

委員会報告 「超硬練りコンクリート研究委員会報告」

国府勝郎*1・牛島 栄*2・森 博嗣*3

【委員構成】

委員長	国府勝郎	東京都立大学			
幹事	牛島 栄	(株)青木建設	森 博嗣	名古屋大学	
委員	宇治公隆	大成建設(株)	内田美生	住友大阪セメント(株)	
	梅沢健一	(株)エヌエムビー	遠藤孝夫	東北学院大学	
	(古沢孝男)	〃	大橋正治	(財)日本建築総合研究所	
	小島 明	日本セメント(株)	加形 護	鹿島道路(株)	
	(藤原浩巳)	〃	加賀谷誠	秋田大学	
	栗田守朗	清水建設(株)	国分修一	大林道路(株)	
	堺 孝司	北海道開発局 (現 香川大学)	鈴木一雄	全国生コンクリート工業組合連合会	
	根本信行	日本舗道(株)	堤 知明	東京電力(株)	
	信田佳延	鹿島建設(株)	野田悦郎	日本道路(株)	
	平田隆祥	(株)大林組	早川健司	東急建設(株)	
	堀井克章	阿南工業高等専門学校	福手 勤	運輸省	
	三田紀行	職業能力開発大学校	松井 淳	電力中央研究所	
	森濱和正	建設省	村上祐治	(株)間組	

【五十音順, ()は前委員】

1. 委員会活動の概要

近年、ダム、舗装を初めとし、大規模橋梁基礎、工場製品などに、スランプ 0cm の極めて硬いコンクリート（以下、超硬練りコンクリートと称す）が多用されている。超硬練りコンクリートの品質は、通常のコンクリートよりもコンクリート中の空隙の程度に影響されやすく、配合に支配されるコンシステンシーあるいは締固め性と締固め条件が複雑に関係し合う。すなわち、コンクリートには振動・加圧に適合する硬さあるいは即時脱型後の変形抵抗性と、密実性を得るための柔らかさの両性質が求められる。

しかし、超硬練りコンクリートを利用した工法は実務的な経験によって発展してきた経緯があり、振動締固め機構などの解明を追究した基礎研究は極めて少ない。

このような背景をもとに、日本コンクリート工学協会では、1996年6月に「超硬練りコンクリート研究委員会」を発足した。超硬練りコンクリートは、ダム、舗装及び工場製品で利用されているものの、それぞれの分野で独自に技術が構築されている。本委員会では、超硬練りコンクリートの総合的な評価を行うため、各分野の技術者並びに官学民が均等に参加する形を

*1 東京都立大学 工学部 土木工学科 教授, 工博 (正会員)

*2 (株)青木建設 研究所 材料研究室 室長, 工博 (正会員)

*3 名古屋大学 工学部 建築学科 助教授, 工博 (正会員)

とった。また、超硬練りコンクリートによって重要な課題であるコンシステンシーの評価と締固め機構の解明を目指し、それぞれ、コンシステンシー分科会（主査：加賀谷誠，副主査：信田佳延），締固め機構分科会（主査：遠藤孝夫，副主査：栗田守朗）の2分科会を設置した。

本委員会の調査・研究成果は、委員会報告書を作成し、1998年6月24日に開催した、「超硬練りコンクリート技術に関するシンポジウム」においてすでに報告している。本報は、委員会報告書の要点を紹介するものである。

2. 超硬練りコンクリートの現状

超硬練りコンクリートの主な用途は、ダム工事、舗装工事並びに工場製品である。

まず、ダム工事では、振動ローラによって超硬練りコンクリートを締め固めるRCD(Roller Compacted Dam-Concrete)工法が普及している。RCD工法の主な特長は、①極めて貧配合なコンクリートを使用できること、②ダンプトラックやベルトコンベアによる運搬や振動ローラによる締固めが可能になり、大量のコンクリートが打設できることである。

これまでに多くのダム工事に利用されてきたRCD工法であるが、今後、RCD工法を行うに当たり、①高ピーライトセメントや混和材の置換率を高めたセメントの使用の検討、②VC値と振動ローラの締固め特性との関連性の究明、③VC試験で評価できない性質を判定できる試験方法の開発、④適切に判断できる現場管理方法の検討などが要求される。

舗装工事においても、RCD工法と同様に超硬練りコンクリートを振動ローラやタイヤローラを用いて転圧、締固めを行う、転圧コンクリート舗装(RCCP, Roller Compacted Concrete Pavement)がある(以下、RCCPと称す)。RCCPは第一次オイルショックによるアスファルトの不足と価格高騰によってアスファルト舗装の代替として急速に発展した。

