

論文 GIS を活用した東北地方におけるコンクリート建造物の劣化ハザードマップの構築

子田 康弘*1・梅内 大輔*2・岩城 一郎*3・石川 雅美*4

要旨: コンクリート建造物の耐久性向上には、ひび割れの制御や各種劣化の対策が重要である。ひび割れや劣化に影響する要因には、気象条件や地象条件といった地域特性も含まれる。よって、耐久性の評価では、この種の特性に基づくひび割れや劣化に関する情報の把握も必要になる。本研究では、GIS を利用し、耐久性に対する環境作用が厳しい東北地方を対象に、温度ひび割れ発生確率と凍害危険度に関する劣化ハザードマップの構築を試みた。その結果、東北地方の温度ひび割れ発生確率は地域の気象条件に大きく影響すること、簡易手法により凍害危険度をマップで表した結果、従来のマップと遜色なく利用可能なことを示した。

キーワード: 劣化ハザードマップ, 温度ひび割れ, 凍害, GIS, 気象条件, 東北地方

1. はじめに

近年、建設投資額の減少や高度経済成長期に整備されたインフラの一斉老朽化といった社会情勢により、これまで以上に合理的かつ効率的なコンクリート建造物の施工や維持管理計画の策定と実施が迫られている。これを具体化するには、対象とする地域の特徴を理解し、対策が必要な劣化要因が潜在的に高くなる地域や季節を認識しなければならない。加えて、膨大なコンクリート建造物の維持管理を行う上で、建造物が置かれている環境と劣化に関わる主要因との関係が一目でわかるツールの開発も必要になる。しかし、こうした地理的情報に配慮した種々の情報が包括されたツールの構築は端緒についたばかりである。また、東北地方は、他地方に比べ、四季による気象変化が大きく、さらには沿岸部の塩害、東北や内陸部における凍害、および融雪剤散布による複合劣化というようにコンクリート建造物の耐久性に対する環境作用が厳しい地方である。

以上の背景から、本研究では、まず、既報¹⁾に引き続き、東北地方をモデルケースとして、東北地方の気象条件(温度および相対湿度の年間推移)がボックスカルバート建造物の温度ひび割れに及ぼす影響を明らかにするため、東北地方の気象条件を考慮した温度応力解析を行い、GIS を用いた東北地方の温度ひび割れハザードマップを構築した。次に、東北地方の劣化要因より凍害に着目し、GIS を用いて標高と冬期気温データに基づく凍害ハザードマップの構築も行った。

2. 温度応力解析の概要

以下に述べる温度応力解析の概要は、著者らによる既

応の研究²⁾に従ったものであり、その詳細は省略する。

2.1 解析モデル

ASTEAM-MACS Ver.5 (RCCM 社)を用いて 3 次元有限非定常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であり、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ことで考慮しており、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。ひび割れ誘発目地および鉄筋の

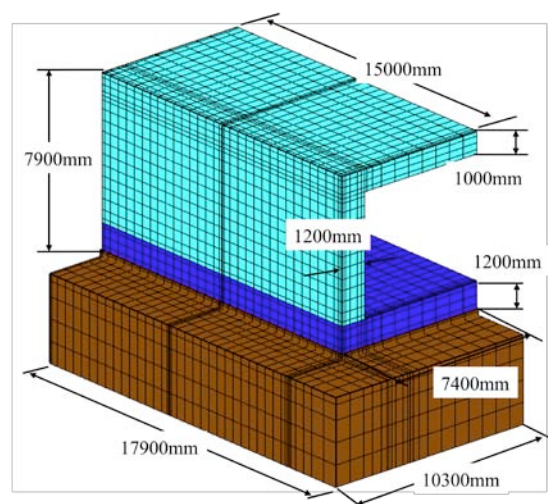


図-1 解析モデル(壁厚 1200mm)

*1 日本大学 工学部土木工学科 准教授 博(工) (正会員)

*2 東日本旅客鉄道株式会社 盛岡支社 北上新幹線保線技術センター

*3 日本大学 工学部土木工学科 教授 博(工) (正会員)

*4 東北学院大学 工学部環境建設工学科 教授 工博 (正会員)

