論文　フレッシュコンクリートのこわばりが施工性能に与える影響に関する実験的検討

根本　浩史[*1]・平野　修也[*2]・伊達　重之[*3]・橋本　紳一郎[*4]

要旨：初期欠陥発生の要因の一つに，コンクリート特有の性状変化である「こわばり」があると考えられる。本論文では静置条件下で生じるこわばりの簡易的な評価方法として，ベーンせん断試験による最大せん断応力の測定が有効であることをモルタルを対象とした試験により確認した。また，静置したコンクリートのこわばりを低減する混和剤(こわばり低減剤)を用いることで，コンクリートのこわばりを低減することが施工性能の向上に寄与することをU型充填試験，加振変形試験，変形性評価試験を通じて確認した。

キーワード：初期欠陥，回転粘度計，ベーンせん断試験，降伏値，こわばり低減剤，施工性能

1. はじめに

近年，社会基盤整備に大きな役割を果たすコンクリート構造物を取り巻く状況は大きく変化し，耐震性能の要求水準の引き上げによる鋼材の増加や，資源の有効利用の社会的需要に応じるための材料や配合の変化は，コンクリート施工の難易度を著しく増大させている。その結果，施工における初期欠陥が発生するリスクが増大する結果になっている。初期欠陥の発生は，上述した要因によるものに限らず多岐に渡るが，その一つにセメント・骨材・混和材料などの複合材料であるコンクリート特有の性状変化である「こわばり」がある[1)]。

コンクリートのこわばりとは，流動状態から一旦静置されて時間が経過することにより硬くなり，所要の流動性が損なわれて動きづらくなる若しくは動かなくなる現象を指す。この現象は，骨材の接触や内部摩擦による影響も考えられるが，主に練混ぜによって分散されたセメント粒子が静置によって凝集し，凝集体を形成することに起因すると考える。セメントの凝集体は，時間の経過に伴って三次元的に拡張し，凝集構造を形成するものと考えられる。このことは，例えば，一旦圧送を中断したコンクリートにおいて，再び圧送(流動)し始める際に大きな抵抗として作用するものと考えられる。

このようにコンクリートの施工途中にコンクリートがこわばって施工性能が大きく低下することは，実務において経験的に知られているが，これらを実験的に検証した事例は少ない。また，コンクリートのこわばりを評価する試験方法が確立されておらず，未だ研究段階にあると言える。そこで，本研究では，フレッシュコンクリートのこわばりが施工性能に及ぼす影響を検証するため，一般的なコンシステンシー試験であるスランプ試験の他に，回転粘度計を用いたレオロジー試験，さらに既往の研究[2)]を参考にベーンせん断試験を実施して，コンクリートのこわばりを数値化することを試みた。さらに，施工性能を評価する各種試験(U 形充填試験・加振変形試験・変形性評価試験)を実施し，コンクリートの材料特性であるこわばりを評価する試験結果と比較検討した。

なお，本研究で対象とするこわばりは，静置状態のコンクリートを動かすのに必要な外力が，定常状態に比べて増加する現象と定義し，コンクリートの見かけの降伏値と関連があるものと仮定して実験を推進した。

2. 本論文の構成

本論文ではまず，コンクリートのこわばりの評価方法についてモルタルを対象に検証した。具体的には，静的状態から流動するのに必要となる見かけの降伏値を回転粘度計で測定し，ミニスランプ，ミニスランプフロー試験，さらに粘土の非排水せん断強度を求めるのに実用されているベーンせん断試験結果との関係性を確認した。

次に，コンクリートを対象に配合や使用材料の影響がこわばりに及ぼす影響について，スランプ試験およびベーンせん断試験を実施して確認した（Step1）。この試験結果を基に，こわばりが大きくなる配合を選定したうえで，U 形充填試験，加振変形試験，変形性評価試験によって施工性能を評価し，スランプ試験およびベーンせん断試験の結果との関係性を確認した（Step2）。

