

締固め仕事量の評価に基づく 超硬練りコンクリートの配合設計

國府勝郎¹・上野 敦²

¹正会員 工博 東京都立大学教授 工学部土木工学科 (〒192-03 東京都八王子市南大沢 1-1)

²正会員 東京都立大学助手 工学部土木工学科 (〒192-03 東京都八王子市南大沢 1-1)

本文は、超硬練りコンクリートの締固め性および配合設計方法について述べたものである。振動による締固めのエネルギーとコンクリートの充填率との関係である締固め関数を明らかにし、この関係から誘導される指標によって、超硬練りコンクリートの締固めのしやすさを評価する方法を提案したものである。そして、超硬練りコンクリートの配合要因および使用細骨材の変化による締固め性状を試験し、締固めの行いやすい配合の選定方法について検討した結果を述べている。

Key Words : *extremely dry concrete, mix design, consolidation effort, filled volume ratio, compactibility, shape factor of aggregate*

1. 緒論

スランプ 0 cm の超硬練りコンクリートは、ダムにおける RCD 用コンクリートや舗装の RCCP 用コンクリート、工場製品における即時脱型用コンクリート等に多用されている。超硬練りコンクリートは、強力な締固めを行うことによって密実なコンクリートをつくることを前提としているが、配合、使用材料、施工条件などによっては、硬化したコンクリートに数パーセントの空隙が残存する。コンクリート中に空隙が存在すると、十分な強度発現が阻害されまた耐久性を損ないやすい^{1~4)}。したがって、超硬練りコンクリートの力学的性能および耐久性を高めるためには、転圧などの施工に適合するコンシステンシーで、効率よく高い充填率を達成することのできる配合とする必要がある。

一般に、コンクリートの単位水量を増大させれば所定の締固め条件における充填率を高めることができるが、施工性が損なわれやすくなる。このような観点から、RCD 用コンクリートや RCCP 用コンクリートに関する技術指針^{5)・6)}では、転圧施工に供するコンクリートのコンシステンシーの標準値が、VC 振動締固め試験方法の VC 値やマーシャル突固め試験方法の締固め率によって与えられている。し

かし、これらの試験値からは、任意の締固め条件のコンクリートの充填率や締固め性状に関する情報は得られない。

著者らは、超硬練りコンクリートの締固め過程に着目した新しい試験方法として「締固め性試験方法」を提案している⁷⁾。この試験方法は、締固めの振動エネルギーにともなうコンクリートの充填率の増大過程を試験するもので、締固め性状を定量的に把握できるものである。この方法によって得られる結果は、コンシステンシーの概念よりもむしろ締固めのしやすさを意味するものである。J Koleček⁸⁾は 1959 年に本研究と類似の締固め曲線を提案しているが、内部振動機の加速度、コンクリートのコンシステンシーおよび締固め時間を、締固め進行の指標としている。また、村田⁹⁾も締固め関数を提案しているが、締固め作業の程度をコンクリートの運動エネルギーと締固め時間との積によって表している。一方、コンクリートの締固めの影響因子として、加速度、振動数、振幅等について検討したものはあるが、一般に各因子の影響を相対的に比較するに留まり、締固めは振動による液状化作用によると概念的に説明したものが多い。

本文は、コンクリートの締固めに寄与する振動エネルギーを考察し、これを基にして単位容積当たり

Table 2.1 Physical Properties of Aggregates

Series	Sort of Aggregates	Specific Gravity		Absorption %	Bulk Dens. kg/l	Solid Vol. R. %	F. W.
		S. S. D.	O. D.				
I	Pit Sand	2.62	2.59	1.07	1.79	69.1	2.90
	Crushed Stone	2.64	2.61	0.92	1.57	59.9	6.67
II	Blended Sand	2.61	2.57	1.41	1.76	68.5	2.75
	Crushed Stone	2.62	2.60	0.95	1.55	59.8	6.63
III	Normal Sand	Min. 2.58	2.54	0.88	1.51	59.2	1.66
		Max. 2.65	2.63	3.77	1.84	70.1	2.99
	Crushed Stone	2.62	2.60	0.95	1.55	59.8	6.63
	Copper Slag	Min. 3.38	3.36	0.45	2.20	64.4	2.21
		Max. 3.65	3.63	0.55	2.43	67.3	2.59
	Crushed Stone	2.64	2.61	0.92	1.57	59.9	6.67

のコンクリートの受ける振動エネルギー、すなわち締固め仕事量とその充填率との関係を明らかにしている。そして、超硬練りコンクリートの配合条件や使用骨材の変化が、締固め性に与える影響を締固め性試験方法によって検討したものである。また、単位水量、細骨材率などの配合要因、細骨材の粒子特性の締固め性に及ぼす影響についても検討を行っている。

2. 実験方法

(1) 使用材料

a) セメント

実験に使用したセメントは普通ポルトランドセメントで、JIS R 5210 に適合したものである。

b) 骨材

実験に用いた細骨材および粗骨材の物理的性質を Table 2.1 に示す。粗骨材はいずれも砕石 2005 を用いた。コンクリートに用いる粗骨材は、ほとんどの場合に砕石であることを考慮し、細骨材の種類が変化した場合の締固め性に対する影響について、シリーズⅢで検討を行っている。砕砂、陸砂、山砂およびこれらの混合細骨材を含む 9 種類の普通細骨材を用いたシリーズと、銅スラグ細骨材 6 種類を用いたシリーズがある。銅スラグ細骨材は実用化を検討中のものであるが、石質が硬く RCCP 用コンクリートの材料に適していること、角張った粒子形状をしており、超硬練りコンクリートの締固め性向上のための配合設計上の対策を検討するのに適していることから使用した。なお、実験に用いた銅スラグは、冷却処理されたものを 4 分間破砕処理したもの¹¹⁾ である。これらの骨材の性質は Table 2.1 に範囲を示し、個々の骨材についての試験値は考察の中で示す。