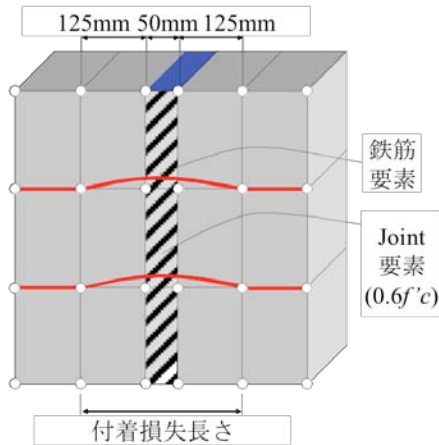


図-2 ひび割れ誘発目地および鉄筋のモデル化

モデル化は、図-2に示すように、ひび割れ誘発目地と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。鉄筋間隔はメッシュ幅(350mm～500mm)となっており、鉄筋比を0.13%とした。

2.2 東北地方6県の温度応力解析

(1) 解析ケース

本解析では、表-1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、解析地点を東北6県で気象観測を行っている観測所の所在地75地点とした。図-3は、これら解析地点を示している。このうち、17地点の観測所(表-1中の*印)では、相対湿度の観測も行っている。解析ではこの地点を含むように、表-1のように各県毎に地域を分け、地域を代表する相対湿度として他の地点の解析に代用した。ここで、現行の解析モデルは、解析期間(例えば1年間)を通した相対湿度の変化を考慮することができないが、年間の相対湿度の変化が大きい地域では解析期間の相対湿度の設定によってひび割れ発生確率に大きく影響することを明らかにしている¹⁾。そのため、解析では、事前解析として解析期間(1ヶ月、2ヶ月、6ヶ月、12ヶ月の4ケース)とその間の平均相対湿度を変化させ、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(およびその間の平均相対湿度)を当該地域の解析期間に設定した。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

表-1 解析ケース

県名	解析グループ	解析地点				打込み時期
青森	A	むつ*	大間	脇野沢		2月 5月 8月 11月
	B	青森*	今別	酸ヶ湯		
	C	深浦*	鯉ヶ沢	弘前		
	D	八戸*	野辺地	三戸	休屋	
岩手	A	宮古*	小本	久慈	軽米	
	B	大船渡*	釜石			
	C	盛岡*	区界	奥中山	荒屋	
		雫石	大迫	沢内	北上	
秋田	A	秋田*	八森	大館	大湯	
		阿仁合	八幡平	岩見三内	田沢湖	
		大曲	本荘	東由利	像湯	
		湯ノ岱				
宮城	A	石巻*	気仙沼	江ノ島		
	B	仙台*	駒ノ湯	川渡	新川	
		蔵王	米山			
山形	A	新庄*	差首鍋	肘折		
	B	酒田*	鶴岡	小国		
	C	山形*	楯岡	大井沢	米沢	
福島	A	小名浜*	相馬	浪江		
	B	福島*	郡山			
	C	白河*	小野新町			
	D	若松*	桧原	猪苗代	金山	
只見		田島	桧枝岐			

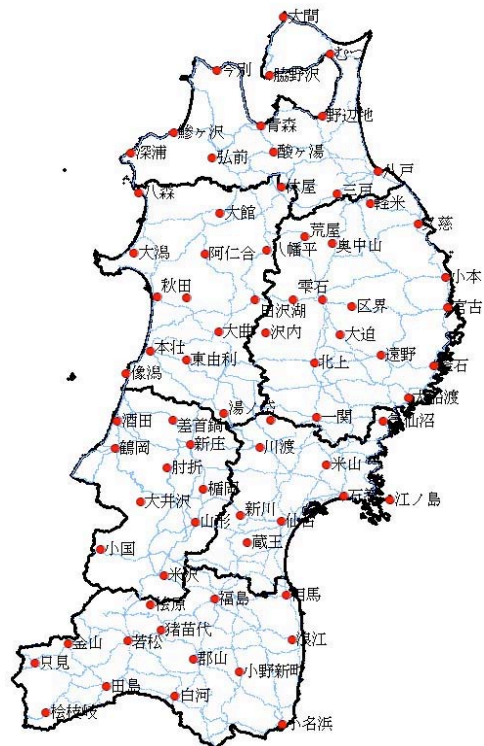


図-3 温度応力の解析地点

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)は解析地点の年間の平均気温とし、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)養生を設定した。養生中の熱伝達率は型枠、打上り面共に8(W/m²°C)

