

委員会報告 品質試験方法と実施工時諸特性との相関性評価研究委員会

綾野 克紀^{*1}・丸屋 剛^{*2}・小島 正朗^{*3}・宇治 公隆^{*4}・今本 啓一^{*5}・浦野 真次^{*6}・半井 健一郎^{*7}・神代 泰道^{*8}・高橋 幸一^{*9}

要旨: 本委員会では、設計時に設定された性能と同じコンクリートが実際に施工されているかどうか、施工の確実性を確認することを目的に提案されている試験方法の現状と、それらの試験方法が施工時のどの段階のコンクリートの特性をより良く評価しているかを明らかとすることを目的に調査研究を行った。とくに、コンクリートの特性を評価する新しい試験法や、施工時に決められている様々な仕様が実際に担保されているかを確認するための試験方法に関しては、アンケート調査も実施し、そのとりまとめを行った。また、施工実験を行い、構造体のコンクリートの品質に及ぼす施工の影響を検討した。

キーワード: 品質試験法、施工の確実性、充てん性、構造体コンクリート、かぶりコンクリートの品質

1. はじめに

コンクリート構造物中の性能は、必ずしも、設計時に設定された性能を満足するとは限らない。限界状態設計法においては、この違いを材料係数によって考慮することになっている。しかし、実際の施工においては、運搬、打込み、締固め、仕上げ、養生、型枠および支保工の取外し等の段階において、種々の指針類に従った入念な施工を行うことによって、供試体と実構造物中の強度の差を小さくする努力がなされているが現状である。設計技術および施工の現状を考えれば、詳細な材料係数を設定する技術が開発されるとともに、施工の各段階において定められた仕様、例えば、型枠脱型時であれば、構造物中のコンクリートの圧縮強度が 5N/mm^2 に達していることを正確に確認できる評価試験の開発が重要である。本委員会は、設計時に設定された性能と同じコンクリートが実際に施工されるために、施工の各段階において必要とされる適切な品質評価試験方法の現状を調査すること、コンクリートの品質評価のために提案されている種々の試験方法が施工時のどの段階の特性をより良く評価しているかを明らかとすることを目的にしている。

委員会の構成を表-1に示す。同じスランプのコンクリートであっても、分離抵抗性、鉄筋間隙通過性等は異なる。コンクリートの性能評価のための適切な試験方法WG (WG1:宇治主査)では、コンクリートの適切な配合を選定するために提案されている試験方法とその試験結果の施工へ反映事例について調査を行った。施工方法を踏まえた性能評価WG (WG2:小島主査)では、締固め、養生、型枠および支保工の取外し等の段階で要求される各種性能を適切に評価する試験方法について、簡易

な追加試験等の可能性をも含めて調査を行った。海外における試験方法との比較WG (WG3:丸屋主査)では、海外における施工時におけるコンクリートの品質を検査するための試験技術の現状を調査し、日本の規準と海外規準の相違点を明らかにした。

本委員会では、施工時に決められている様々な仕様が、実際に担保されているかを確認するための試験方法に関して、各社において独自に開発されたもの、経験的に実施しているものについてアンケート調査も併せて実施した。また、コンクリートの品質評価試験結果に基づき適切な施工が行われた場合と、そうでない場合とを想定した施工実験を行った。柱部材および壁部材を対象に実験を行い、構造体のコンクリートの品質に及ぼす施工の影響を検討した。

表-1 委員会構成

委員長: 綾野 克紀 (岡山大学)	
幹事: 丸屋 剛 (大成建設) 小島 正朗 (竹中工務店)	
【WG1: コンクリートの性能評価のための適切な試験方法WG】	
◎宇治 公隆 (首都大学東京)	○今本 啓一 (東京理科大学)
岩田 道敏 (JR東日本)	亀本 武弘 (NEXCO総研)
加藤 佳孝 (東京大学)	依田 和久 (鹿島建設)
山口 明伸 (鹿児島大学)	梁 俊 (大成建設)
【WG2: 施工方法を踏まえた性能変化WG】	
◎小島 正朗 (竹中工務店)	○浦野 真次 (清水建設)
綾野 克紀 (岡山大学)	宇野 洋志城 (佐藤工業)
神代 泰道 (大林組)	高橋 幸一 (八洋コンサルタント)
谷村 充 (太平洋セメント)	
【WG3: 海外における試験方法との比較WG】	
◎丸屋 剛 (大成建設)	○半井 健一郎 (群馬大学)
大島 正記 (BASFポゾリス)	黒岩 秀介 (大成建設)
桜井 邦昭 (大林組)	杉山 央 (建築研究所)
渡辺 博志 (土木研究所)	
	◎WG主査 ○WG副主査

*1 岡山大学大学院 工博 (正会員)

*3 (株) 竹中工務店 技術研究所 工修 (正会員)

*5 東京理科大学 工博 (正会員)

*7 群馬大学大学院 工博 (正会員)

*9 (株) 八洋コンサルタント 技術部 (正会員)

*2 大成建設 (株) 技術センター 工博 (正会員)

*4 首都大学東京 工博 (正会員)

*6 清水建設 (株) 技術研究所 工博 (正会員)

*8 (株) 大林組 技術研究所 工博 (正会員)

2. 各種規準・指針類における規定とその背景

本章では土木および建築分野におけるコンクリートの品質・施工に関する規定とその背景・根拠について述べている。表-2 に施工にかかわる各種の規定を土木、建築別に示す。以下に、一例として建築分野の JASS 5 におけるコンクリートのワーカビリティと打込み、養生に関する規定について紹介する。

コンクリートの配(調)合条件としては、ワーカビリティと均一性をはじめとした最低限の性能を確保するため、W/Cの最大値、単位セメント量の最小値が規定されている。W/Cは普通ポルトランドセメントで65%以下、単位セメント量は270kg/m³以上である。また、練混ぜから打込み終了までの時間限度の規定は、スランブと空気量の時間変化が大きくなるように定められた。

打重ね時間はコールドジョイントができない範囲として、先行コンクリートが再振動可能である時間とし、貫入抵抗値の大きさから定められた。また、締固めについては各層ごとに垂直に振動機を先端が下層に入るように挿入し、挿入間隔は60cm以下としてコンクリートの上面にペーストが浮くまで加振する。挿入間隔は公称径45mmの棒形振動機の有効範囲から定められた。