(2) コンクリートの配合

本研究では、コンクリートの配合設計において、粗骨材空隙量に対するモルタル量の比を表す式 (1) および細骨材空隙量に対するペースト量の比を表す

Table 2.2 Mix Proportions of Tested Concretes

Test Series	Km	Kp	W/C	s/a	Unit Content (kg/m ³)				
					W	C	S		
I	W 100	1.60	1.30	0.35	0.404	100	286	857	1274
	W 90	1.60	1.11	0.35	0.418	90	257	907	1274
II	s/a series	1.40	1.79	0.35	0.340	115	329	694	1350
		1.50	1.69	0.35	0.362	115	329	739	1305
		1.60	1.59	0.35	0.383	115	329	781	1262
		1.70	1.52	0.35	0.402	115	329	820	1223
	W series	1.80	1.45	0.35	0.421	115	329	858	1185
		1.50	1.33	0.35	0.385	100	286	814	1304
		1.54	1.41	0.35	0.385	105	300	804	1289
		1.57	1.50	0.35	0.385	110	314	794	1274
		1.68	1.59	0.35	0.385	115	329	784	1258
		1.76	1.68	0.35	0.385	120	343	775	1243
W/C series	1.64	1.65	0.30	0.385	110	367	778	1247	
	1.57	1.50	0.35	0.385	110	314	794	1274	
	1.52	1.39	0.40	0.385	110	275	807	1294	
III	Normal	1.60	var.	0.35	0.405	100	286	var.	1262
	Copper	var.	1.40	0.35	var.	110	314	var.	var.

(note) var. : variable by samples

式 (2) を用いている¹⁰⁾。また、これらの係数を用いた場合、細骨材率は式 (3) によって表すことができる。これを用いた理由は、コンクリートの締固めにおける骨材相互の内部摩擦抵抗を考察する上で優れた方法であることによる。

$$km = m / G \cdot e_x \quad (1)$$

$$kp = p / S \cdot e_s \quad (2)$$

$$s/a = \frac{km \cdot e_x \cdot \rho_x}{km \cdot e_x \cdot \rho_x + kp \cdot e_s \cdot \rho_s + 1} \quad (3)$$

ただし、 $e_x = 1 / T_x - 1 / \rho_x$

$$e_s = 1 / T_s - 1 / \rho_s$$

ここに、 km : モルタル粗骨材空隙比、 kp : ペースト細骨材空隙比、 m : 単位モルタル量 (l/m^3)、 p : 単位ペースト量 (l/m^3)、 G, S : それぞれ粗骨材および細骨材の単位量 (kg/m^3)、 s/a : 細骨材率、 ρ_x, ρ_s : それぞれ粗骨材および細骨材の表乾比重、 T_x, T_s : それぞれ吸水率を考慮した粗骨材および細骨材の単位容積質量 (kg/l)

実験に用いたコンクリートの配合を Table 2.2 に示す。シリーズ I は締固めにおける振動条件の影響を検討したもので、 W/C を 35%、 km を 1.60 とし、 W を 100 および 90 kg/m^3 の 2 種類で試験した。

シリーズ II は配合要因の変化が締固め性に及ぼす影響を検討したものであり、 s/a シリーズ、 W シリーズおよび W/C シリーズに分かれている。 s/a シリーズは W/C を 35%、単位水量を 115 kg/m^3 の一定条件で、 km を 0.10 ごとに変化させているが、式 (3) によって細骨材率を変化させたことと同じである。 s/a シリーズにおいて締固め仕事量が最小となる最適細骨材率を求め、その細骨材率のもとで単位水量を変化させて W シリーズを試験した。 W シリーズの単位水量は、100 ~ 120 kg/m^3 の範囲で 5 kg/m^3 ごとに変化させている。 W/C シリーズは、実用に供されている RCCP 用コンクリートの配合と

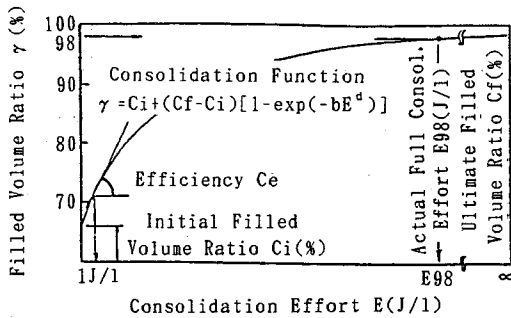


Fig.2.1 Consolidation Curve

同等と考えられる単位水量を、マーシャル突固め試験結果を参考として 110 kg/m^3 と想定し、最適細骨材率のもとで水セメント比を 30 ~ 40% の範囲で 5% ごとに変化させた。

シリーズⅢは細骨材の種類の締固め性に対する影響を検討したものであり、普通細骨材を用いた実験では各材料の単位量を一定とし、銅スラグ細骨材を用いた実験では、粒子の角張りによる締固め性の低下を考慮して k_p を 1.40 の一定とした。

(3) 練混ぜ

超硬練りコンクリートの練混ぜは、シリーズⅠおよびⅡでは容量 50l のパン型強制練りミキサーを用い、1 バッチの量を 30l とした。シリーズⅢの練混ぜは、容量 20l の小型ミキサーで 1 バッチの量を 5l とした。

(4) 試験方法

a) 締固め性試験

締固め性試験は、単位容積当たりの試料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である⁷⁾。締固め仕事量は、後述する式(6)によって振動条件、締固め時間およびコンクリートの単位容積質量によって求められる。また、充填率は示方配合から計算される理論単位容積質量に対する百分率によって表したものである。

示方配合に基づいて、円筒形容器 ($\phi 100 \times 200 \text{ mm}$) に対して充填率 100% に相当する試料を計量し、振動台上に固定したホッパを有する鋼製容器に 3 層に分けて投入し、各層を 15 回ずつ突き棒で突いて初期状態を一定とする。シャフトのついた上載板を試料上面にセットして振動を開始し、振動中の試料の高さ変化を通常 0.3 s ごとにレーザー変位計で測定し、パーソナルコンピュータに入力して充填率に変換する。一般に、振動条件は加速度 5G、振動数 75 Hz を用いた。この締固め過程を表す締固め曲線は、式(4)によって良好に近似することができる。

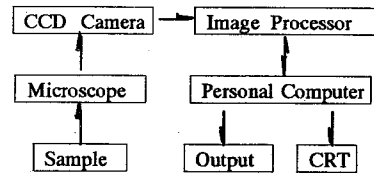


Fig.2.2 Outline of Image Processing Technique

$$\gamma = C_i + (C_f - C_i) \{1 - \exp(-bE^d)\} \quad (4)$$

ここに、 γ : 締固め仕事量 E における充填率 (%),
 E : 締固め仕事量 (J/l), C_i : 初期充填率 (%), C_f : 達成可能充填率 (%), b および d : 実験定数