RCCPには、アスファルト舗装用の舗設機械

を使用し、版厚を自由に變えることができ、必ずしも型枠を必要としない、といった特長を有する。しかし、一層15～25cmのRCCPを一度に施工するには、十分な締固めと平坦性を得るための高度な施工技術が必要となる。また、重交通道路等に対してはコンポジット舗装が有効とされるが、現在のところ、構造設計方法が確立されていない。横収縮目地の適切な間隔、簡易な施工方法、供用後の破損箇所の補修方法などについても、今後の検討が必要である。

工場製品は、ダム工事や舗装工事とは異なり、型枠の転用や出荷を早めるために、低水セメント比の超硬練りコンクリートが使用されている。強固な鋼製型枠にコンクリートを詰め、振動や加圧振動による締固めが施される。さらに、ブロック等の製造では、生産性の向上を目的に、締固め成形直後に、型枠の一部または全部を取り外す即時脱型工法が採用されている。

しかし、製品の品質や生産性を大きく左右する締固め性能を評価する方法が確立されておらず、各工場が使用する材料や機械を用いて、製品の仕上がりや強度等を確認しながら、コンクリートの配合を決めているのが現状である。今後、締固めの理論やコンシステンシーの評価法を確立し、標準化を推進する必要がある。

その他の用途としては、明石海峡大橋1Aアンカレイジ基礎工事、床版上面増厚工法による補強工事、マウンド漁場造成ブロックの製造などがある。

3. 超硬練りコンクリートの要求品質

RCD用、RCCP用及び即時脱型用のコンクリートに要求される品質を、表-1に示す。また、各コンクリートのコンシステンシー評価試験と規格値を、表-2に示す。

フレッシュ時の超硬練りコンクリートには、強度、耐久性並びに締固め性が十分に確保できるワーカビリティが要求される。しかし、各コンクリートの用途の違いにより、使用材料、配合並びに製造・施工方法が異なるばかりでな

表-1 超硬練りコンクリートの所要の特性

		コンクリートの種類		
		RCD用	RCCP用	即時脱型用
フレッシュ コンクリート	ワーカビリティ	強度、耐久性、締固め性を確保できる		
	プラスティシティー		スリップフォーム ペーパーを使用して 変形しない	即時脱型時に 変形しない
	フィニシャビリティ	ウェーピングを生じない	平坦性・肌理	
硬化時	水和熱	温度ひび割れ抵抗性(特にRCD用に要求)		
硬化 コンクリート	強度	圧縮強度,引張強度 (伸び応力) せん断強度	曲げ強度または 引張強度	圧縮強度
	耐久性		曲げ疲労強度 すりへり抵抗性 凍結融解抵抗性	凍結融解抵抗性
	収縮		乾燥収縮	
	その他	単位容積質量	摩擦・すべり抵抗性 視認性 早期開放性	

く、表-2に示すようにコンシステンシーの評価方法も異なることから、品質を横並びにして比較することは難しい。

RCD用コンクリートは、ダム内部コンクリートに使用されることから、温度ひび割れの抑制や単位容積質量の確保に重点が置かれる。RCCP用コンクリートでは、コンクリート版としての強度を確保し、さらに平坦性、すべり抵抗性、肌目などの舗装表層として特有の機能が要求される。一方、即時脱型用コンクリートは、圧縮強度及び凍結融解抵抗性が要求される他、工場製品として良好な外観が求められる。

4. 超硬練りコンクリートの配合の特徴

通常コンクリート、粉体系高流動コンクリート及び各用途の超硬練りコンクリートについて、コンクリート 1m³中に占める各材料の容積を比較したものを、図-1に示す。超硬練りコンクリートは、通常コンクリートに比べて単位ペースト量が少なく、高流動コンクリートとは対象的である。単位セメント量に関しては、RCD用コンクリートは極めて少ないものの、RCCP用や即時脱型用のコンクリートに関しては、通常コンクリートと大きな違いはない。この図から判断すれば、同じ超硬練りコンクリ

表-2 用途毎のコンシステンシー試験と規格値

コンクリート名	試験名	規格値
RCD用	VC試験	VC値 20秒
RCCP用	マーシャル突固め試験	締固め率 96%
	ランマ突固め試験	締固め率 97%
	VC試験	修正VC値 50秒
即時脱型用	供試体成形機による コンシステンシー試験	充填率 95%

コンクリート1m³中に占める各材料の容積(m³/m³)