である。そして、脱枠後、および養生終了後の熱伝達係数は $14(W/m^2\text{C})$ とした。

また、誘発目地におけるひび割れ発生は、コンクリートの引張強度(目地部は一般部の 60%の値)を超え、目地部のジョイント要素が切り離れた時点としている。

3. 東北地方の気候

東北地方は、三方向が海に面していることによる海流の影響と、中央を奥羽山脈が南北方向に連なっている地形の影響などから四季により各地域で気候が大きく異なる。以下では、東北地方の気温と相対湿度の1年間の変化について述べる。

東北地方の気温と相対湿度の調査は、気象庁が公表する気象統計情報³⁾より、75地点(図-3参照)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データを用いた。図-4と図-5は、平均気温および平均相対湿度の変化の例を示す図である。図-4には、奥羽山脈を境とした(a)太平洋側と(b)日本海側、および(c)山間部の気温変化を示した。なお、図-4(c)は、各県における標高が最も高い観測所を示すもので凡例中の数字は標高である。図より、太平洋側と日本海側を比べると、気温に関しては小名浜が1年を通して温暖であること以外は太平洋側と日本海側で大きく異ならず、何れも緯度が高いほど気温が低くなる傾向を示した。山間部においては、冬季の平均気温が氷点下を下回り、最も気温の低い地点は酸ヶ湯の1月で -7.6C に達していた。一方、夏季については 20C 前後までしか上がらない傾向であった。次に、図-5は東北地方各地の平均相対湿度を示したものである。図より、相対湿度に関しては、各地で年間の変化が大きく異なる。今回調査した範囲では、相対湿度は総じて日本海側が冬季、太平洋側が夏季に高い傾向であった。また、東北地方で年間を通して相対湿度が高い都市が新庄であり、反対に相対湿度が低い都市が福島であった。

4. GISによる劣化ハザードマップの構築

4.1 温度ひび割れハザードマップの作成方法

温度ひび割れハザードマップは、解析地点のひび割れ発生確率⁴⁾を基に作成した。本検討の温度ひび割れハザードマップは、得られた75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成することで構築した。GISソフトは、ArcGIS(ESRI社)を用い、75地点をサンプリングデータとして逆距離加重法(IDW)⁵⁾による補間を行うことで東北地方のひび割れ発生確率分布を表す地図を作成した。