Fig.2.1 に示す締固め曲線から分かるように、達成可能充填率 C_f は無限大の締固め仕事量を与えたときに推定される充填率、締固め効率 C_e は仕事量 $1 J/l$ における締固め曲線の勾配である。また、充填率 98% を実用上の締固めの終了とみなし、その値が達成される締固め仕事量 E_{98} によって締固め性を総合的に評価する。

b) VC振動締固め試験

VC 振動締固め試験⁵⁾は、 $\phi 240 \times 200 \text{ mm}$ の容器に詰めた試料に重錘 20kg を載荷し、振動数 50 Hz、振幅 0.5mm の振動台上で締固めを行うものである。この方法は、試料上面にモルタルが浮かび上がり透明円板下面全体に接するまでに要する時間、すなわち VC 値を求めるものであるが、本研究においては、振動開始後 3, 10 および 60 s で振動を停止し、そのときの試料高さから充填率を求めた。なお、締固め仕事量は後述の式(6)によって計算し、モータ電源を停止した後の 2, 3 s 間の慣性振動および重錘の微小な跳躍の影響は無視している。

c) マーシャル突固め試験

マーシャル突固め試験⁶⁾は、所定量の試料を $\phi 100 \times 200 \text{ mm}$ の型枠に詰め、質量 4.5kg のハンマを高さ 457mm から 50 回落下させ、試料の締固め率を求めるものである。本研究では、ハンマが落下するごとに試料高さを自動測定できるように改造し、これから落下ごとの充填率を求めた。この試験方法における締固め仕事量は、ハンマの位置エネルギーと落下回数との積によって計算した。

d) 細骨材粒子の形状係数

細骨材の粒子形状を画像解析によって判定した。この方法は、試料を顕微鏡で 60 倍に拡大して CCD カメラを通して画像解析装置に送り、画像の明暗および輪郭の確定等の処理を行った後、画像の投影周長および投影面積を測定する。粒子の形状係数は、投影周長と面積とから得られる円形度係数の逆数として式(5)から求めた。

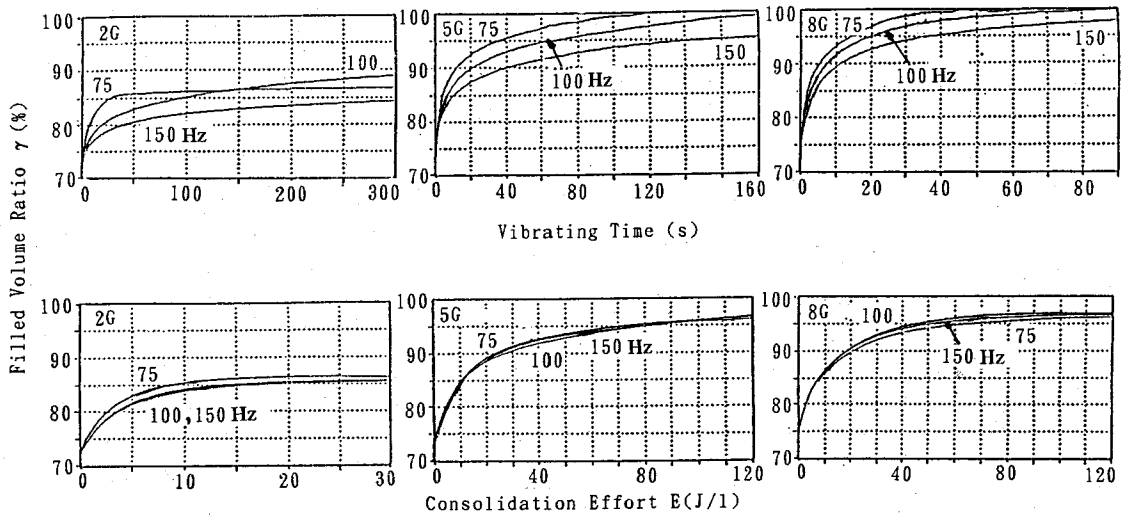


Fig.3.1 Effect of Frequency on Consolidation under Constant Acceleration

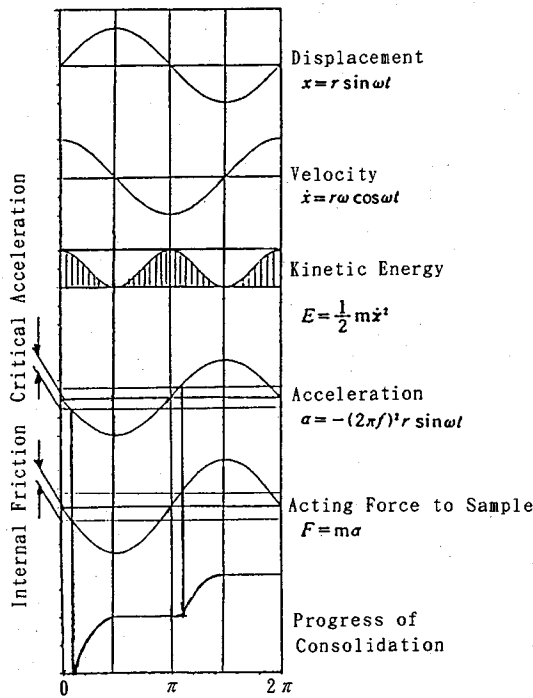


Fig.3.2 Schematic Process of Vibration and Consolidation

$$s = \frac{L^2}{4\pi F} = \frac{1}{\text{円形度係数}} \quad (5)$$

ここに、 s : 粒子の形状係数、 L : 粒子の投影周長 (mm)、 F : 粒子の投影面積 (mm^2)

試料は 1.2 ~ 0.6mm の粒子をふるい分けによって収集し、1 画面に 6 粒子を個々に同時測定し、5 画

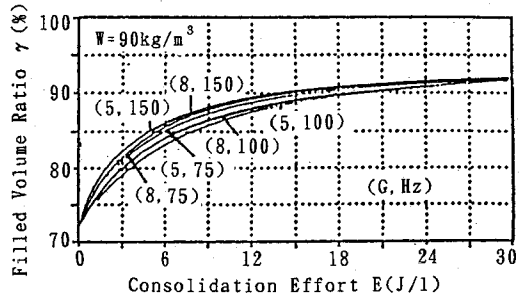


Fig.3.3 Consolidation Curves under Different Vibrating Conditions

面で全粒子数 30 個に関するデータを得て、この平均値を測定値とした。画像周長および面積は、対象エリアの格子分割によって求められる¹¹⁾。なお、この方法は 3次元の粒子を 2次元で認識していることが問題であるが、通常の塊状粒子に対しては、測定粒子の数を多くすることによって適切な評価が得られるものと考えられる。

