

冬期施工におけるひび割れ注入工法の流動性と充填性

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム ○内藤 勲
国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 島多 昭典

ひび割れ注入材の流動性や品質は、施工時の温度に影響され易い。しかし、冬期施工における施工性や品質への影響について検討した研究は少ない。本報では、低温環境下での施工を想定した注入実験を行い、ひび割れ内部の低温や凍結が、ひび割れ注入材の流動性や充填性に及ぼす影響について検証した。その結果、低温によって流動性の低下や未充填が生じる等、施工時のコンクリート温度が施工性や品質に大きく影響することを確認した。

キーワード：冬期施工、ひび割れ注入工法、流動性、充填性

1. はじめに

コンクリートのひび割れは様々な要因で発生し、水や塩分等の外部劣化因子の浸入口となって、コンクリートの劣化は進行し易くなる¹⁾²⁾。コンクリートのひび割れを修復する方法の一つとして、ひび割れ内部に補修材を充填させてひび割れを閉塞させるひび割れ注入工法（以下、注入工法）がある。注入工法には高圧注入工法と低圧注入工法があるが、現在の主流は、施工が比較的容易であり、注入圧によるひび割れの拡張を抑制できる低圧注入工法である。しかしながら、実際に補修された構造物において、写真-1のように、充填不良や接着不良等が原因と思われる再劣化が生じている事例も見られる。このような不具合は、環境条件や施工条件等が厳しい場合に発生することが多く、特に積雪寒冷地においては、低温の影響による材料の品質低下等の原因が考えられる。このような背景から筆者らは、実際のひび割れ注入工事の現地調査において、施工時の低温が影響したと思われる未充填事例を報告⁴⁾しているが、低温環境下におけるひび割れ注入工法の流動性や充填性等について検討した研究や報告は少ない。

本報告は、ひび割れを模擬した供試体に、施工温度、供試体温度、注入材温度、及び乾湿条件を変化させた状態で注入する試験（以下、注入充填性試験）を行い、低温や凍結が注入性能や注入後の充填状態に及ぼす影響について検討を行ったものである。

2. 試験概要

(1) ひび割れ供試体の作製

ひび割れを模擬した供試体（以下、ひび割れ供試体）の作製方法は、注入試験時にひび割れの形状による影響を少なくするため、出来るだけ類似したひび割れ状態を作製する方法として、山本らの研究⁹⁾を参考にした。内径107mm（厚3.1mm）×長さ200mmの硬質塩化ビニル管（VU管）を型枠として、表-1に示す配合のコンクリートを打設して作製した円柱供試体を、脱型せずに28日間水中養生した後、写真-2に示すように、引張荷重によって割裂させて幅0.2~0.4mm程度のひび割れを作製した。なお、荷重後に硬質塩化ビニル管の復元力でひび割れが閉口するため、0.2mm厚のアルミ箔を表面のひび割れに挟むことでひび割れ幅を確保した。



写真-1 注入後に再劣化したひび割れの事例

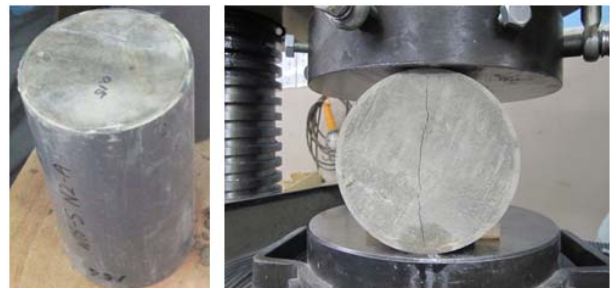


写真-2 割裂ひび割れ作製状況

表-1 コンクリートの配合と注入材の種類

セメントの種類	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単用量(kg/m ³)				Slump (cm)	Air (%)	Cl ⁻ (kg/m ³)
				W	C	S	G			
普通ポルト	20	52.1	43.8	156	300	812	1032	7.5	5.5	0.054