4.2 凍害ハザードマップの作成方法

凍害は、コンクリート中の細孔水が凍結融解作用を受けることにより発生するものであり、外的要因として、

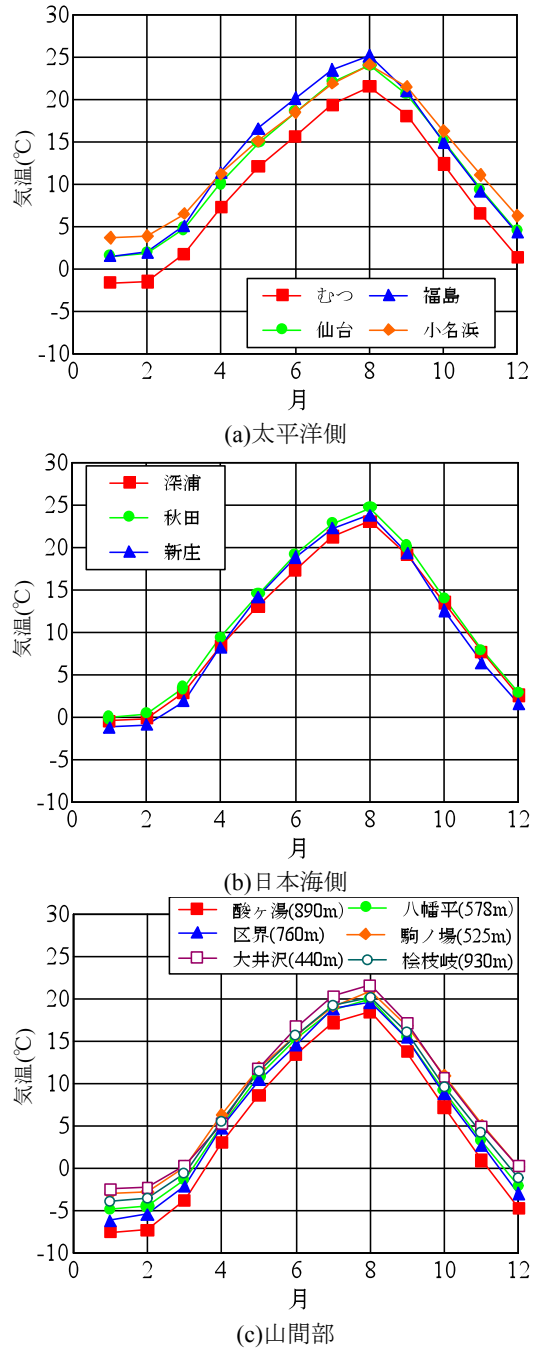


図-4 東北地方の気温変化の例

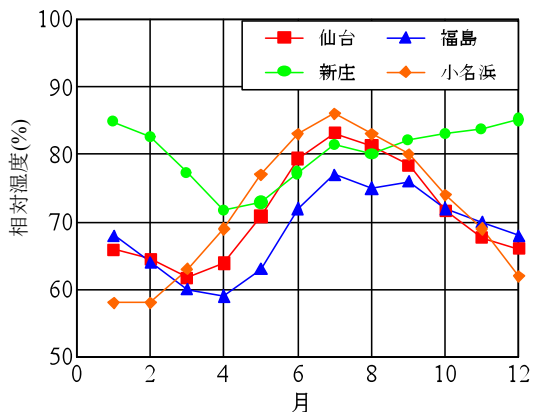


図-5 東北地方の相対湿度変化の例

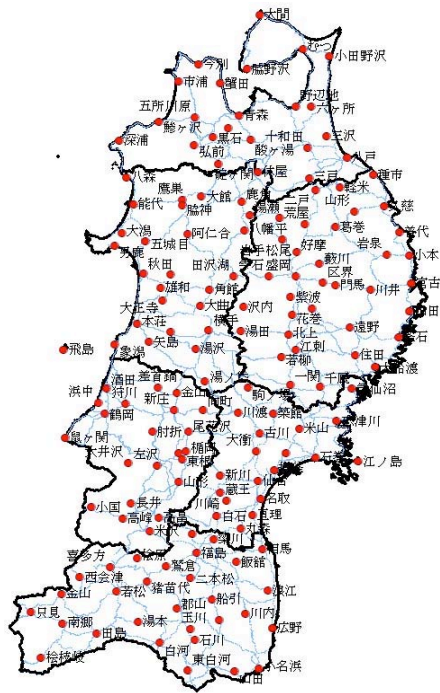


図-6 凍害ハザードマップの作成に用いた地点

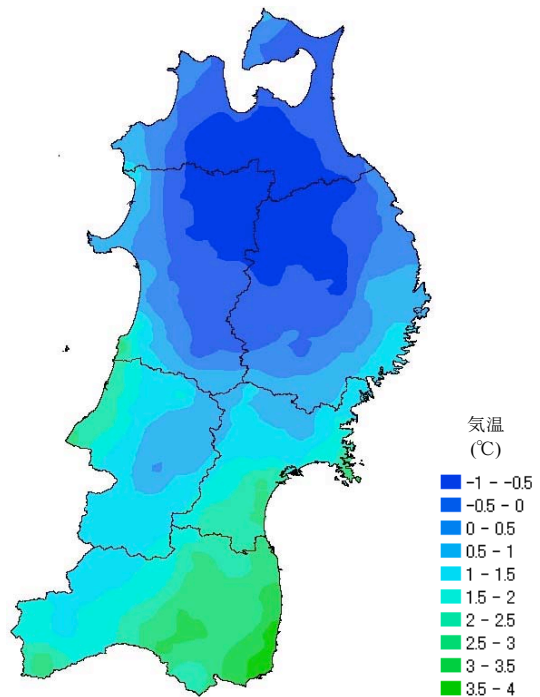


図-7 標高0mに基準化した冬期気温分布図

凍結融解日数、日射量、融雪・降雨量等に依存する複雑な現象であるが、ここではその主要因として冬期の平均気温に着目した。すなわち、図-6に示すように、東北地方の157地点の冬期3ヶ月(12月, 1月, 2月)の気温を気象統計情報³⁾より収集し3ヶ月の平均気温を求め、この情報についてGISを用いて整理した。具体的な作成手順は、まず、各地点の12~2月の平均気温を整理した後、標高による気温差を標高100mの高低差につき0.6°Cの温度差と仮定し、式(1)により各地点の標高から標高0mに基準化した平均気温を求めた。

$$T_0 = T_{ave} + (\alpha \times H_G) \quad (1)$$

ここに、 T_0 は標高0mに基準化した平均気温(°C)、 T_{ave} は冬期の平均気温(°C)、 α は単位気温変化量で0.006(°C/m)、 H_G は標高(m)である。