養生に関しては、せき板存置期間、湿潤養生および養生温度が規定されている。湿潤養生は、せき板による被覆の他に散水・噴霧および膜養生剤の塗布があり、その期間が規定されている。この期間前であっても10N/mm²以上の強度が確認できれば打ち切ることができる。これは初期の湿潤養生期間が短いほど強度発現を阻害し、中性化が早まるためであり、10N/mm²確保していれば、その後の強度発現および中性化深さは7日存置の場合と大差ないとしている。せき板の存置期間は湿潤養生期間に含まれるが、セメント種類と平均温度別に存置期間が規定されている。この期間前であっても5N/mm²以上の強度を確認できれば打ち切ることができる。これは初期凍害や容易に損傷を受けないための最低の強度である。せき板取り外し後は、散水や噴霧により所定の湿潤養生期間まで養生を実施する。支保工の場合は有害な曲げひび割れ・たわみの防止するため、設計基準強度以上であることを確認する。養生温度は、建築基準法施行令第75条(コンクリートの養生)の「打ち込み中、打ち込み後5日間は2度を下らないようにし、かつ乾燥、振動によってコンクリートの凝結および硬化が妨げられないように養生しなければならない」によって規定され、普通ポルトランドセメントであれば、5日間で2℃以上であれば5N/mm²を確保できることが示されている。

3. 施工時におけるコンクリートの品質評価試験方法

3.1 配(調)合選定に用いる品質評価方法

コンクリートは、流動性・変形性の観点から、普通コンクリート、高流動コンクリートおよび(超)硬練りコンクリートに大別され、それぞれの特性を評価するための試験方法が提案されている。表-3には、一例として本委員会が実施したアンケートをも含めて整理した、普通コンクリートの充てん性(流動性、材料分離抵抗性)評価試験方法を示す。それぞれ、振動あるいは衝撃力を与えることで充てん性を評価するものである。詳細は委員会報告を参照されたい。

また、セメントグラウト・モルタルが間隙充てん材等として多方面で使用されており、その充てん性を評価する試験方法が提案・実用化されている。例えば、PCグラ

表-2 施工にかかわる各種の規定

項目		規定
コン クリ ート 標 準 示 方 書	ワーカビリティ	断面寸法と配筋状況によってスランブの標準値を規定
	打込み	落下高さ：1.5m 1層高さ：40～50cm 打重ね時間間隔：外気温 25℃以下 2.5時間、25℃超える 2時間
	締固め	振動機挿入間隔：50cm 挿入深さ：下層に10cm 振動時間：5～15秒
	型枠の存置期間	部材種類により圧縮強度 3.5, 5, 14N/mm ² を確保するまで
	湿潤養生	セメント種類別に所定期間を規定
J A S S 5	水セメント比	水セメント比の最大値
	セメント量	セメント量の最小値
	練混ぜから打込み終了までの時間の限度	外気温 25℃未満 2時間以内 25℃以上 1.5時間以内
	締固め	振動機の挿入間隔は60cm以下とし、コンクリートの上面にペーストが浮くまで加振する
	打重ね	打重ね時間限度は、輸送時間が1時間を想定し、外気温 25℃未満で2.5時間、25℃以上で2時間を目安とする
	せき板の存置期間	せき板：所定期間または5N/mm ² 以上 支保工：設計基準強度以上
	湿潤養生	所定期間または10N/mm ² 以上
養生温度	打ち込み後5日以上コンクリート温度を2℃以上に保つ	

表-3 流動性・材料分離抵抗性試験(普通コンクリート)

分類	試験方法
振動による方法	U形充てん装置+棒状バイブレータ
	ボックス型間隙通過性+棒状バイブレータ
	L形フロー+棒状バイブレータ
	加振式L形フロー
	ボックス型装置+棒状バイブレータ
衝撃による方法	振動フロー
	スランブ板に設置した流動障害棒の通過など
	スプレッド(DINフロー)
	タンピング、など

ウトについては、土木学会規準の J ロート等の他、NEXCO では実構造物の施工条件を想定した独自の試験方法を定め適用している。

3.2 受入れ時のフレッシュコンクリートの検査

受入検査の試験として採用されるためには、短時間で測定ができ、所要の精度を有していることが条件となる。充てん性を評価する方法としては 3.1 で紹介したものなど多数あるが、普通コンクリートの場合、日常管理・検査の観点から、現在の標準試験であるスランプ試験以外の方法としては、スプレッド(DIN フロー)試験やタンピング試験程度の簡易な試験が現実的と考えられ、それらの評価・判定基準の確立が望まれる。

単位水量試験も耐久性確保のために重要な試験項目であり、これまで多くの試験方法が提案され、実用化されているが、簡便性の面からエアメータ法が比較的多く用いられるようになってきているようである。

3.3 締固めの確認

普通コンクリートの場合、施工欠陥の無いコンクリート構造物を構築するため、コンクリートのコンシステンシーに見合った時間・間隔で締固めを行わなければならない。そのための一手法として、締固めエネルギーに着目した締固め性評価試験が提案されている¹⁾。これは、打込みを予定している配(調)合のコンクリートを用い、**図-1**に示す装置および評価方法であらかじめ締固めに必要なエネルギーを求め、締固め時間・間隔を打込み計画の時点で検討するためのものである。

実施工時に所定の締固めが行われたかどうかを判断することに利用できる、与えられたエネルギーを検出できるパイブレッタも開発されている。また、打込みを行う内部の鉄筋の適当な箇所に、コンクリートが充てんされたことを感知して知らせるセンサーを設置する試み²⁾や、型枠外部から充てん状況を検知する測定器の適用検討³⁾も行われている。

3.4 脱型・養生打切り判定のための強度確認

強度確認は、**表-4**に示すごとく、非破壊による方法、微破壊による方法及び間接供試体による方法に分類される。ここでは、それらのうち、最近、新たに研究・開発されているものについて簡単に説明する。

非破壊による方法に位置づけられるひっかけ試験⁴⁾は、コンクリートの表面を、簡易な試験器を用いて一定の力でひっかけ、その傷の幅からコンクリート強度を評価するものである。これまでの検討から、使用セメント、水セメント比および材齢の影響は比較的小さいとの研究結果が示されている。

微破壊による方法である貫入試験は、シールド分野の ECL 工法から始まり、現在は山岳トンネル分野の二次覆工コンクリートにおける型枠支保工取外し時期の判定

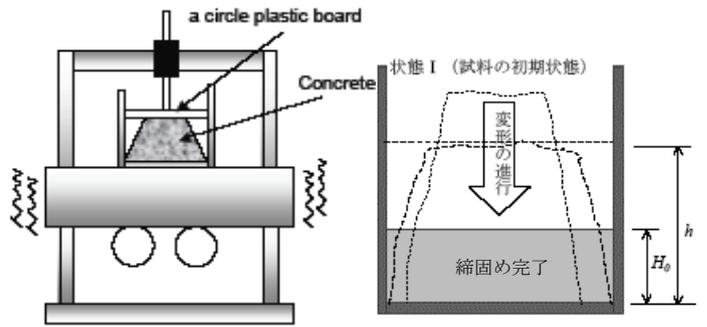


図-1 振動締固め試験装置¹⁾

表-4 強度確認試験方法

分類	試験方法
非破壊	超音波伝播速度試験、反発度試験、ひっかけ試験、など
微破壊	ソフトコアリング、ドリル削孔法、貫入試験、ウィンザーピン貫入抵抗試験、など
間接供試体	封緘供試体を用いた方法、ボス供試体を用いた方法、など