3. モルタルによるこわばりの簡易評価方法の検証

3.1 実験概要

(1) 使用材料および試験配合

本実験で使用した材料を**表－1**に示す。細骨材は山砂

*1 清水建設株式会社　土木技術本部基盤技術部　コンクリートグループ　グループ長　修士(工学)　(正会員)
*2 株式会社フローリック　技術本部コンクリート研究所　修士(工学)　(正会員)
*3 東海大学　工学部土木工学科　教授　博士(工学)　(正会員)
*4 千葉工業大学　創造工学部都市環境工学科　准教授　博士(工学)　(正会員)

と砕砂の 2 水準，高性能 AE 減水剤は標準的なタイプと増粘剤一液型の 2 水準設けた。

モルタルの配合を**表－２**に示す。単位水量 175kg/m^3 で単位セメント量 500kg/m^3 のコンクリート配合を想定した a 配合，単位水量 165kg/m^3 で単位セメント量 270kg/m^3 を想定した b 配合とした。また，それぞれの配合に対して細骨材の種類を山砂から砕砂に変更した場合，高性能 AE 減水剤を増粘剤一液タイプに変更した場合ついても検証した。目標ミニスランプは，表中の数値とした。

(2) 試験項目

試験項目を**表－３**に示す。目標ミニスランプが得られた試料を対象に回転粘度計による測定とベーンせん断試験を行った。それぞれの配合に対して，測定前に試料を攪拌する場合と，モルタルのこわばりが評価できるように試料を容器内に静置させた場合について，練上り直後，練上りからの経過時間 30,60,90 分後に測定した。

回転粘度計のスピンドルは，十字断面の 4 枚羽(高さ H×幅 D=40×20mm)とした。ベーンせん断試験機は回転粘度計と同一寸法のスピンドルを装着し，一定のせん断速度 6rpm となるよう手動で回転させて，最大トルク値 M_{max} を得た。M_{max} を Cadling の式[3]を簡素化した式(1)に代入し，モルタルの最大せん断応力 τ_v を算出した。

$$\tau_v = M_{max}/\pi(D^2H/2 + D^3/6) \qquad (1)$$

3.2 試験結果および考察

(1) 各試験値の経時変化

ミニスランプ，ミニスランプフロー，回転粘度計の最大せん断応力，ベーンせん断試験の最大せん断応力の経時変化を**図－１**に示す。

ミニスランプおよびミニスランプフローは，時間の経過と共に低下する傾向を示し，測定前に試料を攪拌する場合(図中凡例の攪拌)に比べて，静置条件の試料(図中凡例の静置)の方が測定値の低下量が大きくなった。これは静置によるこわばりの影響であると考える。砕砂を使用した配合は，山砂を使用した配合よりも低下量が小さい結果となった。本実験では，目標スランプを得るのに必要な高性能 AE 減水剤の使用量が山砂を使用した場合(C×1.2%)よりも砕砂を使用した方(C×1.4%)が多くなり，スランプ保持性の底上げに寄与したものと推察される。

また，通常の高性能 AE 減水剤を使用した場合と増粘剤一液型を使用した場合では，後者の方が静置条件下でのミニスランプおよびミニスランプフローの低下量が大きくなった。一方，回転粘度計およびベーンせん断試験で得られた最大せん断応力の値は，増粘剤一液型の方が大きくなる傾向を示した。これは，増粘剤によって静置時のこわばりが増大することを示唆するものであり，既往の研究結果[4]とも一致した。

表－１　使用材料

材料	記号	概要・品質・主成分
水	W	上水道水(つくば市)
ｾﾒﾝﾄ	C	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ(密度:3.16g/cm^3)
細骨材	S1	山砂(静岡県掛川市 表乾密度:2.56g/cm^3, F.M.:2.67)
	S2	砕砂(茨城県桜川市 表乾密度:2.61g/cm^3, F.M.:2.94)
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤(標準形 I 種 JISA6204 適合品)
	VSP	増粘剤一液型高性能 AE 減水剤(標準形 I 種)

表－２　モルタル配合

No.	W/C (%)	単位量(g/L)				S/C	目標 ﾐﾆｽﾗﾝﾌﾟ (cm)	混和剤 種別
		W	C	S1	S2			
a	35.0	264	754	1248	-	1.65	12.0	SP
a’				-	1272	1.69		SP
a”				1248	-	1.65		VSP
b	61.1	249	407	1567	-	3.85	4.0	SP
b’				-	1598	3.92		SP
b”				1567	-	3.85		VSP