注入材	A	B	C	D	E	F
注入材の種類	エポキシ系			アクリル系	セメント系	
	硬質系 (I) 低粘度形				ポリマーなし	ポリマー含有
粘度 (mPa·s)	570 (23°C)	594 (20°C)	330 (20°C)	300 (5°C)	71 (20°C)	208 (20°C)
可使用時間 (min)	96 (23°C)	50 (20°C)	13 (20°C)	15 (15°C) 30 (5°C)	-	-
適用温度	5~20°C	5~20°C	-4~20°C	-10~15°C	5~30°C	5~30°C
注入方法	自動低圧				手動低圧	自動低圧

表-2 試験ケース

	樹脂系注入材				セメント系注入材			
	施工時室温	注入材温度	供試体		施工時室温	注入材温度	供試体	
			温度	水浸漬			温度	先注入
ケース1	常温 20°C	常温 20°C	常温20°C	なし	常温 20°C	常温 20°C	常温20°C	あり
ケース2			低温5°C	なし			常温20°C	なし
ケース3			凍結0°C	あり			低温5°C	あり
ケース4	低温 5°C	低温 5°C	低温5°C	なし	低温 5°C	低温 5°C	凍結0°C	あり
ケース5			あり	低温5°C			なし	
ケース6			凍結0°C	あり			凍結0°C	

(2) 注入充填性試験方法

注入充填性試験は、作製したひび割れ供試体に表-1に示す6種類の注入材と表-2に示す6ケースの注入条件において注入作業を実施し、注入時の注入材の流動性と注入硬化後の充填性について評価を行った。試験に使用した注入材の種類は、エポキシ樹脂系注入材（以下、エポキシ系）3種類とアクリル樹脂系注入材（以下、アクリル系）1種類、セメント系注入材2種類とした。エポキシ系は一般的に多く使用されている硬質系（I）低粘度形で、注入材AとBは標準タイプ、注入材Cは4°Cでも硬化する特殊タイプである。アクリル系の注入材Dは一般的な硬質系（I）低粘度形であり、-5°Cでも硬化する注入材である。セメント系注入材は注入材Eがポリマーなしの超微粒子セメント注入材、注入材Fは超微粒子ポリマーセメント注入材である。これらの樹脂系注入材とセメント系注入材にそれぞれ6ケースの注入条件を課し、注入時の施工温度、供試体温度、注入材温度を常温20°C、低温5°C、凍結0°Cの組合せ、供試体を自然乾燥させた状態と水分供給させた状態にしたケース、及びセメント系注入材には先行注入の有無を加えた条件で試験を実施した。

ひび割れ供試体への条件の付与は、供試体にひび割れを作製した後、自然乾燥と水分供給を先に行った。自然乾燥は20°Cの恒温室内で12時間以上静置、水分供給は写真-3のように、20°Cの水に7時間浸漬した。その後、常温20°Cは室温20°Cの恒温室内で静置、低温5°Cは室温が5°Cの恒温室内に12時間以上静置したケースと-30°Cの低温室内に10時間静置した後、20°Cの恒温室内で5°Cまで自然融解させたケースとした。凍結0°Cは-30°Cの低温室内に10時間静置した後、20°Cの恒温室内もしくは5°Cの恒温室内で0°Cまで

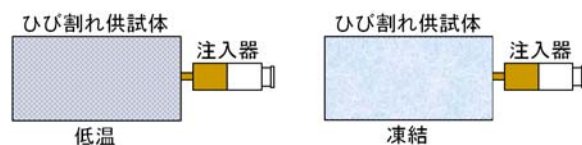


図-1 注入イメージ（供試体の低温・凍結）



写真-3 ひび割れ供試体への水浸漬状況

自然融解させた。なお、水分供給は、ひび割れ供試体全体を水に浸漬させて、ひび割れ内に水が充填された状態と、供試体の凍結0°Cにおいては、ひび割れ内に凍結水が存在する状態を想定した。また、注入作業前に行うひび割れシールや注入台座等の貼付は、低温や水による接着不良を防止するため、条件付与前に実施した。