図-7は、式(1)により求めた157地点の T_0 を4.1同様にサンプリングデータとして補間した基準化冬期気温分布図である。次に、東北地方の地形をGISにより、図-8のように表し、また、図に示すようにGIS上で東北地方を10kmメッシュに分割(693メッシュ)した。この693箇所の10kmメッシュ中心(図-8中の赤丸)の緯度・経度とその位置の標高 H_G を出力した。また、図-7の基準化冬期気温分布図より、693箇所の緯度・経度位置に対応する T_0 を出力した。最後に、693箇所の T_0 と標高 H_G を用い、式(2)により冬期平均気温を算出した。

$$T_{HG} = T_0 - (\alpha \times H_G) \quad (2)$$

ここに、 T_{HG} は対象標高地点の平均気温(°C)である。

凍害ハザードマップは、算出した T_{HG} とその地点の緯度・経度をGISに入力することで作図した。図-9には、

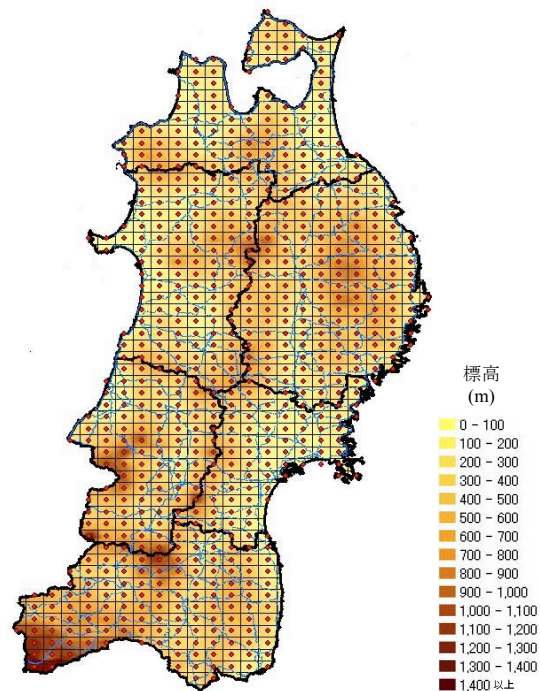


図-8 地形図と10kmメッシュ

この凍害ハザードマップの作成手順をフロー図として示した。

5. 東北地方における劣化ハザードマップの特徴

5.1 温度ひび割れハザードマップ

図-10は、春夏秋冬別の東北地方における温度ひび割れハザードマップを示した図である。図中の色が寒色から暖色に移るほど温度ひび割れ発生確率(以下、単に確率と記す)が高いことを表している。図より、東北地方の特

徴は、まず、予想した通り夏季が最も確率が高くなる一方で、秋から冬は全体的に確率が低くなる傾向になった。また、確率の変化は、南北方向よりも東西方向(太平洋側と日本海側)の方が大きい傾向になった。次に、季節別では、春季が福島市から宮城県の間境付近で確率が高くなるものの、青森県の下北半島の確率は低くなった。夏季は、春季と同様に福島市付近が最も高い値を示すが、山形県新庄市付近や福島県南会津地方で低い値を示した。秋季と冬季は、太平洋側の確率が高い傾向にあるが、日本海側と内陸部は、太平洋側に比べ確率が低い傾向であった。また、都市に着目すると四季を通じて確率が最も高い都市は福島市周辺で、反対に最も確率が低い都市が新庄市周辺であった。

このような東北地方の四季による確率の変化の要因は、確率が最も高くなるように打込み時期の解析期間を設定したことで、乾燥収縮を考慮した温度ひび割れの発生に及ぼす地域の気温と相対湿度の影響が明確になったためである。確率の高い地域は、総じて気温が高く、相対湿度は低いが、逆に確率が低い地域は、相対湿度が高い地域であった。つまり、3章で述べた通り、冬季の日本海側は太平洋側よりも相対湿度が高く、また、福島市周辺は相対湿度が低く(年平均値で 69%)、反対に新庄市周辺は高い(年平均値で 80%)という傾向が明確に反映された結果であると判断される。

