、2カ月の方がひび割れ発生確率が高くなっているが、このことは、当該地点の冬季の相対湿度が1年を通じて最も低いこと、温度応力に、脱型後の乾燥収縮による応力が顕著に上乗せされた結果であると考察される(図-6参照)。このように、温度応力解析では、各地点での季節の変化に伴う温度だけでなく相対湿度の影響も十分に考慮し、危険側の評価にならないよう注意する必要がある。

5. 福島県内の温度ひび割れハザードマップの構築

5.1 GISによるひび割れ発生確率分布のマップ化

本検討では、図-7より、打込み時期および地点別にひび割れ発生確率が最も高くなる解析期間(およびその

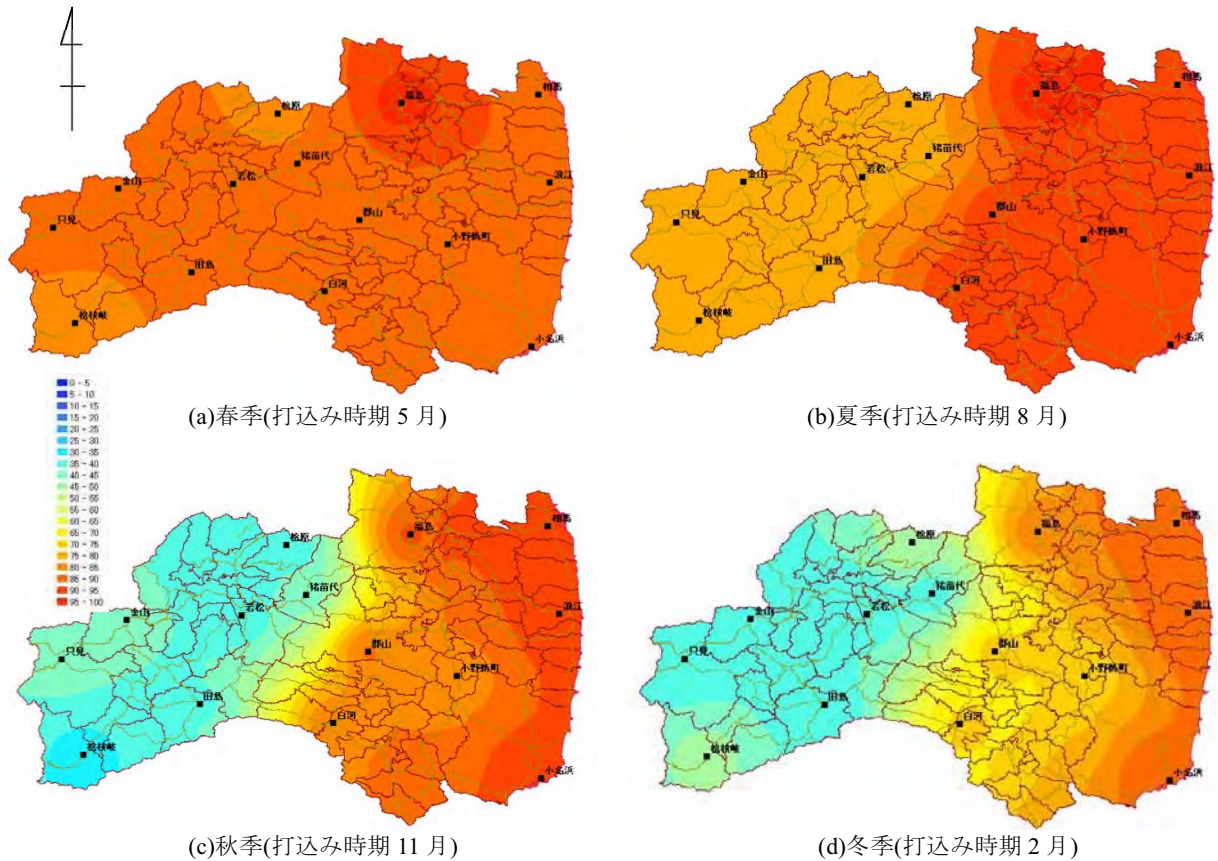


図-8 福島県内の温度ひび割れハザードマップ

間の平均相対湿度)を当該地域の他の地点(図-4 参照)に適用することで福島県内 14 地点のひび割れ発生確率を求めた。

温度ひび割れハザードマップは、得られた 14 地点のひび割れ発生確率を基に、GIS によりひび割れ発生確率分布図を作図することで構築した。具体的には、GIS ソフトに ArcGIS(ESRI 社)を用い、14 地点をサンプリングデータとして逆距離加重法(IDW)⁷⁾による補間を行うことで福島県内のひび割れ発生確率分布を表す地図を作成した。