表－３　試験項目

項 目	概 要
ミニスランプ試験 ミニスランプフロー試験	ミニスランプコーンを使用して目標ミニスランプが 12 及び 4 ㎝が得られるように混和剤添加率を調整
回転粘度計による測定	回転粘度計(BROOKFIELD 社製 RST-SST)を用いて，ヒステリシスループで得られる極大せん断応力（みかけの降伏値）を測定
ベーンせん断試験	回転粘度計と並行して最大トルク値を測定

写真－１　ベーンせん断試

写真－２　回転粘度計

(2) 回転粘度計の最大せん断応力と各試験値との関係

図－2 に回転粘度計の最大せん断応力とミニスランプおよびミニスランプフローの関係を示す。多少のばらつきはあるが，回転粘度計の最大せん断応力が大きくなるにつれてミニスランプ，ミニスランプフロー共に低下する傾向を示し，ある点を境に低下度合いが頭打ちとなった。この傾向は，細骨材の種類やセメント量，高性能 AE 減水剤の種類，攪拌と静置の条件を問わず同様であった。ミニスランプ 5cm，ミニスランプフロー130mm 付近まではミニスランプ試験の結果から最大せん断応力を推定できる可能性があるが，流動性が低い，即ちこわばりが大きい場合は，最大せん断応力の違いを区別できないことが示唆された。**図－3** により，回転粘度計とベーンせん断試験の測定結果を比較した。どちらもせん断応力 3000Pa 程度までは直線回帰できる傾向が示され，静置し

た試料では 3000Pa 以上になるとベーンせん断試験の測定値が卓越し，指数的に上昇した。これは，ベーンせん断試験における手動測定では，加速度を制御するのが困難であり，機械測定に比べてせん断応力が高くなる可能性を示唆している。この点は今後の課題であるが，ベーンせん断試験は，回転粘度計の最大せん断応力(見かけの降伏値)をある程度推定可能であり，特にミニスランプ試験では評価できない低スランプ領域におけるこわばりを適正に評価する手法として有効であることが示唆された。