表-5 硬化後の諸物性確認試験

分類	試験方法等
供試体の養生	構造物の規模や施工環境を考慮し、所定の材齢まで標準養生、現場封緘養生、現場水中養生、など
かぶりコンクリートの品質	透気試験(削孔法、シングルチャンバー法、ダブルチャンバー法)、吸水・透水試験(表面法・自然吸水、削孔法・自然吸水、加圧透水法)、など
かぶり(厚さ)	電磁誘導法、電磁波レダール法、など

への適用が試みられている。これは貫入試験装置を 300N で押し当ててできるくぼみの径を測定し、圧縮強度を推定するものである。また、ウィンザーピン貫入抵抗値と圧縮強度との関係から強度推定する方法もある。本方法は元来、長期材齢を経過した低強度コンクリートを想定したものであるが、若材齢時の型枠取外し時期の判定にも適用可能であるとの報告もみられる。

間接供試体による方法であるボス供試体を用いた方法では、構造体コンクリートと同時に成型してできた直方体のボス供試体を割って採取し、品質試験を行う。この方法の特徴は、構造体コンクリートの内部を損傷させることなく、強度を直接検査できることであり、供試体採取後の補修などの問題もさほどない。

3.5 硬化後の諸物性の確認

強度以外のかぶりコンクリートの品質、かぶり(厚さ)の確認に適用し得る試験方法を**表-5**に示す。

かぶりコンクリートの品質の確認に用いる透気試験としては、小径で削孔しプラスチック製プラグで栓をして気圧を下げたときの圧力変化に要する時間を求める削孔法、チャンバー内を減圧し気圧変化に要する時間を計測するシングルチャンバー法およびダブルチャンバ

一法がある。

吸水・透水試験としては、表面法・自然吸水、削孔法・自然吸水、加圧透水法などがある。表面法・自然吸水は、コンクリート表面上のアクリルキャップを取付けて水頭圧を与えて吸水特性を把握する。削孔法・自然吸水は、透気試験などの削孔を利用し所定量の吸水に要する時間で評価する。また、加圧透水法は、削孔した孔を用い、加圧された水をチャンバー内に導入して透水係数を算定し評価する。

4. 実験

4.1 実験概要

文献やアンケート調査を踏まえ、フレッシュコンクリートの特性、打込み後の施工条件による硬化コンクリートの品質変化を評価するのに有効と考えられる各種の試験方法を選定し、以下の2シリーズの実験で適用性を確認した。

シリーズIでは、材料・配(調)合の選定時にフレッシュコンクリートの特性を評価するのに有効と考えられる試験方法を抽出し、2種類のスランブに対しそれぞれ標準的なもの、粘性の高いもの、粗々しいというフレッシュ特性を持つコンクリートに適用し、有効性を評価した。

シリーズIIでは、上記のフレッシュ特性の異なるコンクリートを柱および壁部材に打込み、締固め・脱型・養生の一連の施工条件を変化させたときのコンクリート品質変化を、各種の試験方法によって検出することができるかどうか検討した。また、シリーズIで簡便かつ評価の有効性が認められた試験方法を受入れ検査に適用し、フレッシュコンクリートの特性評価もあわせて行った。

各実験シリーズと実験の因子と水準を表-6に示す。標準的、高粘性、および粗々しいというフレッシュ特性の調整は、細骨材の細砂と粗砂の混合比率および細骨材率を変化させることにより行った。

4.2 材料・配(調)合選定時に用いるフレッシュコンクリート試験方法の評価(シリーズI)

シリーズIは公称容量200リットルの強制2軸式ミキサを用いた室内試験で行った。評価した試験方法を表-7に、配(調)合を表-8に示す。

図-2は、締固めによりコンクリートに加えられた締固めエネルギーと締固め度の関係を示している。締固め完了(締固め度99.5%)となるまでのエネルギーを求めた結果、いずれの目標スランブにおいても標準的なコンクリートが最も締固め完了エネルギーが小さく、次いで高粘性、粗々しいものが最も大きくなった。同じスランブのコンクリートであっても、材料・配(調)合によ

表-6 実験の因子と水準

シリーズ	因子	水準
I, II	スランブ	8cm, 18cm
I, II	コンクリートの性状	標準, 高粘性, 粗々しい
II	部材種類および配筋	柱: 主筋D25@100, @150 壁: 縦横D13@150
II	締固め時間	5秒, 10秒, 15秒
II	脱型材齢	1日, 3日
II	湿潤養生継続材齢	脱型時材齢, 7日

表-7 実施した各種試験

試験の区分	試験方法	シリーズ	
フレッシュ性状・充てん性	基本試験	I, II	
	スランブ試験		
	空気量試験		
	流動性・分離抵抗性の評価試験	スランブフロー試験	I
		U形充てん装置+棒状バイブレータ	
		L形フロー装置+棒状バイブレータ	
		スランブ板上流動障害通過性試験	
		*回転粘度計	I, II
		加振式L形フロー試験	
		スプレッド(DINフロー)試験	
		間隙通過性(ボックス型)・分離試験	
	充てん性・締固めの確認試験	振動フロー試験	II
		タンピングフロー試験	
*締固めエネルギー試験			
充てん検知器			
施工による性能変化	*部材中コンクリートの振動加速度	II	
	*部材型枠面の非充てん面積率		
	*コアの密度・骨材面積率・空隙率		
	脱型・養生終了時の強度確認	引っかき試験	II
		供試体圧縮強度	
	構造体(かぶり)コンクリートの品質	各種コア試験	
		反発度	
		*細孔径分布	
		透気性試験(トロット法, シングルチャンバー法, ドリル削孔法, RILEM法)	
		*中性化促進試験	
		電磁誘導法	
	かぶり厚さ	電磁波レーダー法	
		*ハツリ出し試験	

*印は各種試験の適用性を評価する目的で実施した試験

表-8 試験に用いた配(調)合

配合No	コンクリート種類	目標スランブ(cm)	目標空気量(%)	水セメント比(%)	細骨材率(%)	単位水量(kg/m ³)
1	標準	8	4.5	57.5	46.0	285
2	高粘性				46.0	
3	粗々しい				42.5	
4	標準	18	4.5	57.5	46.0	313
5	高粘性				46.0	
6	粗々しい				42.5	