3. 結果および考察

(1) 試験方法と締固め仕事量

a) 締固め仕事量

振動締固めにおける加速度および振動数の締固めの進行に対する影響を検討するため、加速度を 2, 5 および 8 G とした条件で、振動数を 75, 100 および 150 Hz に変化させて締固めを行ったときの充填率の締固め時間による変化を Fig.3.1 の上部に示す。一定締固め時間に対して、加速度が大きいほど、また振動数が小さいほど充填率が高いことが分かる。加

速度が大きいことは試料に作用する力が大きいことを、一定加速度のもとで振動数が小さいことは振幅が大きいことを意味している。このことは締めめ挙動を力の作用によってなされる仕事量としてとらえる必要があることを示唆していると考えられる。

振動台による試料の締めめは、一般に滑り棒の付いた上載板または重錘で押さえられており、試料と振動台との挙動は一致していると見なせるので、試料の振動挙動は Fig.3.2 に示すように模式化することができる。単位容積の試料の最大運動エネルギーは初等力学から $1/2 \cdot m [\alpha_{max} / (2\pi f)]^2$ であり、運動エネルギーが減少する過程で試料に力が作用し、構成粒子が空隙を充填するように移動する。1周期で2回振動エネルギーが供給されるので、振動時間 t における締めめ仕事量は式(6)で表すことができる。なお、試料の単位容積質量 m は、0.3 s 前の測定値を用いている。

$$E = m \cdot \frac{\alpha_{max}^2}{(2\pi)^2} \cdot f \cdot t \quad (6)$$

ここに、 E ：締めめ時間 t における仕事量 (J/l)、 t ：締めめ時間 (s)、 m ：試料の単位容積質量 (kg/l)、 α_{max} ：最大加速度 (m/s^2)、 f ：振動数 (s^{-1})

締めめ仕事量をこのように表せば、Fig.3.1 の下部に示すように振動数に関わらず異なる加速度ごとに締めめ曲線は1本の曲線で表すことができる。さらに、Fig.3.3 に示すように加速度 2G の場合を除いて、同じ締めめ曲線と見なすことができるのである。振動条件が異なっても加速度が限界値(約 2.5G)以上であれば、同じ配合のコンクリートに対して締めめ仕事量と充填率との関係は同じとなることをすでに報告⁷⁾している。振動締めめの限界加速度は、粒子が内部摩擦抵抗に抗して移動できるだけの力の作用が必要であることを示していると考えられる。

b) 締めめ仕事量と充填率との関係

締めめ性試験、VC 振動締めめ試験およびマーシャル突固め試験による締めめ仕事量と充填率との関係を Fig.3.4 に示す。

VC 振動締めめ試験による 3, 10 および 60 s における充填率は、締めめ性試験の締めめ曲線に良く近似している。VC 振動締めめにおける重錘の質量が大きいほど VC 値が小さくなるとの指摘もある¹²⁾が、充填率の観点では影響は小さいようである。

突固めによる締めめ曲線は、振動締めめに比較して仕事量に対する充填率が小さい。突固めでは、ハンマの衝撃力によって鉛直方向の粒子相互が衝突したり、大きな摩擦を生じながら強制的に位置を変化すると推察される。突固めにおけるエネルギーの一

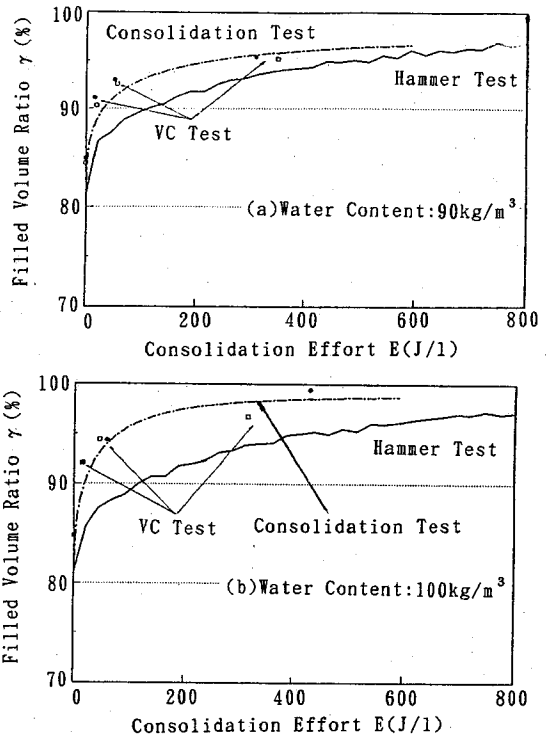


Fig.3.4 Relationship between Consolidating Effort and Filled Volume Ratio in Different Test Methods

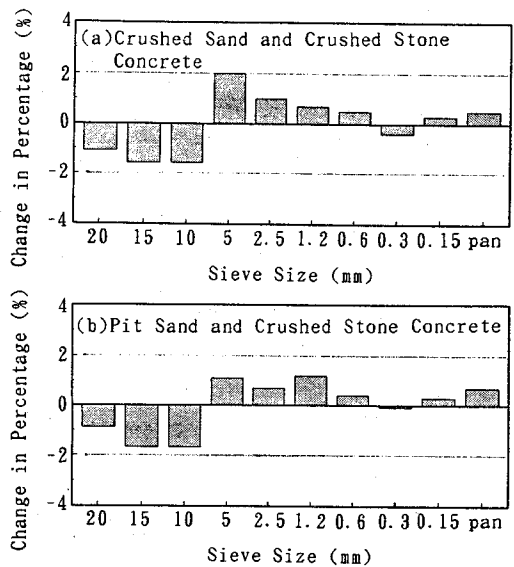


Fig.3.5 Change of Aggregates Grading after Hammer Test

部は衝撃音の発生などのほか、骨材粒子の衝撃破碎や摩擦抵抗に消費されている可能性が高い¹²⁾。

このような現象を確認するため、突固め作用による粒度の変化の有無を検討した。突固め試験前後の試料をそれぞれ容器に取り、1組の標準ふるい上で水洗いをして粒度分布を試験した。骨材の材料試験結果に基づく示方配合から推定される細粗骨材の合成粒度分布と、練混ぜただけの試験前の試料の粒度分布とは、粗粒率で0.05以内の差で同一と見なすことができる。砕砂・砕石を用いた配合の締固め性試験および砕砂・川砂利を用いた配合の突固め試験では、試験前後の骨材粒度の変化はほとんど認められなかった。しかし、Fig.3.5に示すように砕砂・砕石および陸砂・砕石を用いた配合は、ふるいの呼び寸法10mmに留まる粒群は減少し、5mmを通る粒群が増加していることが認められ、突固め作用によって砕石の破砕が顕著であることが確認された。この結果、細粗合成骨材の粗粒率は0.2程度低下した。砕砂も破砕されていることが予想されるが、試験の範囲では明確にすることはできない。川砂利は一般に石質が堅硬で形状的にも欠けにくい、砕石は角張り等が欠けやすいことも影響しているものと思われる。