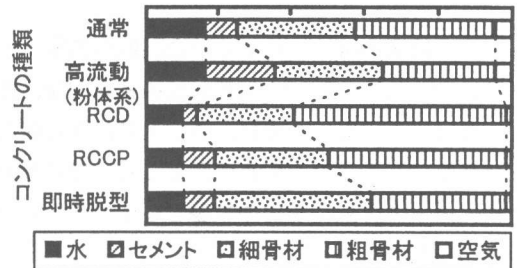


図-1 各種コンクリートの単位量の比較

トであっても、RCD工法、RCCP及び工場製品の各用途によって、単位セメント量や細骨材率に違いがあることがわかる。

そこで、本委員会では、RCD用、RCCP用及び即時脱型用の各コンクリートについて、単位水量、単位結合材量及び細骨材率の調査を行った。図-2は、調査結果をもとにコンクリート

の各要因の分布を示したものである。なお、RCCP 用コンクリートは、道路に使用されているものを対象とした。即時脱型用コンクリートは、コンクリート積みブロックを対象とし、委員会が製造工場に調査した結果である。

単位水量は、いずれのコンクリートにも顕著な違いはなく、100～105kg/m³にピークがある。一方、単位結合材（フライアッシュ等を含む）量は、RCD 用コンクリートが 120～130kg/m³の極めて狭い範囲であるのに対し、RCCP 用及び即時脱型用のコンクリートは 250～320kg/m³の範囲となった。

さらに細骨材率については、3者ともにピークとなる値が異なり、RCD 用コンクリートは 30%を中心に 27～32%の範囲、RCCP 用コンクリートは 40%を中心に 35～45%の範囲、さらに即時脱型用コンクリートに関しては平均として 55.9%であるものの、39.5～82.0%の広い範囲で分布を示していることがわかる。しかし、即時脱型コンクリートに関しては、土木用コンクリートブロック製造指針における細骨材率の推奨値は 45～55%である。実際の工場では、製品の外観等を重視して細骨材率を大きくしているようである。

5. 締固め特性に対する配合要因の影響

締固め特性に及ぼす配合要因の概念図を、図-3に示す。図-3では、単位水量、単位結合材量及び細骨材率を配合要因とした。締固め特性に対する各配合要因の影響をまとめると、以下の通りである。

(1) 単位水量

単位結合材量を一定とし、単位水量を増加させると、RCD 用コンクリートの締固め評価として用いられる VC 値等が急激に低下する。一般に単位水量と VC 値の対数には直線的な関係があるとされる。RCCP 用や即時脱型用のコンクリートにおいても、単位水量の増加に伴うコンシステンシーの低下が、VB 試験や CF 試験の結果から確認されている。単位水量と圧縮強

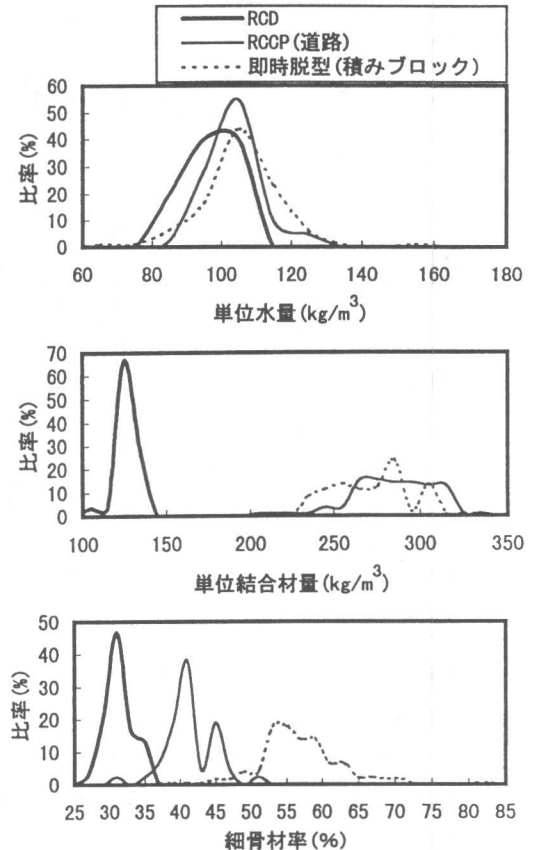


図-2 超硬練りコンクリートの配合分布

度あるいは単位容積質量の関係を調べた場合、凸の曲線や頭打ちとなる曲線を描くことが確認されている。すなわち、単位水量が骨材間の空隙を充填するための量に達しない場合は、空隙率（充填率）がコンクリートの強度に対して支配的であるが、それ以上に増加した場合には水セメント比が支配要因となる。よって、十分な締固めを行うのに必要最小限の単位水量（最適単位水量）が存在するといえる。ただし、この最適単位水量は、骨材の種類、試験体の寸法あるいは振動締固め条件などによって異なる。