5.2 温度ひび割れハザードマップ

図-8 は、GIS ソフトを用いた温度ひび割れハザードマップであり、打込み時期別(春夏秋冬：5月，8月，11月，2月)に示した。地図上には、市町村境界と道路網(国道)も表記した。なお、分布図では、寒色から暖色に変わるにつれてひび割れ発生確率が高くなることを表している。

図より、福島県内のひび割れ発生確率は、南北方向よりも、東西方向で変化することがわかる。これより、温度解析には、異なる 3 地方の気候特性が反映されていると判断される。また、ひび割れ発生確率は春から夏にかけて高くなる傾向にあり、会津地方では春，中通り，浜

通りでは夏が最もひび割れの発生確率が高くなる結果となった。秋から冬にかけては 3 地方ともひび割れ発生確率は減少するが、浜通りでは依然高い値を示した。なお、年間を通してひび割れ発生確率が高いのは福島市周辺であった。これらの影響は、温度および相対湿度の季節に応じた変化が相互に関係したためと思われる。特に秋から冬季にかけて、会津は相対湿度が高く、浜通りでは逆に相対湿度が低いことがハザードマップに顕著に表れていると判断される。また福島市周辺では年間を通して相対湿度が低いことが影響していると思われる。なお、冬季の会津地方に着目すると、桧原，檜枝岐では会津の他の地域に比べひび割れ発生確率が高くなっている。これは、3.2 で述べたようにこれらの地点の気温が福島県内で最も低いため、本解析モデルの型枠残存期間 5 日間とした境界条件では保温期間が短く、脱型後コンクリート躯体温度が急激に外気温まで降下したことが原因と考えられる。すなわち本解析により、不十分な養生(期間)が温度ひび割れの発生を助長させる危険性のある地域についても指摘することができた。

以上のように、温度ひび割れハザードマップを構築したことで福島県内のひび割れ発生確率を四季別に視覚的に表すことができた。

6. まとめ

本研究では、福島県内の地方別気象条件を考慮したボックスカルバート構造物の温度応力解析を行い、県内のひび割れ発生確率に関するハザードマップの構築を行った。得られた結果を要約すると以下ようになる。

- (1) 福島県は、浜通り、中通り、会津という気象条件の異なる3地方に分かれ、その結果、各地で打込み時期ごとのひび割れ発生確率が大きく異なる。
- (2) 温度ひび割れ発生確率は、季節の変化に伴う外気温の影響に加え、平均相対湿度の影響を大きく受ける。解析期間をパラメータとし、この影響を考慮することにより、各地の相対湿度の変化を解析結果に反映させることができた。
- (3) 福島県内におけるボックスカルバート構造物の温度応力解析結果に基づき、GISにより、四季別に温度ひび割れ発生確率分布を表したハザードマップを構築することができた。
- (4) 温度ひび割れハザードマップより、温度ひび割れに対する福島県内の地域特性や、四季の変化によるひび割れ発生確率の推移を示すことができた。

これまで地方におけるマスコンクリートの温度ひび割れ対策は画一的に講じられてきた感が否めないが、本研究により、温度ひび割れに対する地域性、四季の変化をわかりやすく可視化することができた。また、今回は、福島県を例に検討を進めたが同様の手法を用いれば、他県、東北地方、さらには全国のひび割れハザードマップを構築することも可能である。こうした研究成果を公開し、自治体等で利活用されれば、各地で温度ひび割れに対する適切な対応が図られるものと期待される。

今後は、各地の相対湿度に関するデータを、実際に観測すること等により収集し、温度ひび割れハザードマッ

プの精度の向上をはかり、また、異なる構造部材についても同様の検討を行う予定である。

謝辞：本研究の一部は、文部科学省学術フロンティア推進事業(日本大学工学部)：「地域における社会環境基盤の保全と防災力向上を目指した戦略的マネジメント手法の提言(研究代表：出村克宣)」の一環として実施した。また、GISによる温度ひび割れハザードマップの作成は株式会社シビルソフト開発(代表取締役社長 岡田健司氏)が担当した。ここに記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書 施工編，2007.
- 2) 石川雅美，熊谷貴士，子田康弘，岩城一郎：東北地方における温度ひび割れ指数簡易判定式の提案，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No 2，pp.169-174，2008.
- 3) 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，pp.265-272，2003.8
- 4) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書 設計編，2007.
- 5) 日本のすがた： http://www.teikokushoin.co.jp/japan_world/japan/map/form1/07.html，帝国書院
- 6) 気象統計情報： <http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>，気象庁
- 7) Childs, C. : Interpolating Surface in ArcGIS Spatial Analyst, Arc User, pp.32-35, 20