4. コンクリートのこわばりが施工性能に与える影響の検証

4.1 使用骨材，こわばり低減剤，セメント量がこわばりに与える影響の検証（Step1）

コンクリートのこわばりが施工性能に与える影響を検証するにあたり，先ずは室内試験を通じて配合や使用材料の違いがこわばりに与える影響について検証した。

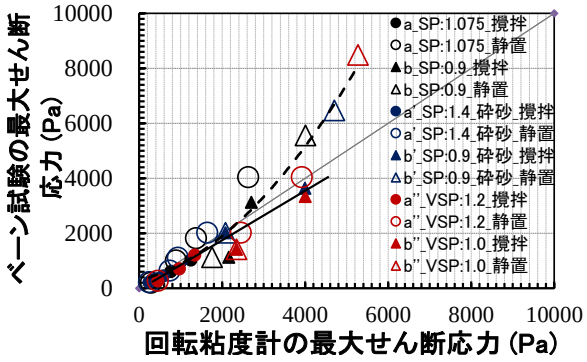
(1) 使用材料および試験配合

本実験で使用した材料を**表－４**に示す。細骨材は山砂とし，粗骨材は石灰砕石と砂岩砕石の 2 水準設けた。

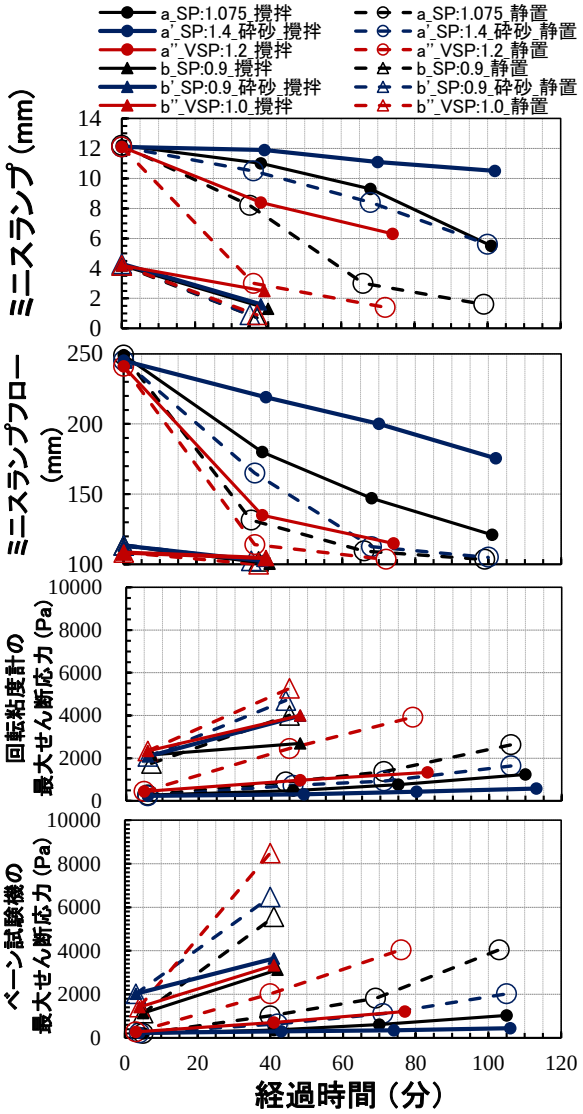
試験配合を**表－５**に示す。セメント量の影響については，砂岩砕石の配合でセメント量を 3 水準設けてこわばりの程度を比較した。また，それぞれの配合でこわばり低減剤 [1](以下，図中では TR と略称する)を用いた場合の効果を確認した。

(2) 試験項目

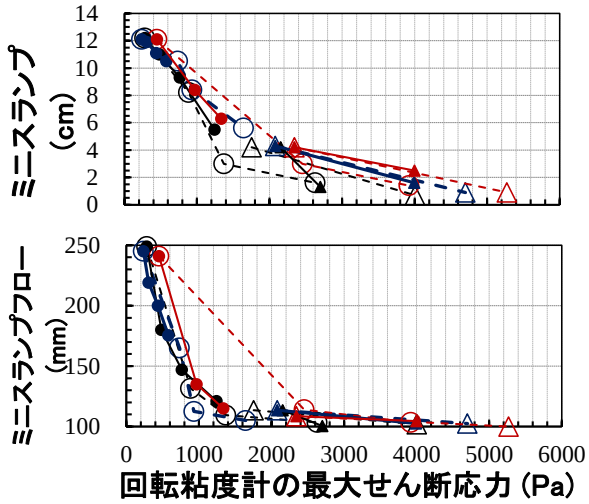
試験項目は，前章でこわばりの簡易的な評価方法として効果的であることが示唆されたスランプ試験およびベーンせん断試験を実施した。測定は測定前に試料を攪拌する場合と，モルタルのこわばりが評価できるように試料を容器内に静置させた場合について練上り直後，練上りからの経過時間 30,60,90 分後に測定した。回転粘度計のスピンドルは十字断面の 4 枚羽(高さ H×幅 D=100×50mm)とし，式(1)により最大せん断応力 τ_v を算出した。



図－３　回転粘度計とベーン試験の測定結果の比較（攪拌および静置）



図－１　各試験値の経時変化（攪拌および静置）



図－２　回転粘度計の最大せん断応力とミニスランプおよびミニスランプフローの関係（攪拌および静置）

(3) 試験結果および考察

配合 1 と配合 2 のスランプ経時変化を**図－４**に，ベーンせん断試験の経時変化を**図－５**に示す。配合 1 および配合 2 共に，攪拌および静置のいずれの条件においても，こわばり低減剤を用いることでスランプロスおよび最大せん断応力が顕著に低下する傾向が認められた。