(2) 単位結合材量

RCD 用コンクリートでは、単位水量と同様に単位結合材量の増加に伴って VC 値が小さくなることが報告されている。しかし、RCCP 用コンクリート及び即時脱型用コンクリートで

は、RCD 用コンクリートとは異なる傾向が報告されている。すなわち、単位結合（セメント）量の増加により、RCCP 用コンクリートの VC 値は下に凸の曲線を描き、CF 値は直線的に低下する。また、即時脱型用コンクリートについては単位結合（セメント）量が増加するにしたがって修正 VC 値が増加する。

3 種類のコンクリートの試験結果には、RCD 用コンクリートの単位結合材量が 100 ~ 120 kg/m³ の範囲に対し、RCCP 用及び即時脱型用のコンクリートの場合には単位結合（セメント）量 200 ~ 400kg/m³ の範囲といった配合条件の違いが存在する。よって、単位結合材量が極めて少ない場合には単位水量と同様にペースト容積の増加の効果が働くものの、一定量以上に増加した後はセメントによるコンクリートの粘性が増加してコンシステンシーが増大するものと判断される。強度に関しては、単位結合材量の増加に伴う水結合材比の低下によって増加する傾向があるものの、一定の締め固めエネルギーのもとでは十分に締め固められず、強度の増加量が低下する傾向も見られる。

(3) 骨材に関する配合要因

いずれのコンクリートにおいても、細骨材率と VC 値等の間には、下に凸の曲線を描くことが報告されている。他のものに比べて粗骨材最大寸法が大きく、単位結合材量も少ない RCD 用コンクリートでは、VC 値が最小となる最適細骨材率は 30 ~ 32%であり、前述の調査結果とも一致する。RCCP 用コンクリートでは、VC 値やマーシャル突固め試験の締め固め率などから、細骨材率約 38%が最適細骨材率とする報告がある。また、即時脱型用コンクリートにおいては、細骨材の種類や水セメント比によって、空隙率、目標空気量が 2%となるのに要する加圧振動締め固め推定時間が最小となる細骨材率が異なり、30 ~ 42%の値が示されている。

細骨材率と強度の関係は、RCCP 用コンクリートのテストハンマーでは最適細骨材率で最大となる上に凸の曲線、即時脱型用コンクリート

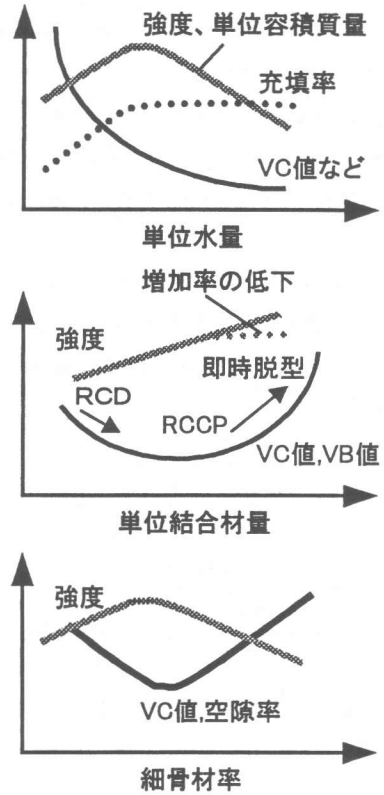


図-3 超硬練りコンクリートの配合要因と特性の関係

では最適細骨材率の値が明らかでないが、圧縮・曲げ強度に対して負の傾きを有する直線関係が示されている。これは、細骨材率を増加によって細骨材粒子間の空隙量が増加したこと起因した結果としている。

6. 配合設計法の基本的な考え方

超硬練りコンクリートの技術は、ダム、舗装及び工場製品の各分野が独立して築かれてきたが、それぞれの配合設計法には基本的に共通した部分がある。超硬練りコンクリートでは、締め固めても空隙が残る場合の充填率（締め固め率）と強度には相関関係がある。すなわち、超硬練りコンクリートの強度は、セメント水比ではなく、セメント空隙比との間に関係が成立する。