以上のように、四季による東北地方のひび割れ発生確率の変化を視覚的にハザードマップとして表すことができた。

5.2 凍害ハザードマップ

図-11 は、作成した凍害ハザードマップを示す図である。図中の緑色系から青色系に移るほど平均気温が低く、凍害の危険性が高い地域を表している。図より、岩手県中央部(北上高地)や岩手県より北部の奥羽山脈に沿う地域、および山形県と福島県の県境と福島県南西部などは、

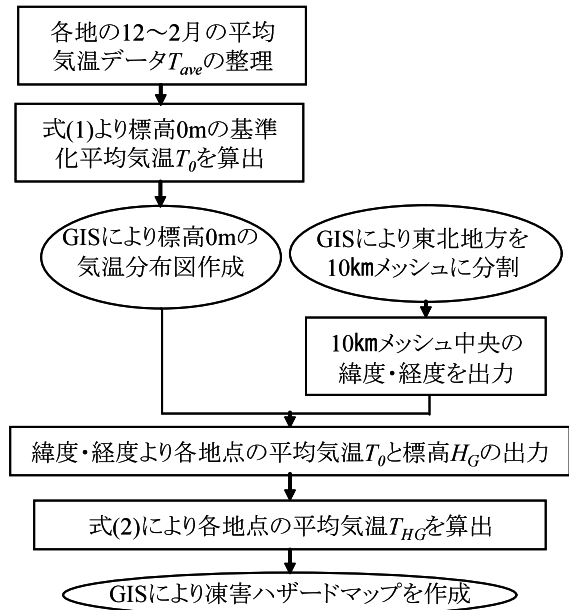


図-9 凍害ハザードマップの作成フロー

標高が高い厳冬地域のため危険度が高い結果を得た。特に、岩手県中央部などの北東北地域は、冬期の平均気温が -5°C ～ -7°C と東北地方の中でも凍害の危険度が高い地域であり、実際に北東北の山間部は凍害で劣化した構造物が多くこれとも概ね一致している。一方で、太平洋沿岸などの海沿いは、凍害の危険性は山間部に比べ低く、宮城県以南の沿岸は東北地方でも比較的温暖なため凍害の危険性が極めて低い地域であった。

図-12 は、従来の凍害危険度マップ⁶⁾である。図に示すマップは、気温や融雪・降雨量などに加え、実構造物の点検データなどの多くの情報を分析した上で凍害危険度を計算し作成されている。これと比較すると、図-11の今回作成した凍害ハザードマップは、危険度の高い地域(例えば岩手県中央部、山形県西部や奥羽山脈に沿った地域)などがほぼ従来のマップと一致していると判断される。これより、作成した凍害ハザードマップは、気温

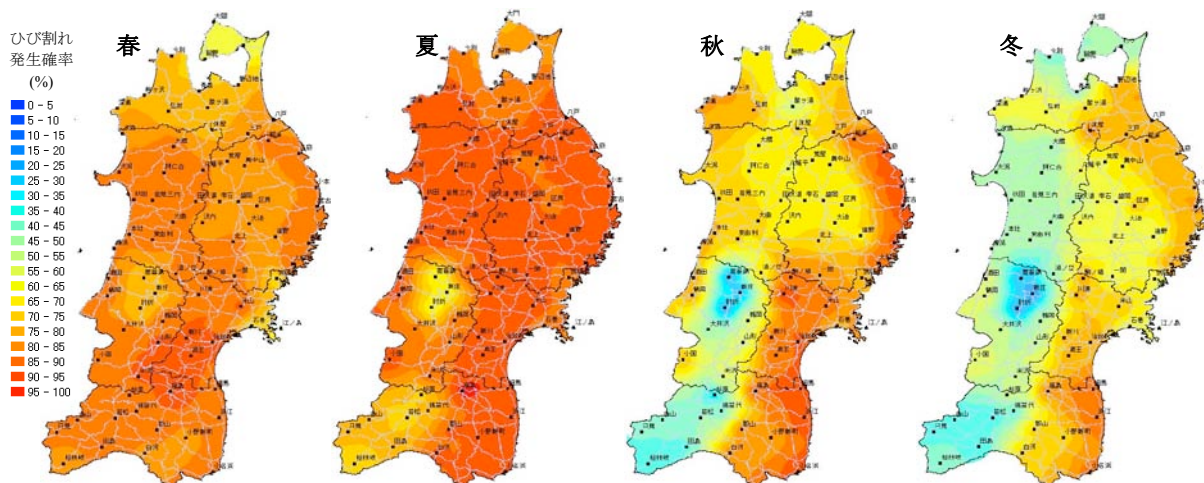


図-10 東北地方の温度ひび割れハザードマップ

データのみに基づくもので、従来のマップに比べ極めて簡単ではあるが、従来の凍害ハザードマップと同様の傾向であることを確認した。また、本手法は、極めて簡単に作成することができるため、他地方や諸外国を対象とした凍害ハザードマップの作成も可能と思われる。