超硬練りコンクリートの充填性状は、3.(2)a)にも述べるように骨材の粒度構成によって大きく変化するので、突固めによってコンクリート中の骨材粒度が変化することは、コンシステンシー試験方法として適当ではないと考えられる。

(2) 締固め性に対する配合の影響

a) 細骨材率

コンクリートの単位水量を 115 kg/m^3 の一定として細骨材率を約2% ($km = 0.1$) ごとに増加させた場合、Fig.3.6に示すように C_i は単調増加し、 C_e は減少する傾向が認められた。 C_i が增大する理由は、試料を容器に投入する際、細骨材量の増大によって粗骨材粒子を骨格とする粗大空隙が減少することによると考えられる。また、 C_e が減少する理由は、細骨材粒子間に存在する微細空隙は振動によって排除しにくい傾向があるものと考えられる。この結果、実用上締固めを終了することのできる締固め仕事量 E_{98} の変化には極小値が現れ、最適細骨材率を38.3%と判断することができる。同時に行った突固め試験およびVC振動締固め試験においても、Fig.3.7に示すように最適細骨材率が同じ値に得られている。

一般に、細骨材率を大きくした方が転圧仕上げ面の外観が良好で、また材料分離を抑制できるために、RCCPの施工にこれまで用いられた配合の中には、大きな細骨材率を採用したのも散見される。しか

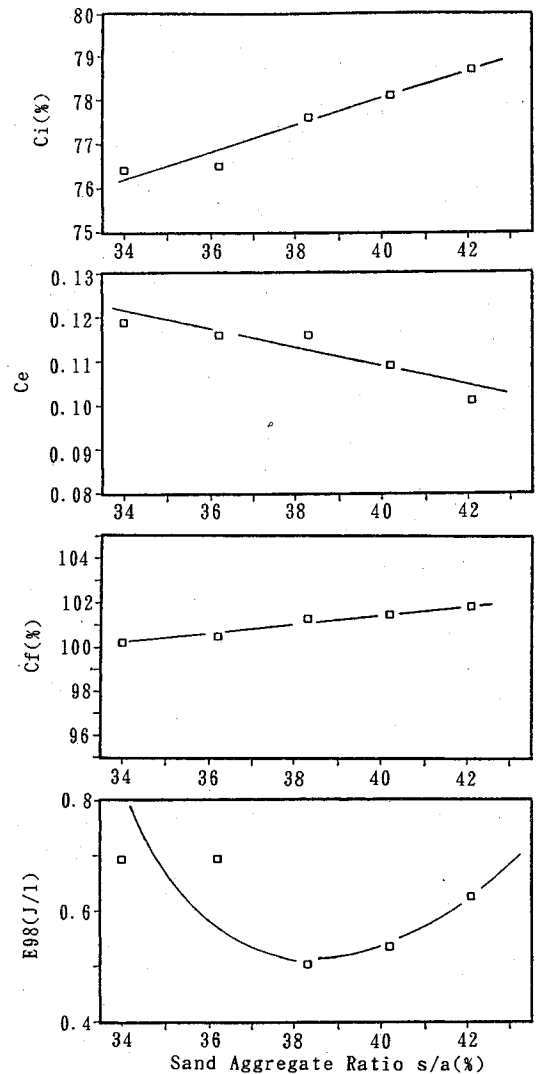


Fig.3.6 Effect of Sand/Aggregate Ratio on Consolidation

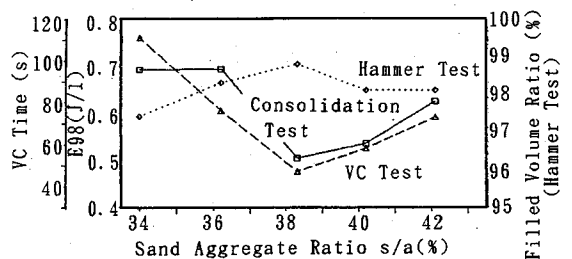


Fig.3.7 Optimum Sand/Aggregate Ratio in Different Tests

し、転圧後のコンクリートの充填率を考慮した場合、細骨材率を必要以上に大きくすると微細空隙が残存しやすくなることに注意が必要である。

b) 単位水量

最適細骨材率のもとで、単位水量を 100 ~ 200 kg/m^3 の範囲で 5 kg/m^3 ごとに変化させた締固め性試験結果を Fig.3.8 に示す。この結果は、単位水量を増加させても C_i の変化は小さいが、 C_e は直線的に増加の傾向を示した。 C_f は単位水量が過小である場合には 100% に満たないが、水量がある値以上であれば 100 ~ 102% を示す。充填率が 100% を超えることがあるのは、試料上面の上載板と容器の側壁との間にモルタルが浮上するためである。 C_f は無限の締固め仕事量を与えたときの推定充填率であるから、この値が少なくとも 98% に達しない単位水量の配合は、完全な締固めを行うことができないので用いるべきではない。また、 C_f が 100% に達する配合でも、完全な締固めを行うためには E98 以上のエネルギーを試料に与えなければならない。E98 は水量の増大によって双曲線的に減少するが、通常の転圧施工に供することのできる仕事量の範囲を実務的に別途検討する必要がある。

c) 水セメント比

最適細骨材率のもとで単位水量を 110 kg/m^3 として、水セメント比を 30, 35 および 40% に変化させて締固め性を試験した。Table 3.1 に示すように、水セメント比が大きいほど E98 が減少する傾向が認められた。このことは骨材粒子間の空間を満たすセメントペーストの粘性の低下、もしくは一定水量のもとにおける微量量の減少によって締固めしやすくなる傾向があることを示している。しかし、この影響は、単位水量の変化に比較すれば無視することができる程度のものである。