って密実な締固めに必要なエネルギーが大きく異なることがわかる。

このようなコンクリートの性状の違いを、各種試験方法によってどのように評価できるか検証するとともに、各試験方法の評価の簡便性、所要時間を調査した。代表

的な各種試験の実施状況を図-3に示す。また、実験を通して各種試験方法に対して得られた評価結果を表-9にまとめる。材料・配(調)合の違いによるフレッシュコンクリートの特性の違いを、粘性に着目して評価するもの、鉄筋間隙通過性や骨材の分離のしやすさを評価するものなど、様々であった。各試験方法の適用性の詳細については、委員会報告を参照されたい。

4.3 特性の異なるコンクリートを用いた施工試験 (シリーズII)

シリーズIIの施工実験では、市中の生コンプラントで

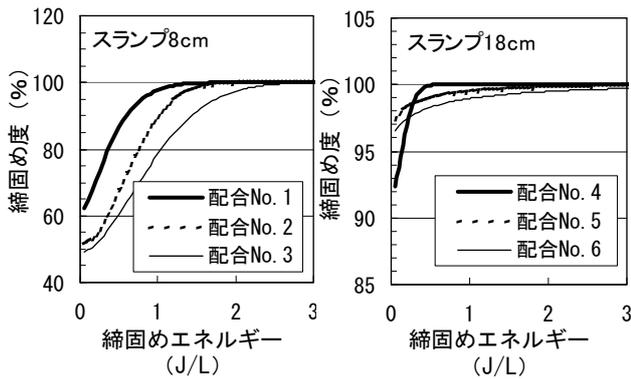


図-2 締固めエネルギー試験結果

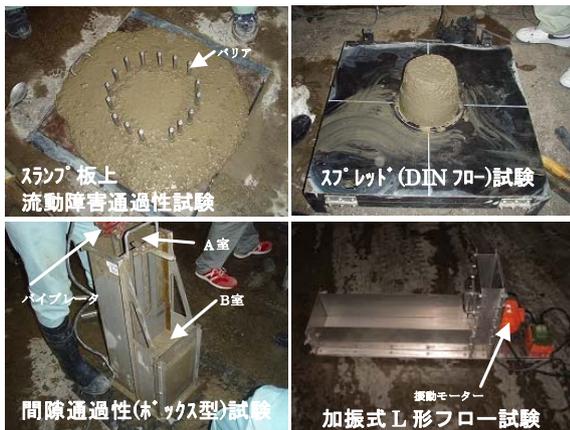


図-3 各種試験の実施状況

表-9 フレッシュコンクリート試験方法の評価

試験	評価対象	測定指標	評価できる配合No.	所要時間(分)
スプレッド(DIN)フロー タンピング	粘性・ワーカビリティ	衝撃による広がり の程度	1, 2, 3, 6	0
			1, 2, 3	
L形フロー +棒状パイプ	ディー	振動を加え一定の距離まで流動する時間	—	10
加振式L形フロー	鉄筋通過性・分離抵抗性	流動する時間や変形速度	1, 2, 3	7
振動フロー			4, 5, 6	7
U形充てん装置 +棒状パイプ	鉄筋通過性・分離抵抗性	鉄筋障害を通過して一定の高さになる時間、一定加振時の広がり、通過速度	—	10
流動障害通過性試験施工性簡易評価		上記プラス粗骨材量の変化	1, 2, 3, 4, 5, 6	25
間隙通過性(ボックス型)				30

シリーズIと同じ材料・配(調)合のコンクリートを製造し実験を行った。柱試験体は図-4に示す形状とし、スランプ8cmで標準、高粘性、粗々しい(順に柱A~C)の3種類を、壁試験体は図-5に示す形状とし、スランプ18cm標準、高粘性、粗々しい(順に壁D~F)3種類のコンクリート打ち込んだ。シリーズIの結果を踏まえて選定したフレッシュコンクリートの特性評価試験を実施した後、コンクリートバケット用いて3層でコンクリートを打ち込んだ。締固めは、各層ごとに高周波棒状パイプ(φ45mm)を挿入し、1層目は5秒間、2層目は10秒間、3層目は15秒間行った。実施した試験は表-7のとおりである。締固め時には、振動加速度の計測、鉄筋に設置した充てん検出センサーによる充てんおよび締め固めの確認を行い、締固め後は型枠面から非破壊で充てんの検知を行った。以下に、実験結果の一部を紹介する。詳細は委員会報告を参照されたい。

(1) 受入れ時のフレッシュコンクリートの検査

受入れ時に行った新しい試験による各種コンクリートの評価結果の一例を図-6に示す。同一スランプ・同一強度を発現するコンクリートでも、コンクリートの材料・配(調)合が異なることで、コンクリートの特性が

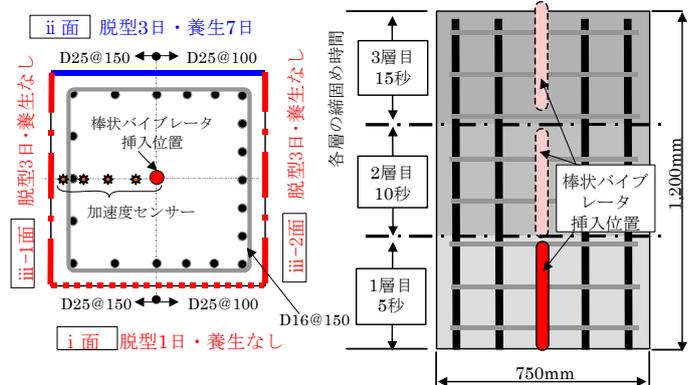


図-4 柱試験体の概要

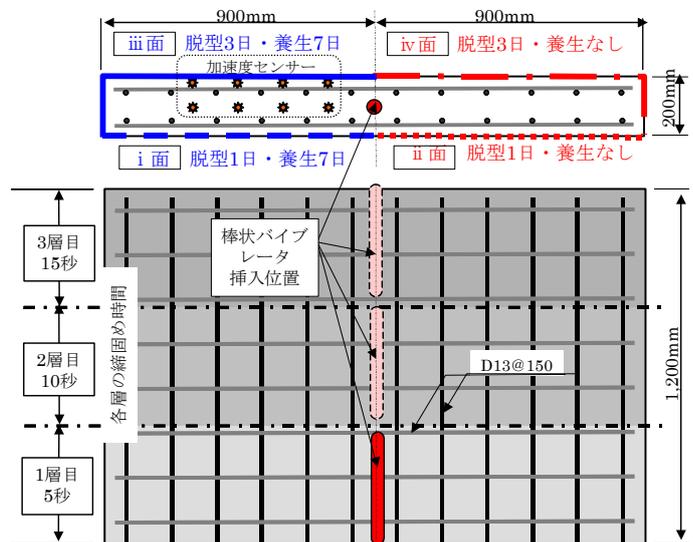


図-5 壁試験体の概要

異なることが検出できている。受入れ検査時に得られたフレッシュコンクリートの特性の評価結果と、施工条件（締固め時間や締固め間隔）に対する、施工結果すなわち未充てん面積率、コンクリート品質の差異を把握した。