また，石灰砕石を用いた配合 1 の方が，砂岩砕石を用いた配合 2 よりも攪拌および静置のいずれの条件でもスランプロスが小さく，ベーンせん断試験の最大せん断応力も小さくなる結果となった。これは，後者の方がこわばりやすい配合であることを示唆するものであるが，高性能 AE 減水剤のスランプ保持性能もしくはこわばり低減剤によるこわばり低減効果に相違がある可能性，もしくは石灰砕石に付着する微粒分がこわばりの低減に寄与している可能性があると考える。

次に，セメント量の違いについて配合 2~4 を対象に練混ぜから 60 分経過後のスランプとベーンせん断試験結果を**図－６**と**図－７**に示す。ここでは，**図－４**および**図－５**の結果から，石灰砕石よりも砂岩砕石を用いた方がこわばりが大きくなったことを考慮した。**図－６**によると，セメント量の多い配合 3 が，セメント量の少ない配合 2 や配合 4 に比べて，攪拌および静置共にスランプロスが小さい結果となった。これはセメント量が増えることで高性能 AE 減水剤の添加量が増加し，スランプ保持性能が向上したことによるものと考える。

図－７に示すベーンせん断試験の結果では，スランプロスが最も小さい結果となった配合 3 の最大せん断応力は，配合 2 よりも小さくなった。しかしながら，配合 3 よりもスランプロスが大きい配合 4 の最大せん断応力は配合 3 よりも小さい結果となっている。

配合 4 はセメント量が少ないため骨材の接触や噛み合いの度合いが大きくなると考える。ベーンせん断試験ではセメントや骨材で形成された凝集構造による抵抗を測定するのに対して，スランプ試験では自重による試料の単調流動を測定するため，骨材の噛み合いという現象が各々の試験で異なる傾向を示したものと推察する。

4.2 コンクリートのこわばりが施工性能に与える影響（Step2）

(1) 使用材料および試験配合

本実験では，Step1 実験の結果からコンクリートのこわばりによる影響が比較的大きいと判断された砂岩砕石を使用した配合(**表－５**の配合 2)を採用し，こわばり低減剤を用いた効果を施工性能の観点で実験的に検証した。使用材料は，Step1 実験と同様とした(**表－４**参照)。

(2) 試験項目

表－６に Step2 実験で実施した施工性能試験を示す。

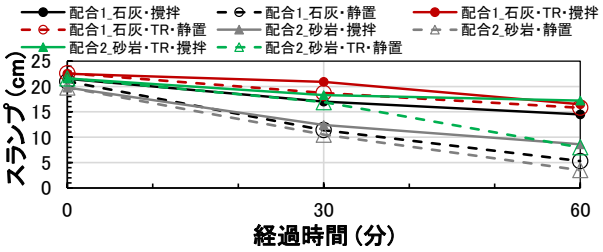
表－４　使用材料

材料	記号	概要・品質・主成分
水	W	上水道水(浦安市)
ｾﾒﾝﾄ	C	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ(密度:3.16g/cm³)
細骨材	S	山砂(千葉県富津市　表乾密度:2.61g/cm³, F.M.:2.67)
粗骨材	G1	石灰砕石(高知県吾川郡 表乾密度:2.70g/cm³, 実積率:61.0%)
	G2	砂岩砕石(茨城県桜川市 表乾密度:2.65g/cm³, 実積率:60.4%)
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤(標準形 I 種)
	TR	こわばり低減剤(グリコールエーテル系誘導体, オキシカルボン酸塩)

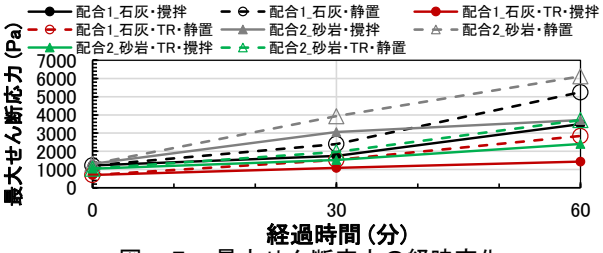
表－５　試験配合※

No.	W/C (%)	s/a (%)	目標ｽﾗﾝﾌﾟ (cm)	単位量(kg/m³)					
				W	C	S	G1	G2	SP
1	49.2	47.8	21	175	356	833	940	－	2.23
2	49.2	48.4	21	175	356	843	－	912	2.58
3	43.1	47.2	21	175	406	804	－	912	2.94
4	57.2	49.6	21	175	306	885	－	912	2.21