(3) 締固め性に対する細骨材の影響

a) 骨材特性の影響

1) 実積率および粗粒率

9 種類の普通細骨材の性質およびこれらを用いたコンクリートの締固め性試験結果を Table 3.2 に、締固め曲線を Fig.3.9 に示す。なお、Table 3.2 に示した締固め性の試験結果は 3 個の平均が示されている。締固め曲線から分かるように、使用材料の単位容積を同じとした配合では、使用細骨材によって締固め性状が著しく異なることが分かる。一般に陸砂が良好な締固め性状を示しており、砕砂の締固め性状が劣っている。最も良好な締固め性状を示している細骨材は陸砂 P-C であり、この細骨材は比較的実積率が大きく、粗粒率は試験した骨材の中で最も大きい値を示している。砕砂 C-C も他の砕砂と異なって良好な結果を示しており、実積率および粗粒率が陸砂 P-C とほとんど同じ値となっている。

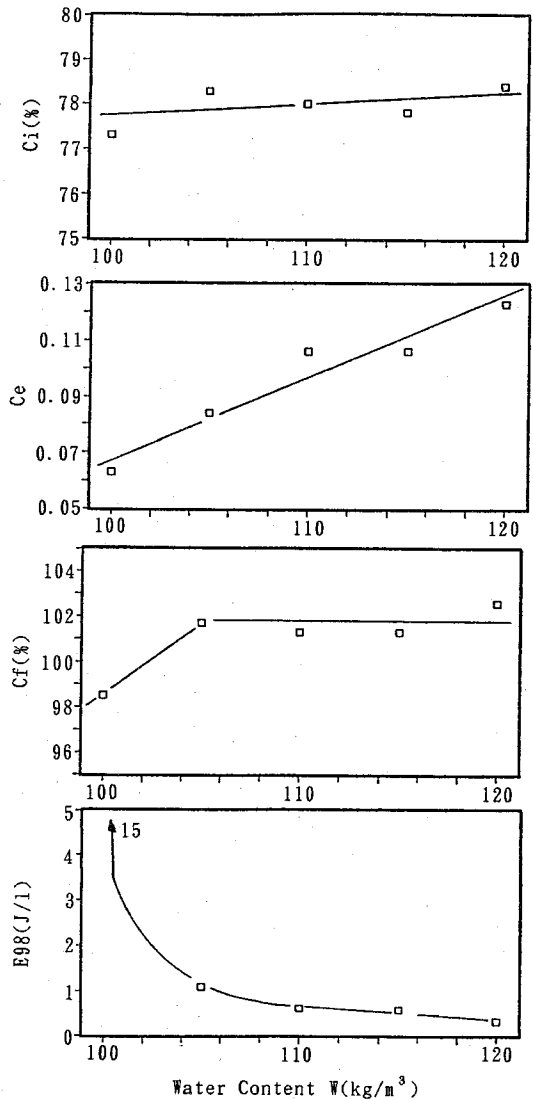


Fig.3.8 Effect of Water Content on Consolidation

Table 3.1 Effects of Water Cement Ratio on Consolidation

Condition of Mix Proportion		W=100, s/a=0.385		
Water Cement Ratio W/C		0.30	0.35	0.40
Initial Filled Volume	C_i (%)	77.2	77.3	78.8
Efficiency	C_e (J/l)	0.10	0.10	0.09
Ultimate Filled Volume	C_f (%)	100.5	101.0	102.3
Consolidation Effort	E98 (J/l)	1.13	0.81	0.80

山砂 M を用いたコンクリートは、最も締固め性状の劣る結果となっているが、これは他の骨材に比較して実積率が著しく小さく、また粗粒率も最も小さいことによると考えられる。

2) 粒子の形状係数

締固め性に対する骨材特性の影響は、全体的には

Table 3.2 Characters of Normal Sands and Results of Consolidation Test

Kind of Fine Aggregate	Pit Sand			Crushed Sand			Blended S.		Mount
	P-A	P-B	P-C	C-A	C-B	C-C	B-A	B-B	
Character of Fine Aggregates									
Fineness Mod.	2.21	2.27	2.99	2.85	2.51	2.99	2.53	2.76	1.66
Under 0.15mm S. %	15	7	3	10	14	6	10	5	5
Shape Factor	1.11	1.20	1.15	1.33	1.33	1.19	1.24	1.19	1.17
Solid Vol. R.	70.1	69.4	68.7	64.8	67.5	68.3	68.6	68.5	59.2
Mix Proportion									
Condition	W/C=35%, s/a=40.5%(K _m =1.60), W=100kg/m ³								
K _p	1.36	1.31	1.28	1.07	1.20	1.25	1.27	1.27	0.84
Results of Consolidation Test									
Initial F. V. C _i	80.8	79.2	81.0	77.2	76.9	78.6	78.0	78.3	78.9
Efficiency C _e	0.84	0.87	1.05	0.78	0.77	0.98	0.77	0.89	0.67
Ultimate F. V. C _f	95.0	98.0	99.4	89.4	91.2	98.4	90.8	95.4	86.9
Effort E ₉₈	-	1389	319	-	-	1379	-	-	-

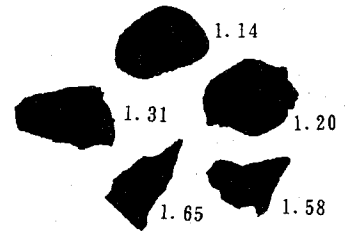


Fig.3.10 Example of Shape and Shape Factor

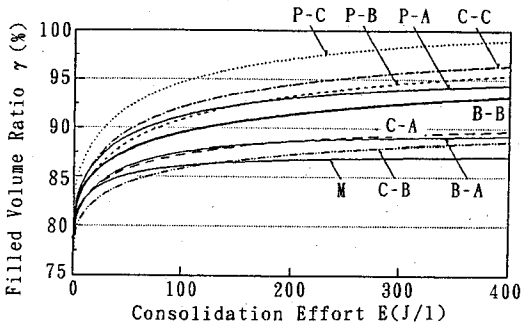


Fig.3.9 Consolidation Curves of Various Concretes with Different Normal Sands

実積率が大きく、粗粒率が大きいものほど良好といえるが、締固め性に対してどのような影響を与えているかが明確でない。そこで、締固め性試験によって得られる C_i C_e および C_f に対して粒度、粒子形状および実積率の影響を検討した。なお、締固め性状は細骨材の微粒分にも影響されると考えられるが、実験に用いた試料の場合、Table 3.2 に示すようにふるいの呼び寸法 0.15 mm を通るものの量は、山砂 M 以外は粗粒率に代表されている。したがって、粒度の影響は粗粒率によって、粒子形状は形状係数によって評価した。形状係数は円らしさから離れるほど 1 よりも大きな値を示す。粒子の形と形状係数の対比の例を Fig.3.10 に示す。