超硬練りコンクリートは、完全なコンクリー

トマトリックスを形成するために必要な最小のペースト量を定める。そのため、ペースト量の不足によって不完全なコンクリートにならないように、骨材の空隙をもとにした配合計算が行われる。具体的には、十分に締め固めた細骨材及び粗骨材の空隙を充填するのに必要なペースト量及びモルタル量を計算する。それぞれの指標を、ペーストの細骨材空隙充填率 α 、モルタルの細骨材空隙充填率 β と呼び、以下の式(1)~(3)に示すように各材料の単位量の計算に用いられる。

$$G = \frac{1000 - 10V_A}{\frac{10V_G \beta}{W_G} + \frac{1}{\rho_c}} \quad (1)$$

$$S = \frac{10V_G \beta G}{\left[\frac{10V_s \alpha}{W_s} + \frac{1}{\rho_s} \right] W_G} \quad (2)$$

$$W + \frac{C}{\rho_c} = \frac{10V_s \alpha S}{W_s} \quad (3)$$

ここに、

W_s, W_G : 表面乾燥状態の細骨材, 粗骨材を十分に締め固めた時の単位容積質量(kg/m^3)

V_s, V_G : 表面乾燥状態の細骨材, 粗骨材を十分に締め固めた時の空隙率(%)

ρ_s, ρ_c, ρ_g : 細骨材, 粗骨材, セメントの比重

V_A : 設計空隙量(%)

S, G, W, C : 細骨材, 粗骨材, 水, セメントの単位量(kg/m^3)

理論的に理想的な配合は、 $\alpha = \beta = 1$ の場合であるが、実際には施工性等から1よりも大きくしてある程度余裕のある状態のコンクリートを使用している。

なお、RCD用、RCCP用および即時脱型用のコンクリートの具体的な配合設計法は、委員会報告や関係機関で定められた設計法などを参照していただきたい。

7. コンシステンシー試験

コンシステンシーは変形あるいは流動に対する抵抗性の程度であり、通常のコンクリートに対しては、図-4に示すようにスランプ試験の値によって評価されている。しかし、コンシステンシーが小さい、あるいは大きい範囲では、スランプによってコンシステンシーを評価することは難しい。すなわち、高さ300mmのコンクリートの自重による一軸圧縮のもので発生するせん断応力の大きさが、変形抵抗性を把握する上で過大または過小であると言える。したがって、超硬練りコンクリートの場合には、より大きな応力を作用させる試験によって、コンシステンシーを評価する必要がある。

超硬練りコンクリートのコンシステンシー評価試験方法は、各分野において考案・実施されてきた。以下、各分野別に評価試験を紹介する。

(1) RCD用コンクリート

標準 VC 試験, 大型 VC 試験, 大型供試体の締め固め装置を用いた締め固め試験

(2) RCCP用コンクリート

マーシャル突固め試験, ランマ突固め試験,

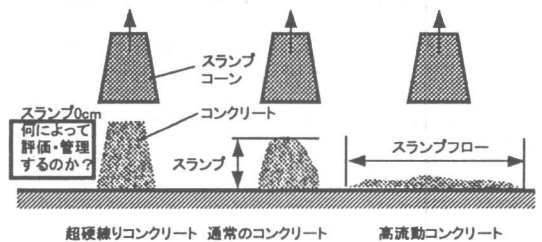


図-4 スランプ試験における各種コンクリートの性状

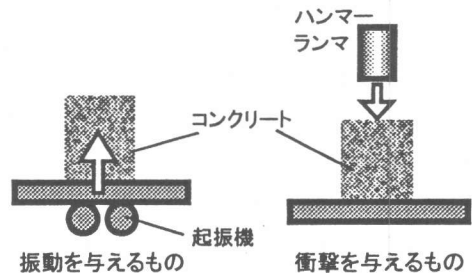


図-5 超硬練りコンクリートのコンシステンシー評価試験の概念図

VC 振動締固め試験, 締固め性試験, タンパー
締固め試験, RCC 管理試験

(3) 即時脱型用コンクリート

供試体の成形機による超硬練りコンクリートのコンシステンシー試験, VB 試験機によるコンシステンシー試験, 締固め係数試験装置(CF 試験)によるコンシステンシー試験, 振動加圧締固め試験

上記の試験方法は, 図-5 に示すように, コンクリートに振動力を与えるものと衝撃力を与えるものに大別することができる。また, 既に規格化された方法で配合の選定や品質管理に用いられているもの, 試験方法が簡便であるものなど, それぞれに特徴も有する。

超硬練りコンクリートは, 強力な締固めを行うことを前提にしたコンシステンシーの大きなコンクリートであり, 配合や締固めの条件が不適切な場合には, 硬化コンクリート中に空隙が残存しやすい。したがって, フレッシュ状態の超硬練りコンクリートの特性は, プラスチックなコンクリートにおける変形あるいは流動に対する抵抗性の程度(コンシステンシー)の概念よりも, むしろ締固めによる空隙排除のしやすさの程度である「締固め性」に着目することが重要である。これは, 図-6 に示すように, 異なる配合のコンクリートを十分に締め固めた時の充填率が同値じであっても, 締固めの程度が十分でない場合には残留する空隙の量が異なることを意味している。