図-1に低温と凍結のひび割れ供試体に注入するイメージ図を示す。

注入開始時の条件は、ひび割れ供試体に条件を付与した後、施工時の室温及び注入材の温度とした。施工温度が常温20°Cでの注入作業（以下、常温注入）は、室温20°Cの恒温室内で実施し、注入材の混合も20°Cで行った。なお、常温注入において、ひび割れ供試体が低温5°C及び凍結0°Cのケースでは、注入面の表面温度が5°C及び0°Cに上昇した時点で注入を開始した。施工温度が低温5°Cでの注入作業（以下、低温注入）では、室温5°Cの恒温室内で実施し、注入材の混合も5°Cで行った。なお、5°Cは標準的な注入材の適用最低温度であり、実際の補修工事においても5°C以上での施工が一般的である。

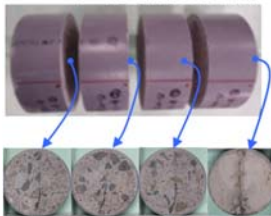
注入方法は、写真-4のように、ひび割れ供試体を水平にして縦ひび割れにした状態で供試体の片側を注入面とし、ひび割れの中心から注入した。すべてのケースにおいて貫通ひび割れを想定して排出面のひび割れを開放した状態で実施した。なお、注入に使用した注入器具や注入手法は、各注入材製品の推奨方法とし、注入作業は、作業者の低熟練度による施工不良等を極力少なくするため、各注入材の専門の注入作業員が実施した。

流動性に関する評価は、注入材が注入開始から排出面に排出するまでの時間（以下、排出時間）を測定し、それぞれのケースにおける注入材の流動特性を評価した。

試験体に注入材を注入



5cm毎に試験体を切断



注入材の充填分布を測定

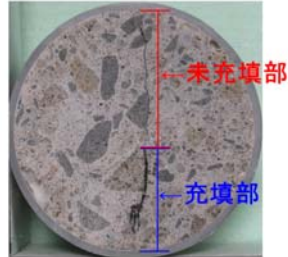


写真4 注入状況と注入材の充填分布の測定例

充填性の評価は、それぞれのケースにおいて、注入後のひび割れ供試体に注入材がどの程度充填されているかを測定した。注入後、注入材の硬化が安定する一般的な期間として、注入開始から樹脂系注入材は1週間、セメント系は4週間、20℃の恒温室に静置・養生した。なお、低温注入のケースは、注入材の流動停止を確認した後に20℃の恒温室に移設した。養生後、写真-4に示すように、ひび割れ供試体の注入面から5cm、10cm、15cmの位置で輪切りに切断し、各切断面と排出面の計4断面をルーペで1mm単位で目視計測して断面毎に注入材の充填分布を測定した⁷⁾⁸⁾。これらの結果から各条件における注入材毎の充填性について評価を行った。

3. 試験結果

(1) 樹脂系注入材

図-2 にエポキシ系標準タイプの注入材AとBの排出時間を示す。標準タイプでは、低温注入になると排出時間が非常に長くなる結果となった。これは、低温になると粘性が高くなり流動性が低下する樹脂系注入材の性質のためである。ひび割れ供試体が凍結したケース3とケース6では、注入材がひび割れ内部の凍結水によって流動が停滞したが、時間とともに供試体の温度が上昇してひび割れ内の凍結水が融解すると、注入材の流動は復活したと考えられる。しかし、注入材はひび割れ内で冷やされて粘性が高くなり、流動性が低下してゆっくりと排出面まで流動したと考えられる。また、注入材が低温になったことで、可使時間も長くなったため、途中でゲル化しなかったと思われる。なお、写真-5のように、ひび割れ内部の凍結水は注入材と混ざりながら排出面から排出していた。エポキシ系は水と混ざって硬化すると所定の強度よりも低くなって硬化後の品質は低下することが一般的に知られているが、注入時に水が混合した場合の流動性について、今回の試験では特に大きな違いは確認出来なかった。

次に、図-3 にエポキシ系特殊タイプの注入材Cとア

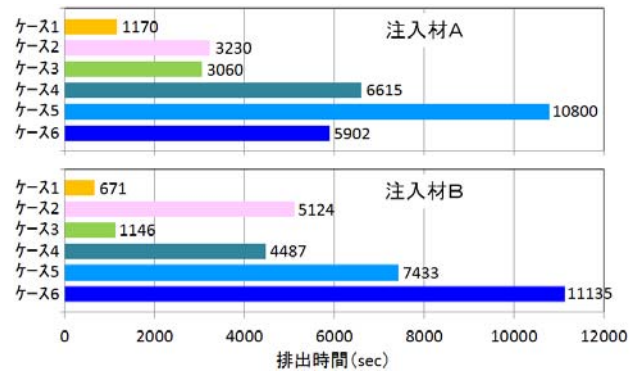


図-2 各ケースの排出時間 (注入材A、注入材B)