(2) 締固め・充てんの確認

作製した試験体の外観写真の代表例を写真-1に、締固め時間の異なる各層別に示した未充てん率を図-7に示す。未充てん率は、コンクリートが充てんされていない投影面積とジャンカ面積の合計で、実物と写真を照合してマーキングし2値化することで求めた。スランブ8cmとした柱試験体では、締固め時間の最も少ない1層目のほうが未充てん率が大きくなった。スランブ18cmの壁試験体では、必ずしもそうはなっていない。これはスランブが大きいコンクリートは、小さい振動エネルギーでも充てんされてゆくため、上の層を締固めた際の振動が型枠を伝播して、下層に影響を及ぼしたことが可能性として考えられる。

各コンクリートで同じ締固め条件としたが、いずれの部材（スランブ）においても粗々しい>高粘性>標準の順で未充てん面積率は大きくなった。フレッシュ特性と充てん率の関係を検討した一例として図-8に、加振式Lフロー試験における500mm到達時間と試験体面の未充てん面積率の関係を示す。今回の試験体サイズと締固め条件において、スランブ8cmの柱では、500mm到達時間が10秒程度の特性を持つコンクリートであれば締固め時間5秒で型枠面が充てんされ、500mm到達時間が20秒程度であれば締固め時間10秒で充てんされるという結果が得られた。また、壁では、500mm到達時間が8秒程度あれば、型枠面が充てんされるという結果が得られた。

締固め直後に型枠面から充てん状況を検知した結果の一例を図-9に示す。ポイントを限定して検知を行い、硬化後に試験体の外観を観察して比較したところ、90%を超える適合率となり、コンクリートの充てん状況をほぼ判定できた。

(3) 強度発現の確認

脱型時強度の判定は、一般に現場水中または現場封かん養生で5N/mm²を超えたことが確認できた時期としている。本施工実験では、現場封かん養生の他に、日本建築工学会「引っかけ試験器」を用いて脱型・養生打切りのための強度確認を行った。現場封かん供試体の強



写真-1 試験体側面

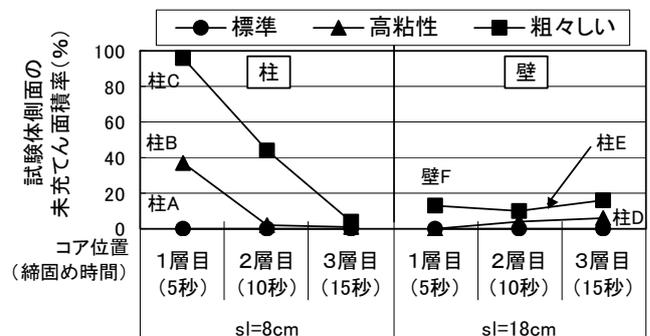


図-7 打設層ごとの未充てん面積率

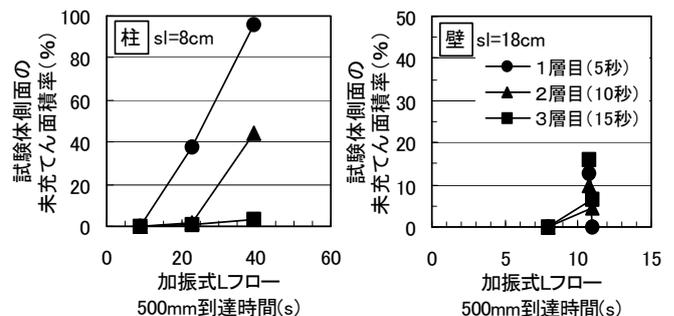


図-8 フレッシュ特性評価結果と未充てん面積率の関係

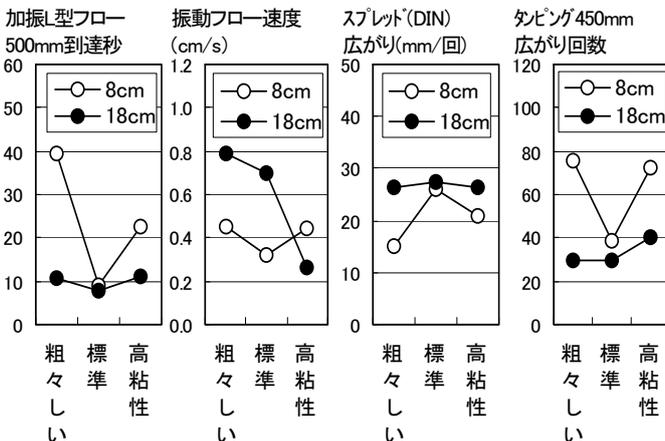


図-6 受入れ検査時のコンクリートの評価試験結果

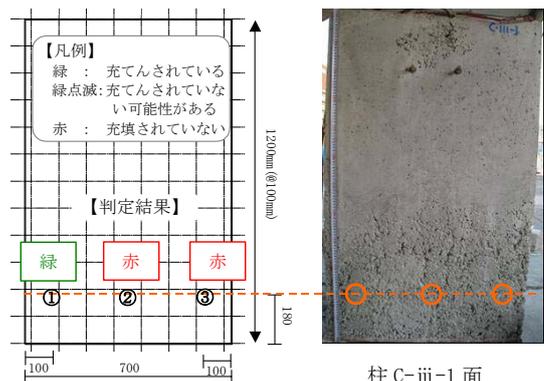


図-9 充てん検知測定例

度試験前に側面に引っかき傷を付け、傷幅と圧縮強度の関係を確認したところ両者に高い相関が確認された。この関係を用い、柱および壁試験体の表層に引っかき試験を適用し、**図-10**に示す表層強度を推定した。材齢3日の時点で試験体の上部(3層目)中央付近から採取したコアの圧縮強度と比較すると、引っかき傷から推定した強度、すなわち表層強度のほうが低い結果となった。これはφ25mmのコアによる深さ方向の圧縮強度分布の試験結果とも同様の傾向であった。引っかき傷幅から圧縮強度を推定する方法は、脱型時期の判定で評価すべき表層のコンクリート強度を判定できること、養生終了の判定に対しては安全側の評価が可能であることから、これらの用途に有効に活用できると考えられる。

試験体中央部より採取したコア供試体の圧縮強度を、封緘養生供試体に対する比で**図-11**に示す。柱部材、壁部材ともに上層のほうが中層、下層に比べて圧縮強度比が小さくなっている。今回の実験では、締固め時間の影響よりも、コンクリートの自重による圧密の影響のほうが、圧縮強度に及ぼす影響が大きく、締固め時間と圧縮強度の関係は明確ではなかった。