超硬練りコンクリートの締固めに関する研究として, 締固め性に関するものが報告されている。これによれば, 振動加速度によって生成される慣性力が, 粒状混合物の内部摩擦抵抗よりも大きい条件下では, 一定配合の締固めによる充填率の増大は, 振動条件に関わらず, 試料の受ける振動エネルギーに支配され, 振動エネルギーと充填率との関係である締固め曲線(関数)を定義することができる。締固め曲線は, 締固め中の試料の沈下量を一定時間間隔で測定し, これを充填率に変換することによって求めるこ

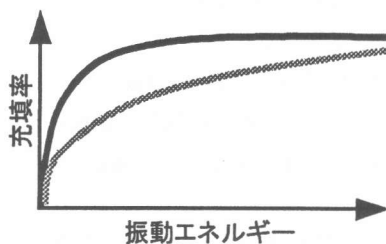


図-6 振動エネルギーと充填率の関係

とができる。

以上より, 委員会では, 現場における超硬練りコンクリートの管理試験方法としては, 試験方法が簡便で, 規格化された既存の方法を用いるとしても, 配合を詳細に検討する室内試験等では, 豊富な情報が得られる超硬練りコンクリートの締固め性試験方法(案)を提案することにした。締固め性試験結果により, 超硬練りコンクリートの単位水量, 細・粗骨材の粒度, 混和剤の有無, あるいは経時や温度による締固め性状の変化を鋭敏に把握できる。また, 締固めの振動条件が明らかな場合には締固めを完了する仕事量を定量的に知ることができる。

提案した締固め性試験には, 試料容器(ϕ 150mm \times 300mm), テーブル振動機(5G,75Hz), 上載板(ϕ 148mm), 振動制御装置, 非接触型変位計(計測範囲 100mm 以上, 最小目盛 200 μ m 以下)一式及びデータ処理装置一式を使用する。試験機を用いて測定する値は時間 t_i と試料上面の変位 x_i であり, 設定値と併せて以下の計算を行う。

- 1) 任意の時間 t_i における試料の充填率 γ_{t_i}
- 2) 任意の締固め時間における締固め仕事量 E_{t_i}

$$E_{t_i}(\text{J}/\ell) = m_{t_i} \cdot \frac{\alpha_{\max}^2}{(2\pi)^2 f} \cdot t_i \quad (4)$$

ここに,

m_{t_i} : 試料の密度(kg/ ℓ), 直前の計測時間における充填率と示方配合から求めた単位容積質量によって計算する。

α_{\max} : 正弦波振動の最大加速度(m/s^2)

t:振動時間(s)

f:振動数(s⁻¹)

3) 締固め関数及び締固め効率C_e

$$\gamma = C_i + (C_r - C_i)[1 - \exp(-bEt^d)] \quad (5)$$

$$C_e = bd(C_r - C_i)Et^{(d-1)}\exp(-bEt^d) \quad (6)$$

ここに、

γ : 締固め時間 t における充填率(%)

Et: 締固め時間 t における締固め仕事量
(J/ℓ)

C_e: 締固め効率, 締固め仕事量 1J/ℓ における締固め関数の勾配

C_i: 初期充填率(%)

C_r: 達成可能充填率(%)

b, d: 実験係数

4) 締固め完了仕事量E₉₈

締固め関数の式(5)に充填率 98%を代入して計算する。

8. 締固め機構

8.1 実験的検討

(1) 振動ローラを用いた実験

振動ローラによって、超硬練りコンクリートを転圧した場合、転圧回数に伴って沈下量や密度(RI 密度比)が大きくなる。また、回数が多くなるに従って徐々に増加量が小さくなる。

振動ローラから超硬練りコンクリート内に伝播した波の加速度は振動輪直下で最大となるが、振動輪直下からの距離に応じて鉛直下方並びに水平方向に急激に減衰する。路盤の支持条件によっても鉛直方向の加速度分布は変化し、上層の加速度が 5G 以上であっても最下層(4層)では 1G 以下となる結果もある。これらの減衰特性を把握すれば、積算締固めエネルギーを算出した締固め管理が可能となる。最近では、実験で得られた加速度をフーリエスペクトルを用いることにより、超硬練りコンクリートの締固め程度を把握する試みがなされている。また、振動をコンクリートに与えた場合のモルタル部分の導電率が変化することに着目し、締固めの程度を把握しようとする研究も見られる。しか