(左: 水と混ざり濁った注入材、右: 通常状態の注入材)

写真5 樹脂系注入材の排出状況例

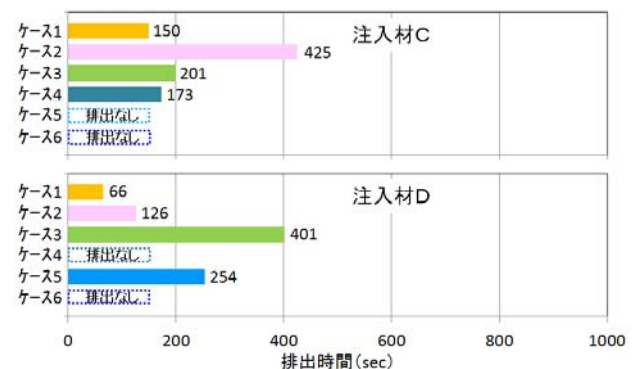


図-3 各ケースの排出時間 (注入材C、注入材D)

クリル系の注入材Dの排出時間を示す。両注入材共に粘性が低く、低温でも流動性があり、0℃以下でも硬化する性能を持つため、標準タイプと比べると全体的に排出時間は非常に短くなった。アクリル系の注入材Dはエポキシ系の標準タイプと同様に低温注入のほうが排出時間が長くなる傾向が見られたが、特殊タイプの注入材Cは常温と低温で大きな差は見られなかった。しかし、両注入材共に低温注入のケースで排出しなかったケースがあった。両注入材で排出しなかったケース6は、注入材A、Bのケースと同様に、ひび割れ内の凍結水による注入材の流動の停滞と低温による注入材の流動性の低下によって充填に時間がかかり、元々可使時間が短い性能のため、

注入材が排出面まで届く前にゲル化して流動が停止し、そのまま硬化してしまったと思われる。注入材Cのケース5、注入材Dのケース4は凍結なしの低温注入であるが、ひび割れ内部が充填されにくい状態であったと推測され、低温で注入材の流動性が悪くなり、充填に時間を要したことで途中でゲル化してしまったと考えられる。

以上のことから、樹脂系注入材の注入時の流動性は、注入材の温度変化による粘性の変化と可使時間の変化に大きく影響されることがわかった。

次に、図-4に注入材A～Dの各ケースにおける注入後の注入材の充填分布を示す。注入材AとBはすべてのケースでひび割れ内に注入材がほぼ充填されていた。このことから、注入材AとBは低温であっても凍結していなければ、時間はかかるが深さ20cm程度まではほぼ充填することが可能であることがわかった。一方、注入材CとDは、排出しなかったケースでは途中から未充填となっているが、排出したケースでは常温・低温にかかわらず概ね充填されていた。供試体のひび割れ上部、特に排出面側に若干の未充填部が見られるが、これは、供試体の排出面が開放されているため、粘性が低く流動性の高い注入材では排出口で流下してひび割れ上部に空気が入るためである。なお、低温注入のほうが未充填部が少ないのは、注入材は低温のほうが粘性が低いために流下が少なかったと思われる。このことから、注入材CとDは、低温施工において短い時間で注入材を充填することが可能であるが、充填に時間を要すると深さ20cm程度でも注入材が充填されない場合もあることがわかった。

以上のことから、樹脂系注入材の充填性は、流動性の評価と同じく、注入材の粘性と可使時間に大きく影響されるため、特に低温施工では、可使時間を考慮した施工管理が重要であると考えられる。したがって、防寒対策による施工室温の管理だけではなく、注入時の注入材の温度管理とコンクリート内部の温度管理も必要である。