脱型時期ならびに養生によって表層のコンクリートの強度の違いを、表層からφ45mm×90mmのコアを採取して評価した(**図-12**)。養生7日(脱型材齢3日)に対する比でみると柱・壁ともに、養生なしの面(柱i面、壁ii面)に比して養生ありの面(柱ii面、壁iii面)の強度が大きくなり、養生の有無によるコンクリート表層組織の違いを示す結果となった。初期の養生の重要性があらためて確認された。

(4) かぶりコンクリートの品質

フレッシュコンクリートの性状および施工方法がかぶりコンクリートの品質に及ぼす影響について、表層透気性、強度特性の観点から検討を行った。

引っかき試験による推定圧縮強度は、柱・壁ともに、標準(A・D)>高粘性(B・E)>粗々しい(C・F)の順となり、これは、未充てん面積率の傾向に一致していた。引っかき試験による推定圧縮強度と表層透気性の関係を**図-13**に示す。トレント法・シングルチャンパー法

の場合、多少のばらつきはあるが、概ね、透気性が大きくなるに伴い、推定圧縮強度は小さくなる傾向を示した。

リバウンドハンマー試験による推定圧縮強度と表層透気性の関係を**図-14**に示す。いずれの試験体も2層目(締固め10秒)の試験結果を示した。リバウンドハンマー試験による推定圧縮強度は、養生の有無に関わら

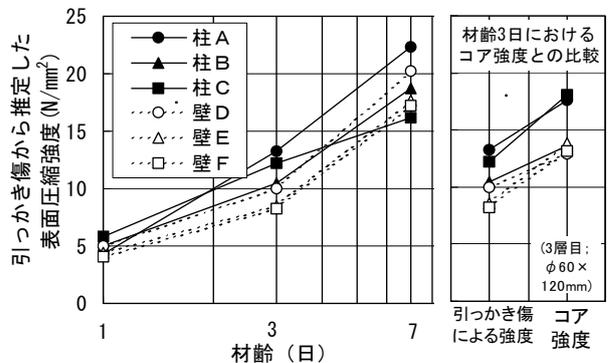


図-10 引っかき傷より推定した圧縮強度

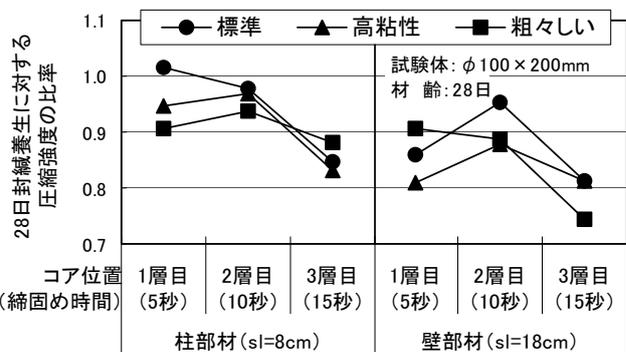


図-11 締固め箇所の影響

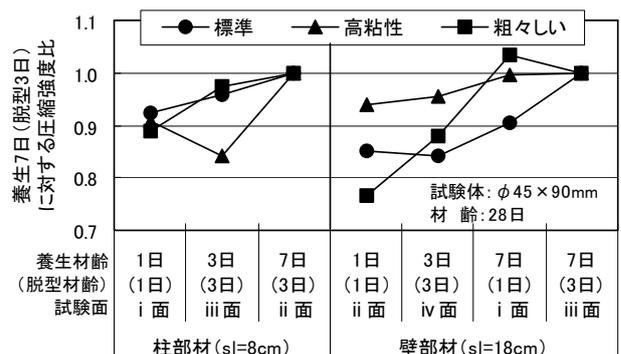


図-12 脱型時期ならびに養生の有無の影響

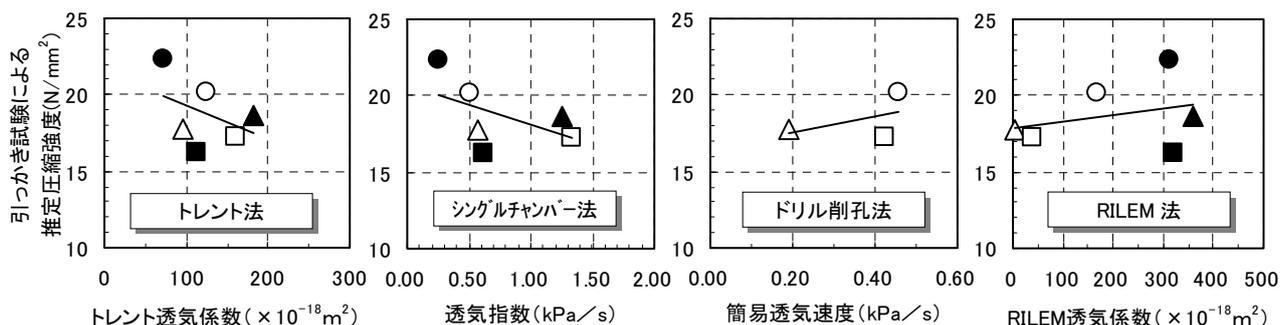


図-13 各種透気試験による透気性と引っかき試験による推定圧縮強度の関係

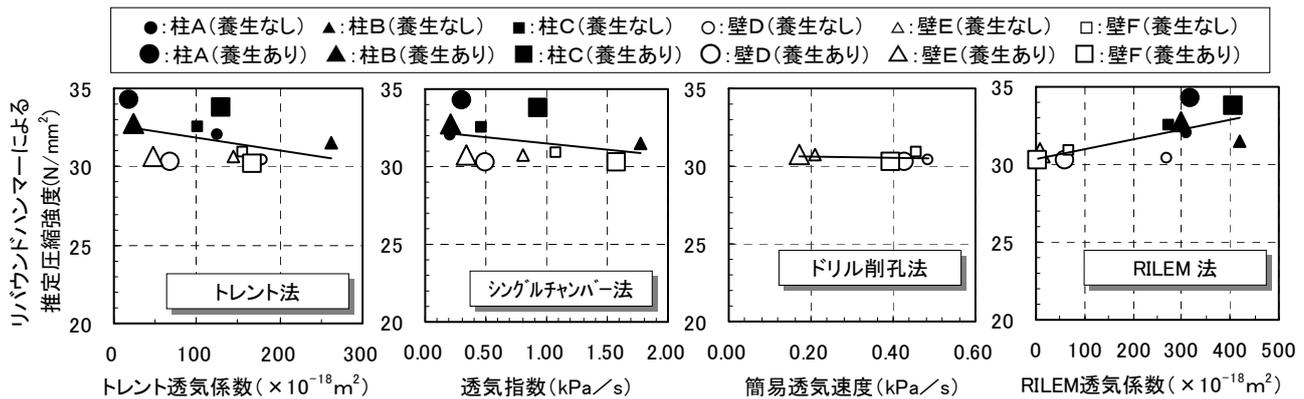


図-1.4 各種透気試験による透気性とリバウンドハンマー試験による推定圧縮強度の関係

ず、柱試験体A～Cに比して壁試験体D～Fが小さくなった。これは、コア(φ100mm)の圧縮強度の傾向と一致するものである。柱試験体のトレント法・シングルチャンパー法による透気係数と推定圧縮強度に相関が認められ、一方、壁試験体やドリル削孔法・RILEM法の場合、特に相関は認められない。