し、現時点では定性的な評価に留まっており、今後、締固め現象の定量化への試みが望まれる。

(2) 表面振動機を用いた実験

表面振動機を用いた超硬練りコンクリートの室内実験は、振動ローラによるコンクリート上面からの振動締固め等を模擬したものである。実施例としては、最大寸法 80mm の骨材を使用できる大型供試体試験、締固め層内に設置した加速度計及び圧力計によって締固め層の振動応答挙動を把握する試験、表面振動機の振動加速度の乱れ度を把握して締固めの進行状況を把握しようとする試験、さらには締固め時の柱状供試体の組成成分の変動把握し、流動状況の可視化した試験がある。

表面振動機の振動数が大きいほど加速度が大きくなり、短時間で相対締固め密度を 100%近い値にでき、圧縮強度も大きくなる。この傾向は、振幅、振動機質量についても同様である。そのため、振動数、振幅及び振動機質量の各条件を総合的に評価した締固めエネルギーによる締固め機構の検討が行われている。

(3) 振動台を用いた実験

振動台を用いた超硬練りコンクリートの研究では、振動台の振動数、振幅あるいは加速度を要因とし、締固めの経過時間に伴うコンクリートの性状の変化を調べている。

振動台を用いた実験では、振動数、振幅が大きくなるに従ってコンクリートの沈下量が大きくなり、その沈下性状は双曲線によって近似できること、あるいは指数関数を用いた解析式で表現できることが報告されている。

また、超硬練りコンクリートの締固めに必要な限界加速度は、2G ~ 2.5G であるとされる。沈下率による締固めの評価では、大型 VC 値における沈下率と極限沈下率との比が 0.8 以上、VC 沈下率が 10%以上である必要がある。

コンクリート試料の受ける最大運動エネルギーに着目した締固めエネルギーが、加速度の 2 乗に比例することを重視し、締固めエネルギーを定義した報告がある。また、締固めにおける

充填率の変化は、単位容積当たりの締め固めエネルギーに一義的に支配され、振動条件に関わらず、同一配合の試料の締め固め曲線は、一定の関数で表される。本委員会では、この関係式を締め固め性試験方法(案)で採用した。

8.2 解析的検討

(1) コンクリートの締め固め機構に関する解析
超硬練りコンクリートの締め固め機構に関する解析的な研究は、通常のコンクリートに比べて極めて少なく、超硬練りコンクリートの挙動を十分に表現し得る段階に至っていないのが現状である。超硬練りコンクリートの振動締め固めは、地震時の応答解析等とは異なり、コンクリートの物性が時間とともに変化する状態を取り扱わなければならない。すなわち、超硬練りコンクリートの振動締め固めの解析では、振動の伝播、密度の変化及び性状の変化を組み合わせた解析が必要となる。しかし、現在のところ、振動締め固めのある一面に限った解析に留まっている。

コンクリートを連続体として取り扱う場合には、主として振動力の伝播を対象とした解析となる。しかし、表面振動機を用いた場合の締め固め機構を取り扱った研究はほとんど見あたらない。調査対象をフレッシュコンクリートの締め固め機構に関する研究に広げれば、一次元伝播解析に関する研究、内部振動機の振動伝播と締め固め評価法を検討した研究、一質点系振動モデルによる振動ローラとコンクリートの相互作用の研究、コンクリートの締め固め性と振動エネルギーの関係を検討した研究などがある。

一方、コンクリートを非連続体として離散的な要素で考えた場合には、解析の対象は振動締め固めによる物質の移動、すなわち複合材料としての均質性の変化となる。しかし、非連続体モデルを用いた解析手法が開発されて間もない現状においては、これを用いた締め固め機構の解析は極めて基本的な条件によるシミュレーションにならざるを得ず、いまだ研究報告もない。

(2) 地盤材料の締め固め機構に関する解析技術
振動ローラによって超硬練りコンクリートを

締め固める方法は、古くから行われてきた地盤の締め固めの発想を応用したものである。土が振動によって締め固まる機構は、①土粒子自体の振動による再配列、②衝撃、③土の抵抗の減少及び④土の周期的な変形の4つに分けられる。この中で、砂礫の締め固め機構は、振動によって一時的に粒状土の内部摩擦が減少し、粒子を再配列させる①の説に基づくものであり、RCD用コンクリートの締め固め機構に類似する。