(2) セメント系注入材

図-5にセメント系の注入材EとFの排出時間を示す。セメント系は粘性が非常に低く、ほぼ水のような高い流動性の注入材であるため、排出時間は非常に短い結果となった。なお、粘性が若干高いポリマー含有の注入材Fの方が注入材Eよりも全体的に排出時間は長くなった。また、樹脂系注入材と同様に低温のケースのほうが排出時間は若干長くなる傾向が見られた。その中で、両注入材共にケース4の排出時間が一番長くなり、注入材Eのケース3とケース6では、排出面からの排出がなく注入停止となった。排出時間が最も長くなった注入材Fのケース4は、常温注入で供試体が凍結0℃のケースであるが、先行水がひび割れ内で凍結したため注入材が停滞し、凍結した先行水が融解してから注入材の流動が復活したことから排出までに時間がかかったと推測する。同様に低温注入で供試体が凍結0℃のケース6でも先行水が凍結して排出時間が長くなったが、常温注入のケース4の



図-5 各ケースの排出時間（注入材E、注入材F）

ほうが排出時間は長かった。しかし、これは温度の影響ではなく、ケース4の供試体の排出面側のひび割れ幅が元々非常に狭かったことから充填に時間が長くかかったと思われる。また、注入停止となった注入材Eのケース3とケース6においても先行水が凍結したために注入材の流動が停滞し、注入材Eの注入手法が手動ポンプ式であったため、手動ポンプが押せなくなった時点で注入作業を終了して注入停止となっている。ただし、供試体が凍結しているケース4では排出面から注入材が排出したことから、この場合は先行水の凍結の影響が少なかったと考えられ、ひび割れ内部の空隙の状態や凍結水の状態によって注入材の流動が左右される場合もあることがわかる。なお、常温注入における先行注入の有無では、特に排出時間に大きな違いは見られなかったことから、ドライアウト現象による流動性の変化は確認出来なかった。

以上のことから、セメント系注入材の注入時の流動性は、低温による影響で流動性は若干低下するが、ひび割れ幅やひび割れ内部の状態による影響のほうが大きいと思われる。また、今回の試験では先行注入を行ったすべてのケースで先行水が排出面から排出しているが、施工環境が常温であっても、ひび割れ内に残った先行水が注入材を注入する間に凍結するほどコンクリートが冷えている状況では注入は困難になる。したがって、注入材を温水で練り混ぜる等の配慮のほか、コンクリート自体の温度上昇対策も必要である。

次に、図-6に注入材EとFの各ケースにおける注入後の注入材の充填分布を示す。常温注入のケース1では、両注入材共にほぼ充填されているが、注入材が流下してきたと思われる未充填部が若干見られる。先行注入なしのケース2では、両注入材共にひび割れの中心のみに注入材が充填されており、ひび割れの上下部に注入材が行き渡っていない、いわゆるドライアウト現象が見取れる。注入停止となった注入材Eのケース3とケース6では、深さ5cmで注入材が停滞している。それ以外の低温もしくは凍結のケースでは、両注入材共に概ね充填されているが、ひび割れの上部和下部に未充填部が見られた。セメント系は粘性が低く流動性が非常に高いことか