実積率は主として粒子形状の影響が大きいと考えられるが、山砂 M の例で分かるように粒度が細かい側に片寄っていると実積率が著しく小さくなる傾向が認められ、形状係数が 1 に近く相当に丸い粒子に近い陸砂 P-A でも粒度が小さいので実積率があまり増大していない。

一定配合条件のコンクリートの締固め性試験結果と 3 種類の粒子特性値との相関係数を Table 3.3 に示す。なお、山砂 M は他の骨材に比べて実積率が極端に小さいので、検討対象から除いた。相関係数が高いほど影響度が高いと考えれば、締固め性の各係数に対して粒子形状の影響が高く、負の相関すな

Table 3.3 Correlation Factor between Consolidation Indices and Sand Characters

Character of Sand Consolidation Test	Fineness Modulus	Shape Factor	Solid Vol. R.
Initial Filled Volume C _i (%)	-0.135	-0.917	0.695
Efficiency C _e (%/J/l)	0.581	-0.633	0.333
Ultimate Filled Volume C _f (%)	0.370	-0.753	0.616

わち粒子の不規則性が高くなるほど締固め性が劣ることを示している。特に、 C_i および C_f には粒子形状の影響が大きいといえる。また、この傾向は実積率とも矛盾しない結果となっている。 C_e には粒子形状の影響が大きく、また粗粒率にも影響されている。細かい粒子は微細空隙を取り込みやすく、締固め効率を低下させることになり、3. (2) a) で述べた細骨材率の影響とも整合性のある結果となっている。b) 粒子間隔の影響

前項の結果に示されるように、使用する骨材の特性に応じて締固め性が変化するので、良好な締固め性状を得ることのできる配合設計方法を明らかにする必要がある。

コンクリートのコンシステンシーの検討において、余剰ペースト膜厚による説明が合理的であるとする報告がこれまでに多数なされている^{13), 14)}。この場合、基本的に粒子の比表面積が必要となり、この決定方法が実用上の課題と思われる。2. (2) で示した配合設計方法は、細・粗骨材を一括した余剰ペースト膜厚を用いてはいないが、 k_m および k_p は粗骨材および細骨材のそれぞれに対して、余剰ペースト膜厚に相当する指標を与えている。すなわち、これらの値が 1 の状態は骨材粒子が相互に接している状態であり、余剰ペースト膜厚が 0 に相当する。

普通細骨材の種類を変化させたコンクリートは、使用材料の単位容積を一定とした配合で k_m が一定であるが、 k_p は使用する細骨材によって変化する。また、ペースト量が同じであるので、Table 3.2 に示すように細骨材の実積率が大きいものは k_p が大きな値となり、細骨材粒子間の距離が大きくなる。山砂 M は k_p が 1 以下となっており、細骨材のつくる空隙をペーストが満たすことができない。このよ

うな配合を空隙のない状態に締め固めることは物理的に不可能であり、試験結果の C_f は 86.9 % となっている。また、砕砂 C-A を用いた場合、 k_p はかろうじて 1 より大であり、細骨材相互の摩擦が大きいと推察され、 C_f の試験結果は 89.4% となっている。他の細骨材の場合は k_p が 1.20 ~ 1.35 の範囲で、粒子形状の影響が現れにくくなっている。既往の試験結果¹⁾なども考慮すると、良好な締固め性状を得るためには k_p を少なくとも 1.4 程度以上にすることが必要と考えられる。

c) 粒子間隔を考慮した配合の締固め性

銅スラグ細骨材は、一般に角張った粒子形状をしており、これを用いて粒子間隔の影響、すなわち k_p を配合設計で考慮することによる締固め性の向上を検討した。

銅スラグ細骨材の粒子特性、配合条件および締固め性試験結果を Table 3.4 および Fig.3.11 に示す。コンクリートの配合は、前項の普通細骨材に関する結果を考慮して k_p を 1.4 とした。銅スラグ細骨材の粒子特性は、事前粉碎処理によって砕砂よりも粒度が細かめであるが、実積率は砕砂と同等となっている。これらの試験結果は、銅スラグ C を用いた場合の C_f が 98% に達していないが、全体的に同等の締固め性状を示しており、使用する細骨材の粒子特性の影響が少ない結果となっている。

しかし、本実験のように単位水量および水セメント比を仮定し、 k_p を 1.4 とした配合計算をすると、実積率の大きな細骨材ほど km が大きくなり、モルタル量すなわち細骨材量が増大することになる。このために、銅スラグ細骨材 C を用いた場合の C_f は 98 % 未満となっていると考えられる。このようなことから、3. (2) a) で述べたように単位水量を適当に仮定し、 km (または s/a) を変化させることによって最適細骨材率を求めることが重要である。この場合、細骨材の形状などの理由によって良好な締固め性状が得られない場合には、 k_p が 1.4 程度になるよう水量およびセメント量の調整をすればよいと考えられる。

(4) 配合設計の手順

コンクリートの締固めの容易さの総合的基準を締固めを完了できるまでに与えるべきエネルギー、すなわち E_{98} が小さい (一定振動機を用いた場合、締固め時間が短い) こととするならば、これに影響する配合要因は主として細骨材率および単位水量であることが示された。超硬練りコンクリートの配合を試練りによって定める場合、まず細骨材率を適当な間隔で数点選び、 E_{98} が極小値を生ずる点として

Table 3.4 Characters of Copper Slags and Results of Consolidation Test

Copper Slag	A	B	C	D	E	F
Character of Fine Aggregates						
Fineness Modulus	2.44	2.33	2.41	2.21	2.59	2.57
Under 0.15mm Sieve (%)	7	9	10	10	9	8
Shape Factor	1.28	1.26	1.23	1.18	1.24	1.29
Solid Volume Ratio (%)	64.4	65.6	67.3	66.1	66.8	65.4
Mix Proportion						
Condition	W/C=35%, $k_p=1.40$, $W=110\text{kg/m}^3$					
km	1.38	1.46	1.60	1.50	1.56	1.45
s/a	34.2	36.2	38.9	36.9	38.1	35.8
Results of Consolidation Test						
Initial Fill. Vol. C_i (%)	83.1	82.5	82.4	84.2	83.0	82.7
Efficiency C_e (%/J/l)	1.14	1.11	1.10	1.15	1.12	1.11
Ultimate Fill. Vol. C_f (%)	98.3	98.1	97.8	98.2	98.4	98.6
Consolidation Effort E_{98}	338	473	-	212	170	211