以上、2つのシリーズの実験から、これまで評価できていなかったフレッシュコンクリートの特性や施工方法による品質変化を検出し、施工の確実性の担保に資する品質評価試験方法の可能性が示された。

5. 国内外における試験方法の比較

施工時あるいは硬化後のコンクリートが、設計段階で設定した所定の性能を満たすことを製造段階や受入れ段階で検査するために、様々な試験方法が規定されている。日本国内であれば、多くは日本工業規格(JIS)に規定されている。海外においても、それぞれの自国や所属共同体、あるいは関連国の規格・基準が整備されている。一方で、近年のグローバル化に伴い、国際標準であるISO規格の整備も進められており、JISをはじめとした各国の規格とISOとの間での整合性の調整も進められている。また、ヨーロッパではユーロコードが整備されている。各規格間には相違点が存在する。

ここでは、フレッシュコンクリートの性能を評価するための代表的な6つの試験方法を対象とし、日本のJIS規格と海外の類似規格を比較し、それぞれの相違点を分析することとした。比較対象とした海外の基準は、米国規格ASTM、欧州規格EN、および国際標準ISOとした。多くの途上国においては、今回比較対象としたような先進国の基準を利用していることも多く、主要な先進国の基準を比較することが適当であると考えた。なお、JIS規格ではISOとの比較を表形式で明確にまとめており、本検討はJISの手法に倣ったものである。

(1) 試料採取

コンクリートの試料採取方法について、JIS、ASTM、

EN、ISOを比較した。規格によって数値的には若干の違いはあるものの、コンクリートの試料採取において配慮すべき事項は、試料採取に用いる器具は非吸水性の材料のものを用いること、代表的な試料をサンプリングするために数箇所以上の場所から試料を採取すること、また、サンプリング量は試験に供する量よりも十分に多量とすること、コンクリートの時間経過に伴う品質変化を防止するために採取後は速やかに試験を行うこと、とまとめられる。

(2) スランプ試験

スランプ試験は、コンクリートのコンシステンシー(軟らかさ、流動性)を測定するために、現在、最も用いられている方法である。JIS、ASTM、EN、ISOを比較すると、適用範囲やコンクリートの詰め方、スランプコーンの引き上げ時間、スランプの測定位置の違いがある。

(3) Vebe試験

Vebe試験は、フレッシュコンクリートのコンシステンシーを評価する測定する試験方法で、イギリスの基準であるBSに規定されていた試験方法である。JISには類似規格はない。コンテナ内に設置されたモールドを用いて通常のスランプ試験と同様の手順を行った後、上に錘のついたディスクを設置し、台から振動を与えてコンクリートがコンテナ内に充てんするまでの時間を計測する。ENとISOには、ほぼ同じ内容が記載されている。

(4) 締固め係数試験

締固め係数試験はフレッシュコンクリートのコンシステンシーを評価する試験の1つである。BSあるいはフランスのNFに規格化されていたものであり、JISにはない試験である。所定のコンテナの上面までコンクリートを入れた後、振動台または棒状パイプレータを使って容積の減少が落ち着くまでコンクリートを締め固め、沈下距離から締固め係数が算出される。

(5) スランプフロー試験

高流動コンクリートや高強度コンクリートのコンシステンシー評価には、スランプ試験よりもスランプフロ

一試験が広く用いられている。スランプフローの試験方法は、JIS、ASTM、ISO等で規格化されている。スランプコーンの使い方として、ASTMでは、通常の方法（A法）に加え、コーンを逆さまにした方法（B法）も示されている。

やや高スランプのコンクリートのコンシステンシー評価には、ドイツで開発されたフローテーブル試験（フロー試験、スプレッド試験、DINフローともいう）が欧米諸国では規格化されているが、JISにはない試験方法である。

(6) ブリーディング試験

フレッシュコンクリートのブリーディング量を測定するブリーディング試験は、ASTMとJISで規格化されているが、両者を比較すると試験容器へのコンクリートの詰め方が異なる。ASTMでは突き棒による締固めによって試料を詰めるJISと同じ方法（方法A）に加え、振動締め固めによってコンクリート試料を締め固める方法（方法B）も規定されている。

以上のように、国内外の試験方法の比較を行ったが、同様の試験方法でも細かな内容が異なるものがあり、同じ名称の試験結果であっても結果の意味が異なる可能性が考えられた。また、フレッシュコンクリートのコンシステンシーの評価手法として、JISには規定されていないVebe試験や締固め係数試験があった。これまで、コンクリートの施工のし易さを簡易に評価する方法としてスランプ試験が用いられてきているが、配合によっては必ずしもスランプ試験だけで適切な評価ができるとは限らない。したがって、今後は、海外の試験方法なども考慮して、材料供給などの実情を反映できる試験方法を考案するとともに、その規格値についても検討の必要があると考える。

6. 施工の確実性を確認するための試験方法に関するアンケート調査

実際の施工においては、不具合を出さないためだけでなく、施工の各段階において、種々の指針類に従った入念な施工計画の立案と施工管理を行うことによって、実構造物中のコンクリートの品質を確保する努力がなされている。品質が確保され、現場での「施工の確実性」が担保されること、すなわち、施工の各段階において定められた規格、例えば、型枠脱型時であれば、構造物中のコンクリートの圧縮強度が脱型に必要な所定の強度に達していることを正確に確認できるような試験技術の開発が望まれている。

このような背景から、新しいコンクリートの特性の評価試験法や、施工時に取り決められている様々な仕様が実際に担保されているかを確認するための試験方法に

関して、本委員会ではアンケートを行うこととした。管理項目に対して、各施工会社や発注機関において独自に開発されたもの（学会の指針類になったものも含む）、経験的に実施しているものについて、調査することとした。これにより、施工の各段階において必要とされる適切な品質評価のために、実際に行われている試験の現状について検討した。