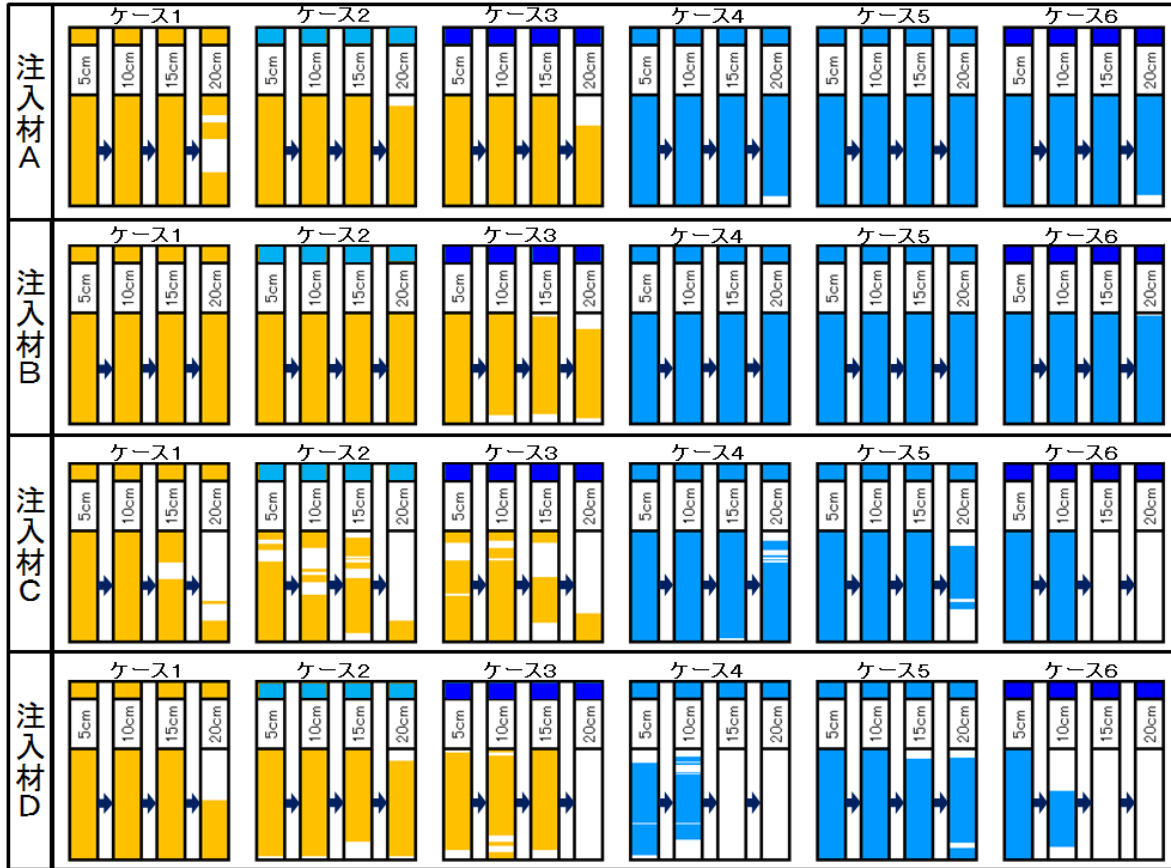
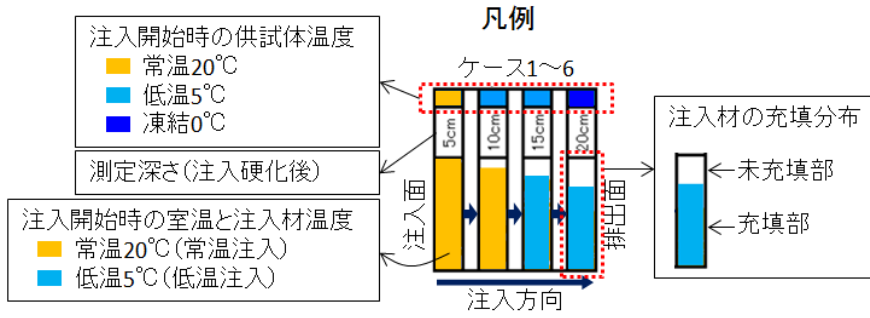


図4 各ケースの注入材の充填分布 (樹脂系：注入材A～D)