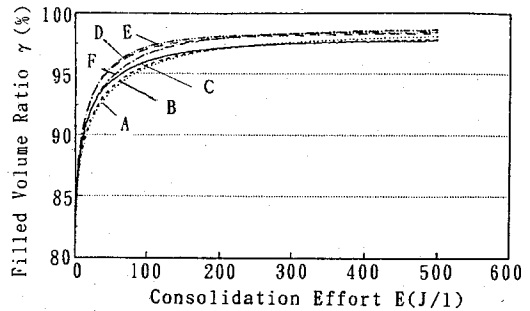


Fig.3.11 Consolidation Curves of Copper Slag Concretes

最適細骨材率を求め、次に最適細骨材率と所定の水セメント比または単位セメント量の下で、単位水量を漸増または漸減して所要のコンシステンシーまたは締固め性の得られる配合を定めるのがよい。

4. 結論

本研究は、超硬練りコンクリートの締固め性状を明らかにするため、まず異なる 3 種類の手法による締固め試験を行い、締固め仕事量に基づく締固め性試験方法の妥当性を検討した。そして、配合要因の変化にともなう締固め性の変化を明らかにし、用いる細骨材の粒子特性の影響についても検討を行った。この研究によって、次のことが明らかになった。

(1) 振動によるコンクリートの締固め仕事量は、振動の運動エネルギーに相当する量が 1 サイクル当たり 2 回作用するとして評価することができる。このように仕事量を定めれば、一定配合のコンクリートに対する締固めの振動条件が異なっても、限界加速度 (約 2.5 G) を超える振動に対しては締固め曲線は同じものとなる。

(2) 突固めによる締固め仕事量をハンマの位置エネルギーから求めた場合、振動による締固め仕事量と比較して充填率が小さい傾向がある。この原因は、

ハンマの落下によるエネルギーが粒子の破碎や内部摩擦抵抗に消費されていると推察される。

- (3) 細骨材率を増加すると、初期充填率が增大し、締固め効率は低下する傾向が認められる。この結果、実用上の締固めの終了と考えられる充填率 98% に達する締固め仕事を極小にする最適細骨材率が存在する。
- (4) 単位水量を 100 ~ 120 kg/m³ の範囲で変化させた場合、初期充填率はあまり変化しないが、締固め効率は比例的に増加し、実用上完全な締固め状態を得るための仕事量は双曲線的に減少する。配合の選定においては、達成可能充填率が 98% を超える配合を用いる必要がある。
- (5) 超硬練りコンクリートの締固めに対する水セメント比の影響は、水セメント比が大きいほど締固め性が向上する傾向があるが、単位水量の影響に比較すれば無視できるほどに小さい。
- (6) 単位水量および単位粗骨材量を一定とした場合、細骨材の実積率が大きいほど、また粗粒率が大きいほど締固め性の良好な配合が得られる。粗粒率が小さい細骨材を使用すると締固めの効率が低下する。
- (7) ペースト細骨材空隙比が 1.35 程度以下では、粒子の形状が充填率および締固めの効率に及ぼす影響が大きく、1.40 程度とすれば細骨材の形状の差が締固め性にあまり影響しなくなる。

謝辞：本論文の一部は、平成 5 年度の文部省科学研究費課題番号 05650441 によって行ったものである。

参考文献

- 1) 豊福, 吉岡：転圧コンクリート舗装の配合設計法に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 414/V-12, pp.59-68, Feb. 1990.
- 2) 村田, 川崎：高炉スラグ細骨材およびエントレインドエアによる超硬練りコンクリートの凍結融解抵抗性の

改善, 土木学会論文集, No. 396/V-9, pp.119-127, Aug. 1988.

- 3) 葛, 原, 國府：転圧コンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 12-1, pp.697-702, June 1990.
- 4) 葛, 熊坂, 國府：転圧コンクリートの空隙組織と耐凍害性に関する研究, 土木学会 第 46 回年次学術講演会講演概要集, 第 V 部, pp.414-415, Sept. 1991.
- 5) (財) 国土開発技術研究センター：RCD 工法技術指針(案), 1989.
- 6) (社) 日本道路協会：転圧コンクリート舗装 技術指針(案), 1992.
- 7) 國府, 近藤, 上野：RCCP 用コンクリートの締固め性試験方法に関する研究, セメントコンクリート論文集, No. 46, pp.964-969, 1992.
- 8) J Kolec : The External Vibration of Concrete, *Civil Eng. & Public Works Review*, Vol.54-633, pp.321-325, 1959.
- 9) 村田, 川崎, 関：振動締固めによるコンクリートの挙動, フレッシュコンクリートの物性とその施工への適用に関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp.107-112, 1986. 3.
- 10) 中原, 横田, 平田：超かた練りコンクリートの配合の考え方とコンシステンシー, セメント・コンクリート, No. 384, pp.12-18, Feb. 1979.
- 11) 白鳥, 國府, 久恒：画像解析による銅スラグ細骨材の形状判定について, 土木学会第 48 回年次学術講演会講演概要集, 第 V 部, pp.484-485, Sept. 1993.
- 12) Kenneth D Hansen, William G Reinhardt : *Roller Compacted Concrete Dams*, p.29-38, McGraw-Hill, Inc. 1991.
- 13) 松下, 田中, 近田：砕砂コンクリートの細骨材率に関する一考察, セメント技術年報, No. 42, pp.88-91, 1988.
- 14) 岩崎訓明：コンクリート配合の原点, セメント・コンクリート, No. 564, pp.20-27, Feb. 1994.

(1995.5.9 受付)

MIX DESIGN OF EXTREMELY DRY CONCRETE EVALUATED BY CONSOLIDATION EFFORT

Katsuro KOKUBU and Atsushi UENO

This paper reports the compactibility and mix design method of extremely dry concrete. The consolidation curves of extremely dry concretes are tested, and consolidation function, which is the relationship between the solid volume ratio of concrete and the consolidation effort, is discussed. The consolidation function of a certain concrete is dependent on consolidation effort, if the acceleration of vibration is greater than the critical magnitude of about 2.5G. The compactive characters are evaluated by the function and four indices derived from it. The effects of mix proportion and the characters of fine aggregate are discussed, and the design method of the concrete with high compactibility is proposed.