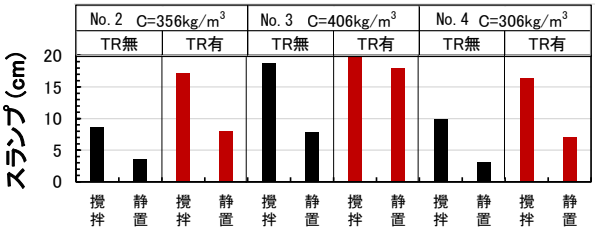
※全配合についてこわばり低減剤(250g/m³)を使用したケースを実施する。



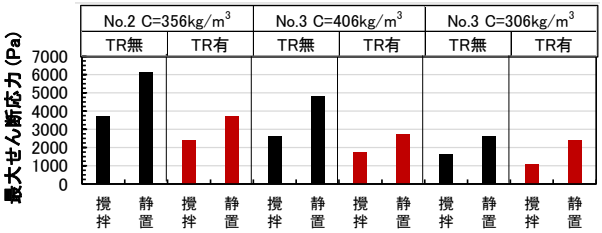
図－４　スランプの経時変化



図－５　最大せん断応力の経時変化



図－６　60 分静置後のスランプ



図－７　60 分静置後の最大せん断応力

Step1 実験と同様にスランプ，スランプフローおよびベーンせん断試験を測定した上で，**表－６**に示す試験を実施した。いずれの試験も，試験直前に試料を攪拌する場合と，練上り直後から容器内に静置しておく場合の両条件について，練上り直後と練上りから 30 分経過後に実施した。これにより，スランプ試験およびベーンせん断試験により評価されたこわばりが，各種施工性能試験の結果に及ぼす影響を確認した。

(3) 試験結果および考察

a) スランプ試験およびベーンせん断試験

図－8 にスランプおよびベーンせん断試験の結果を示す。こわばり低減剤を添加した場合は，攪拌，静置の両条件共にスランプロスが低下し，中でもベーンせん断試験の最大せん断応力は，凡そ半減した。これにより，こわばり低減剤を添加することで，静置したコンクリートのこわばりが大幅に低減する傾向を確認した。

b) U 型充填装置による充填試験

NEXCO 試験法として中流動覆工コンクリートの施工性能確認試験として提案されているU型充填装置による充填試験を実施した。鉄筋障害の無い R3 を使用した。

試験結果を**図－9** に示す。こわばり低減剤を使用しない場合，練上り直後および攪拌条件の経時 30 分では 250mm 以上の充填高さを示したが，30 分間静置した場合は仕切りゲートを開いてもコンクリートが流動しなかった。これにより試料が著しくこわばると，U 型充填装置では充填性を評価できないことが分かった。

上述の傾向に対して，こわばり低減剤を使用した場合は，静置条件の 30 分後でも 250mm 以上の充填高さを示した。こわばり低減剤を使用することによって流動性の保持性能と材料分離抵抗性が改善し，試料がある程度均質に流動することが可能になったものと推察する。

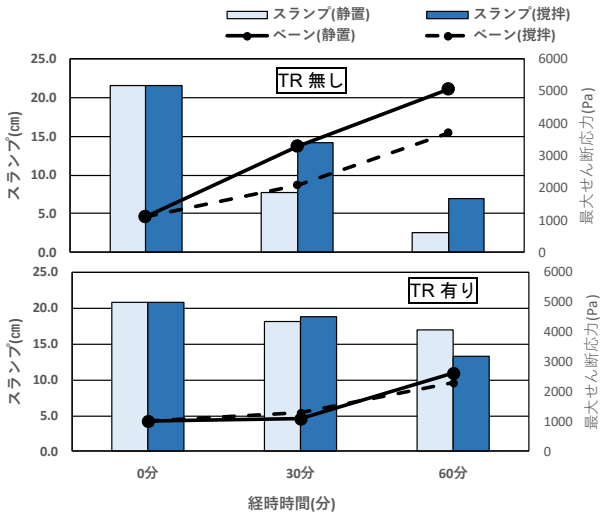
c) 加振変形試験

中流動覆工コンクリートの施工性能確認試験として提案されている加振変形試験を実施した。加振変形試験は鉄板の下に設置されている棒状バイブレータでスランプ試験後の試料に振動を付与し，コンクリートの流動性および分離抵抗性を確認する試験である。本試験ではこの試験装置によりスランプ試験後の試料に 40 秒間加振し，スランプフローの広がりを確認した。