6. まとめ

本研究では、東北地方をモデルケースにGISを活用し、気象や地形といった地域特性が温度ひび割れおよび凍害に及ぼす影響をハザードマップという形で表した。得られた結果を以下に要約する。

- (1) GIS を利用することにより劣化ハザードマップとして、気象や地形といった地域特性を比較的容易に反映させることが可能である。
- (2) 東北地方の気象条件は、四季を通じて各地域で大きく異なり、その影響で打込み時期ごとの温度ひび割れ発生確率が大きく異なる。
- (3) GIS を利用し、地形情報と冬期気温データによる簡便な凍害ハザードマップを構築した。凍害の危険度が視覚的に表されており、従来のこの種のマップとも同様な傾向を示した。

今後は本手法を活用し、飛来塩分や融雪剤散布量といった作用を考慮した、塩害ハザードマップの構築に取り組むとともに、東北地方における橋梁点検データ等をマップに重ね合わせることで東北地方におけるブリッジマネジメントシステム支援ツールの構築を行う予定である。

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、ハザードマップの作成にあたって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)の多大な協力を受けた。ここに記し、謝意を表す。

参考文献

- 1) 子田康弘, 岩城一郎, 石川雅美：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, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, pp.1603-1608, 2009.7
- 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, 2008.7
- 3) 気象統計情報： <http://www.jma.go.jp/jma/menu/>

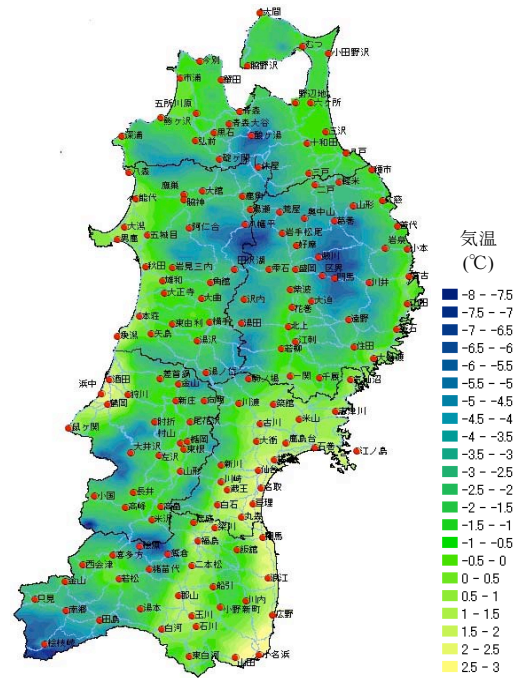


図-11 作成した東北地方の凍害ハザードマップ

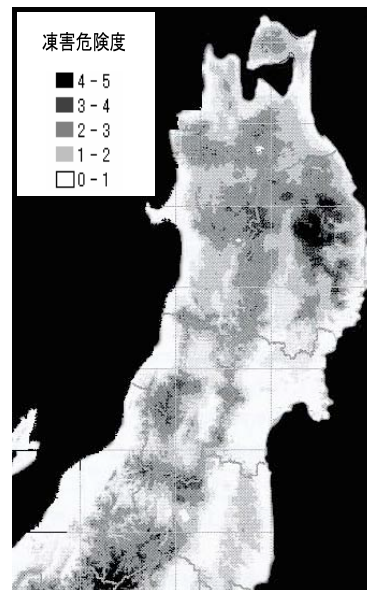


図-12 従来の凍害危険度マップ⁶⁾

report.html, 気象庁

- 4) 土木学会：2007年制定 コンクリート標準示方書 設計編, 2008.3
- 5) Childs, C. : Interpolating Surface in ArcGIS Spatial Analyst, Arc User, pp.32-35, July/Sep. 2004
- 6) 成田健, 小山慎一郎, 三橋博三：実構造物群の調査結果に基づく凍害損傷リスクマップの作成に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.19, No1, pp.29-38, 2008.1