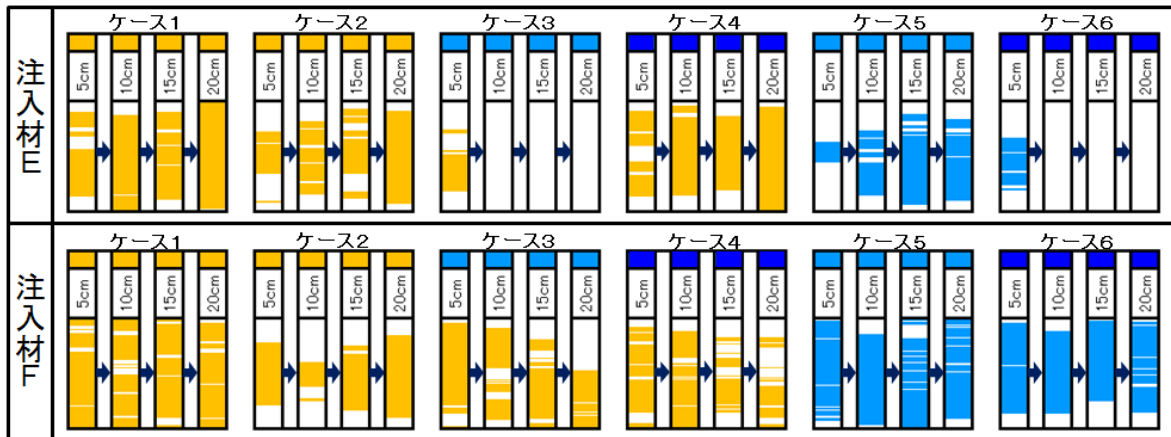


図6 各ケースの注入材の充填分布 (セメント系：注入材E、注入材F)

ら、細管現象によって微細ひび割れまで充填される性能を有するのが一般的である。このため、ひび割れの上部のみの未充填であれば、注入材の流下が原因と考えられるが、下部にも未充填があったことから、ひび割れ供試体の低温や凍結によって注入材の流動性の低下や微細なひび割れにある水分の凍結などが生じて、写真-6のように、注入材が細部まで行き渡らずにひび割れ内部の空隙が大きい中心部付近を通過して集中的に排出されたと考えられる。



写真6 排出口の中心部付近から排出している状況例

以上のことから、セメント系注入材の充填性は、ひび割れ内部の状態に影響され易いが、コンクリートが低温や凍結の状態においても、注入材が微細ひび割れ部分に十分に充填されない場合があることがわかった。したがって、セメント系注入材の冬期施工においても、樹脂系注入材の結果と同様、コンクリート内部の温度管理が非常に重要であると言える。

4. まとめ

ひび割れ注入工法の冬期施工における流動性と充填性について、室内実験によるひび割れ供試体を用いた注入充填性試験を行った結果、ひび割れ注入工法の冬期施工における留意点として、以下の知見を得た。

- (1) 樹脂系注入材は、低温の影響で流動性が低下する。その際、注入材の可使時間が早いと注入途中でゲル化して注入が停止する場合があるため、注入材の粘性と可使時間の関係を考慮した施工管理が必要である。
- (2) セメント系注入材は、低温のケースでも短い時間で注入が可能であるが、コンクリートが低温の場合、先行水が凍結して注入出来ない、もしくは微細ひび割れ部に注入材が十分に充填されない場合がある。

(3) ひび割れ注入工法の冬期施工では、防寒対策による施工室温の管理だけでなく、注入時の注入材とコンクリート内部の温度管理も必要である。

今後、本研究で得られた結果を踏まえて、ひび割れ注入工法の冬期施工後の品質検査方法や耐久性等についてさらに研究を進めていく予定である。

謝辞

本研究において、注入充填性試験の注入作業に際し、共同研究者である注入材メーカー各社に多大なるご協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 建設省：建設省総合技術開発プロジェクト，コンクリートの耐久性向上技術の開発，報告書，第二編，昭和63年11月，pp.217-221，1988.11
- 2) 社団法人日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針-2009-，pp.120-123，2009.3
- 3) 渡辺博志：コンクリート構造物の信頼性の向上-ひび割れの影響-，土木技術資料 平成24年1月号，pp.42-45，2012.1
- 4) 内藤勲、田口史雄、島多昭典：ひび割れ注入工法の現状調査と凍結融解作用が注入後の耐久性に及ぼす影響，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第13巻，pp.517-522，2013.11
- 5) 村中智幸、内藤勲、島多昭典：ひび割れ修復工法の選定および施工実態に関する調査，第57回北海道開発技術研究発表会，IK-9，2014.2
- 6) 山本昌宏、谷村成、藤井隆史、安藤尚、綾野克紀：微細なひび割れを持つコンクリート試験体の作製方法とそれをもちいたひび割れ補修材の性能確認試験方法に関する研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第12巻，pp.467-472，2012.11
- 7) 内藤勲、田口史雄：小径コアによるひび割れ注入後の充填評価方法に関する検討，土木学会第68回年次学術講演会，V-390，2013.9
- 8) 内藤勲、島多昭典、三原慎弘：施工時の低温環境がひび割れ注入工法の注入充填性に及ぼす影響，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第14巻，pp.303-308，2014.10