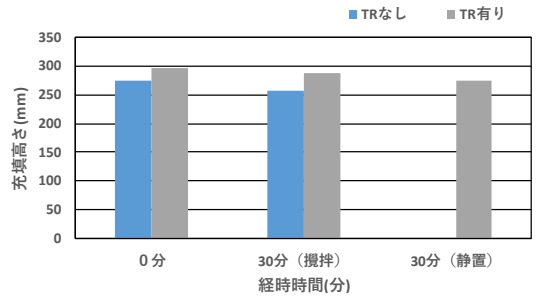
試験結果を**図－10** に示す。こわばり低減剤を使用しない場合，攪拌条件の経時 30 分の試料の方が静置条件の試料に比べて，加振によるスランプフローの増加量が大きくなった。これは，静置によってコンクリートがこわばることで加振による変形性が低下することを示唆している。一方，こわばり低減剤を使用した場合は，攪拌条件と静置条件の加振後のスランプフローの広がりが殆ど変わらない結果となった。この結果は，こわばり低減剤を使用することで静置時のコンクリートのこわばりが低減し，加振による変形性が向上したことを類推させるものと言える。静的条件下で生じるコンクリートのこわばりは，動的条件下でのコンクリートの変形性に影響を及ぼすことが確認された。

表－６　施工性能試験一覧

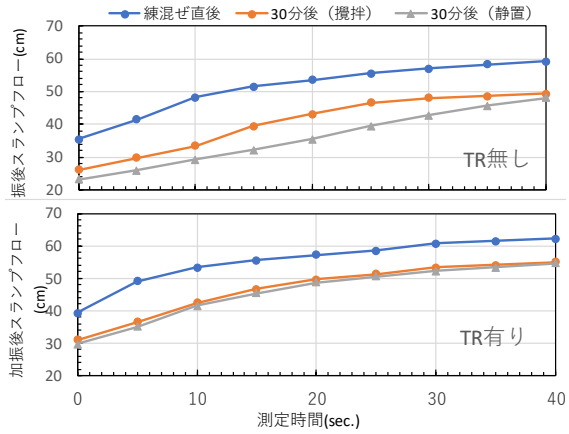
試験項目	規格
U 型充填装置による充填試験	NEXCO 試験法 733-2
加振変形試験	NEXCO 試験法 733-2
変形性評価試験	JSCE-F509-2018



図－８　スランプとベーンせん断試験の最大せん断応力



図－９　U 型充填装置による充填試験（充填高さ）



図－10　加振変形試験結果

d)　変形性評価試験

変形性評価試験は圧送時におけるコンクリートの変形性を評価する試験である。コンクリートのこわばりは圧送時の変形性に影響する可能性があると考え，この試験を実施した。試験は**写真－３**に示すテーパ管を有する小型圧送試験装置を用いて，仰角 18°，ピストン速度 10cm/s で圧送し，圧送状態の目視確認，平均ポンプ油圧の測定，およびテーパ管部に加速度センサーを４箇所取り付けて加速度の測定を実施した。

図－12 に 30 分静置後に再圧送した際の CH1 における加速度波形を示す。こわばり低減剤を用いた場合は振幅が小さく波形が安定していることが見て取れる。また，**図－13** に 30 分静置後に再圧送した際の各 CH での加速度ピーク値を示す。各 CH において，こわばり低減剤を用いた場合は，加速度のピーク値が低減し，最も加速度が大きい CH1 についてはこわばり低減剤を用いた場合は，こわばり低減剤を使用しない場合の約 0.5 倍と半減している。このことから，こわばり低減剤によるコンクリートのこわばり低減効果は，圧送における変形性向上に効果的であることが示唆された。