地盤の振動締め固め工法には、バイプロフローテーション工法、サンドコンパクションパイル工法、ロッドコンパクション工法及びバイプローターンパー工法がある。最後に記載した、地表面からタンパーで締め固めるバイプローターンパー工法はRCD工法と極めて類似した方法である。しかし、振動締め固め効果の定量的な評価が設計法に含まれていない。地盤の間隙比の減少として定量化され、同種の振動機を用いた場合の経験則による設計法が定着しており、これらは直接的に超硬練りコンクリートの締め固め機構の解明に結び付くものではない。

しかし、最近、地盤工学の分野でも締め固め機構について、振動機-地盤の連成系全体にわたるバネ-質点系モデル、有限要素モデルあるいは離散要素モデルを用いた数値解析による検討が行われており、実際の設計に反映できるものとして期待されている。

これらの成果を超硬練りコンクリートの振動締め固めに適用するためには、粗粒材料などの要素試験結果から、個別要素法を用いた材料解析によって微視的な性状と巨視的な物性との関連を定量化し、それを有限要素法による構造解析に展開するなどの方法が考えられる。

9. 用語の定義

本委員会では、超硬練りコンクリートに関する用語を以下のように定義した。なお、説明のない用語については委員会報告を参照のこと。

(1) コンクリートの種類

超硬練りコンクリート： スランプが3～10cm

程度のコンシステンシーを有するコンクリートで、一般に内部振動期によって締固めを行うコンクリート。

超硬練りコンクリート： 自重によって容易に変形を生じないようなノースランプのコンシステンシーを有し、一般に振動ローラや振動加圧成形機などの外部振動機によって締固めを行うコンクリート。

転圧コンクリート： 振動ローラによって締固めを行う超硬練りコンクリートの総称。各用途に使用するコンクリートに関しては、RCD 用コンクリート、RCCP 用コンクリートなどと表現することにした。

(2) 配合

モルタル粗骨材空隙比(β, k_m)： 超硬練りコンクリートの示方配合における単位粗骨材量の粒子間に形成される空隙容積に対するモルタル容積の比。

ペースト細骨材空隙比(α, k_p)： 超硬練りコンクリートの示方配合における単位細骨材量の粒子間に形成される空隙容積に対するセメント(結合材)ペースト容積の比。

空隙セメント(結合材)比(v/o)： 締固め後の超硬練りコンクリートにおけるセメント(結合材)の絶対容積に対する水、連行空気及び空隙の全容積の比を百分率で表した値。

その他、単位粗骨材容積、ペーストモルタル容積比、モルタル粗骨材容積比、平均ペースト膜厚、余剰ペースト膜厚、付着ペースト膜厚を定義した。

(3) フレッシュコンクリート及び締固め

空隙： 締め固めたコンクリート中に存在する連行空気以外の孔隙で、締固めによってできるだけ取り除く必要があるもの。

充填率・締固め率： 示方配合から計算される単位容積質量に対する締固め後のコンクリートの単位容積質量の比を百分率で表した値。なお、100 からこの値を差し引いた値は空隙率と表現する。

締固め性： コンクリートの締固めにおいて、

空隙量を最小にする作業の容易さの程度。

ドライセグレーション： 超硬練りコンクリートの取り扱い中に生じる粗骨材の分離。

(4) 締固め性試験

締固め性試験： 単位容積当たりのコンクリートの受ける振動エネルギーを締固め仕事量と定義し、これと充填率との関係である締固め曲線を得る方法。

締固め関数： 締固め仕事量と充填率との関係を表す式。

その他、初期充填率、達成可能充填率、締固め効率、締固め完了仕事量、締固め仕事量、限界加速度について定義した。

10. まとめ

本委員会では、超硬練りコンクリートに着目し、ダム、舗装及び工場製品の各分野における現状技術を取りまとめた。また、コンシステンシー分科会においては、超硬練りコンクリートの性状を把握するための試験方法や締固め特性に対するコンクリートの配合要因を調査し、締固め性を最も的確に把握できると判断された、「超硬練りコンクリートの締固め性試験方法(案)」を提案した。一方、締固め機構分科会では、超硬練りコンクリートの締固め機構に関して、実験的あるいは解析的な検討を行った研究を調査し、これまでの経験的な判断によって築かれた締固め方法を見直した。

超硬練りコンクリートの技術は、ダム、舗装及び工場製品の各分野で独立して発展してきた経緯があり、これまで各分野の技術的な交流は極めて少なかった。しかし、各分野の技術者が委員として議論を交わし、超硬練りコンクリートに関する締固め性の重要性とその評価方法を提案したことは、本委員会活動の大きな成果であると判断される。

最後に、この委員会を契機に、未解明の技術について一層の究明を行い、各分野の技術者が協力して超硬練りコンクリートの技術の確立を目指したい。