アンケートは、37件の回答を得た。このうち、各施工会社や発注機関において独自に開発されたもの（学会の指針類になったものも含む）は28件であった。残りの9件に関しては、独自の試験は実施しておらず、通常コンクリートの荷卸し・受入れ時に実施する試験による、との回答であった。アンケート結果のうち、試験目的により大別した回答数および割合は図-15に示すとおりである。

フレッシュコンクリート関連では、試験練り、配合選定の段階で実施する品質評価に関する試験が多く、振動を付与したときのワーカビリティの相違を把握しようとする新しい試験方法が多い。これは、最近のコンクリートの配合や材料の設定に関する選択の自由度は非常に大きいため、材料分離抵抗性を十分に確保するという条件のもとで、スランプが同一であっても、スランプ

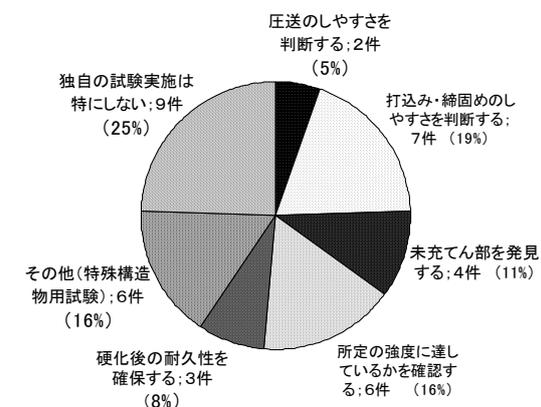


図-15 施工の確実性を確認するための試験方法に関するアンケート調査結果

以外のフレッシュ性状が相違する配合を判定するための試験方法が検討されているためであると考えられる。ただし、いずれに試験方法においても、相違する配合で相対的に比較し、定性的な判断になっているのが現状であり、今後実際の打込み・締固めのしやすさとの関連性について評価することが望まれる。

充てん・未充てんの検知に関する方法としては、センサを用いた方法が報告されており、同一の機器を適用して締固め度合い、打重ねのタイミングの検知、初期強度発現および内部欠陥検知などへ応用されており、今後の発展が望まれる。

所定の強度に達しているかの判断については、ごく初

期強度レベルから材齢経過後の圧縮強度の測定まで様々であるが、供試体ではなく構造物のコンクリート強度を測定する目的で非破壊検査試験方法を適用している事例が多かった。

独自の試験は実施していないと回答した場合でも、コンクリートの状態を目視観察してコンクリートの性状を判断できる技術者がいる場合には、以下のような行為を実施しているとの回答が得られた。

- ・ 試し練りや受入れのスランブ試験において、コーン引き上げ後の試料の側面を突き棒で軽くたたくことにより材料分離に対する抵抗性の程度を評価する。コンクリートが崩れないで変形する場合、プラスチックな状態で良好なワーカビリティを有していると判断できる。スランブ板を木槌で軽くたたいて判断する場合もある。
- ・ 生コン車から排出されるコンクリートの状態を観察する。生コンがシュートを落ちる状態を見て、性状を確認する。

以上のような行為は、多くの現場において経験を積んだ熟練技術者がいた場合に行われていると考えられる。不具合や初期欠陥を出さない、という点においては重要な事項であるが、必ずしも施工の確実性を担保する行為とはなっていないと考えられる。

以上のように、本アンケート結果では、圧送、打込み、締固め、充てんといったフレッシュコンクリートに関する試験が3割以上と多く提案されていた。これは、良質な骨材資源の枯渇やコンクリートの使用材料の多様化によりスランブだけでは判断できない施工性能の相違があるといった背景から、スランブ試験に代わる新しいワーカビリティ評価試験方法が求められ、コンクリートの施工性能の評価方法が必要とされているためと考えられる。

7. まとめ

自己充てんコンクリートや高強度コンクリート等に代表されるように新材料の開発は、我が国だけでなく世界中で、めざましい進歩がある。コンクリート構造物の設計法は、解析技術の精度の向上だけでなく、安全率を、材料や荷重に対するものだけでなく、計算手法の不確実性や施工上避けられない部材の寸法誤差に対するものにまで細分化した限界状態設計法が使われている。施工においても、現場作業員の減少と高齢化の傾向から、機械化、システム化が進んでいる。しかし、作業手順を記憶させ、一定の手順に従って連動し、作業を繰り返すシステム化（機械化）は、大いに進んでいるが、作業状況の適否を装置自身が判断しながら作業を進めることができるようなインテリジェンスをもった装置、すなわち、

ロボットは、まだ見あたらない。コンクリート技術は、材料、設計および施工の三分野が、互いに関連し合って発展してきた技術である。建設技術の合理化、省力化における課題は、まだまだ多くある。本委員会では、とりわけ、確実な施工を行うために必要な試験方法について調査を行ってきた。その目的の一つは、近い将来、施工のインテリジェンス化を図るためである。

本委員会の活動をとおしてとくに分かったのは、作業状況の適否は、未だに、現場作業員の経験に基づく判断に委ねられているということである。本委員会を始めた頃には、「余計な試験が増えると、作業の効率が悪くなる。」という意見もあった。しかし、確実な施工が行われなければ、その被害は、発注をした者、設計を行った者、材料を納入した者、施工を行った者だけではなく、その構造物を利用する人達にまで及ぶことになる。

同一スランブのコンクリートでも、粘性等によりコンクリートの施工性は大きく相違する。施工性が相違するうえ、施工方法も変わってくれば、さらにコンクリートの品質の違いが大きくなる。これらの影響度を把握できる試験方法と、その試験結果が実際の施工に反映されるシステムが構築され、近い将来、性能規定型で設計・施工される構造物において、その施工の確実性が保証されることに期待したい。

謝辞

実験にあたっては、東洋建設（株）、宇部三菱セメント（株）の協力を、また、引っかけ試験に関しては日本大学湯浅准教授に貴重なアドバイスをいただきました。また、本委員会で実施したアンケートに多くの協会、企業、建設技術者の方々に積極的にご協力いただきました。末尾ながら記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 梁俊，國府勝郎，宇治公隆，上野敦：フレッシュコンクリートの締固め性試験法に関する研究，土木学会論文集 Vol. 62, No. 2, pp.416-427, 2006.6
- 2) 金子稔，安田正雪：コンクリート充てん検知システムとその応用技術，コンクリート工学 Vol.44.No.5, pp.98-101
- 3) 瀬古繁樹，三井健郎，結城秀恭，中川裕巳：型枠面での高周波静電容量測定によるコンクリート充填状態の判定，コンクリート工学年次論文集，Vol.29, No.2, pp.697-702,2007
- 4) 湯浅昇，松井勇，笠井芳夫：引っかけ傷幅により表面強度推定方法，日本建築学会学術講演梗概集 A-1,pp.677-678, 1999.9