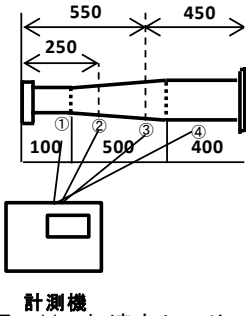
なお，平均ポンプ油圧の測定も行ったが，4 ケースとも約 0.5MPa と小さい値となり，殆ど差は見られなかった。この結果は，変形性評価試験の試験条件に対してコンクリートの流動性が高すぎたため，圧送抵抗の絶対量が小さかったことが原因であると推察される。

5. まとめ

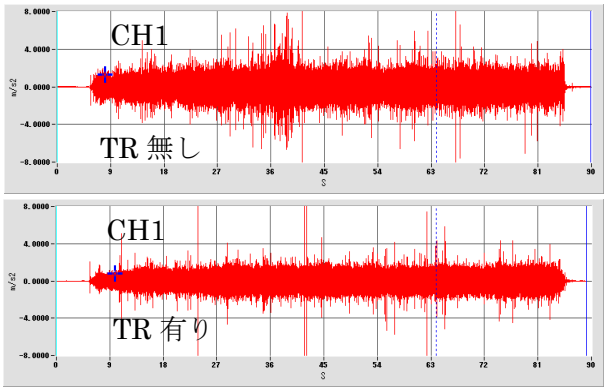
本論文ではコンクリートのこわばりが施工性能に及ぼす影響を検証することを目的として，こわばりが見かけの降伏値と近似するものと仮定し，モルタルやコンクリートを対象に各種試験を実施した。その結果，以下の知見が得られた。

1) 静置したモルタルの見かけの降伏値を十字羽根の回転粘度計で測定したところ，ベーンせん断試験を用いた手動による測定結果と概ね対応する傾向を示した。これは，ミニスランプ試験では，低スランプ領域で降伏値の差が得られないことを補う結果となった。
2) ベーンせん断試験で評価されたコンクリートのこわばりは，石灰砕石よりも砂岩砕石を使用した方が大きくなる傾向を示した。また，こわばり低減剤を用いることで，静置したコンクリートのベーンせん断試験で得られた最大せん断応力は低下する結果となった。
3) 施工性能の評価を目的として U 型充填試験，加振変形試験，変形性評価試験を応用して，静置したコンクリートのこわばりが及ぼす影響を実験的に検証したところ，こわばり低減剤を用いることで施工性能の向上を示唆する結果が得られた。

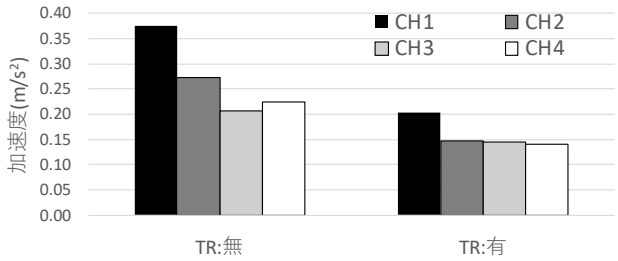
写真－３　変形性評価試験



図－11　加速度センサーの取付け位置



図－12　CH1 における加速度（圧送開始より 10 秒間）



図－13　各 CH での加速度ﾋﾟｰｸ値(圧送開始より 10 秒間)

参考文献

1) 根本浩史，平野修也，伊達重之，橋本紳一郎：コンクリートのこわばりを低減する混和剤，コンクリート工学，Vol.57, No.1,pp.16-19, 2019.1
2) 平野修也，西祐宜：ベーンせん断試験によるフレッシュコンクリートのハンドリングの評価に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.40, No.1,pp.1107-1112, 2018.6
3) 柴田徹：粘土のベーンせん断強度に関する研究，土木学会論文集，No.138, pp.39-48, 1967.2
4) 根本浩史，浦野真次，竹村瑞元：逆打ち工法に適用する高流動コンクリートの配合検討，土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集，第Ⅴ部門，pp.1141-1142, 2013.