

硬練りコンクリートについて

—主として不連続粒度骨材を用いた場合—

荒 木 謙 一

1. まえがき

硬練りコンクリートはコンクリート舗装、基礎、ダムプレストレストコンクリートの一部等に広く用いられるもので、スランプは硬練りで 0~2.5 cm, 中硬練りで 1.5~6.5 cm くらいである。一般の鉄筋コンクリートには硬すぎて不適当な場合が多い。

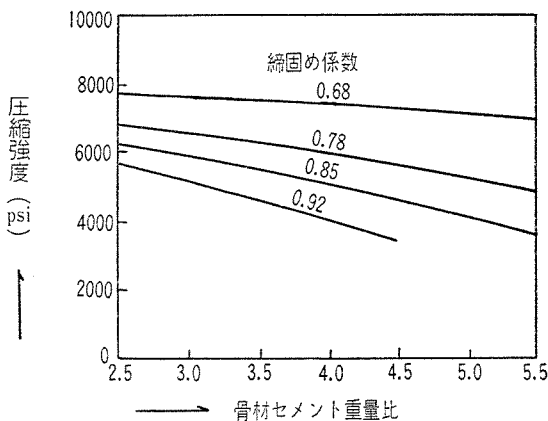
近時振動締固め技術の発達にともない、コンクリートの水セメント比を小にし、比較的硬練りを用いて、高強度をえようとする傾向がいちじるしくなってきた。このために、骨材の粒度としては連続粒度よりも不連続粒度を用いるほうが有利な場合がある。以下これらのことについて述べる。

2. 硬練りコンクリートの特性

その利点とするところをあげると

- (1) 単位水量が少ないので、単位セメント量が一定ならば、強度は軟練りより一般に大である。
- (2) 水セメント比が一定ならば、セメントを節約することができる。
- (3) 軟練りでは貧配合になるほど強度低下がいちじるしいが、ごく硬練りでは、貧配合になっても富配合との強度差がほとんどない(図-1¹⁾参照)。

図-1 骨材セメント比と圧縮強度



- (4) 単位水量やセメント量が少ないので、硬化収縮が少なく、従ってヒビワレの生ずる危険が少ない。またブリージングが少ない。

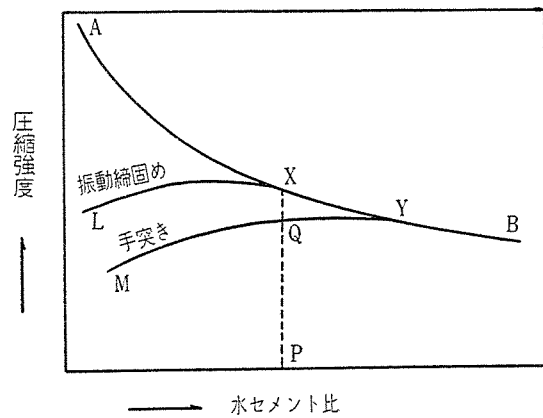
一方硬練りはウォーカーピッチャーが小さいのでつぎのような不利な点がある。

- (1) 締固めに手数と時間を要する。

- (2) 取扱いならびに運搬が、中練りコンクリートにくらべ、多少不便であり、コンクリートポンプや斜めシュート等は使用できない。

- (3) 締固めが不十分であると、強度、耐久性、水密性等は期待できず、なかでも水密性の低下がいちじるしい。

図-2 水セメント比と圧縮強度



元来コンクリートの強度は、他の条件が同一ならば、主として水セメント比によって支配され、その関係は図-2の曲線 AXB のようになるはずである。ただしこれはコンクリートの完全締固めが可能な場合であって、実際は w/c の小さくなるにつれ、締固めが困難となりたとえば振動機を用いた場合は BXL のように、手突きの場合は BYM のようになる。すなわち同一 w/c (P点) でも、手突きでは PQ, 振動締固めでは PX のように異なる強度となる。また図からわかるように、極端に w/c を小さくすると、かえって強度は低下するものである。その限界は締固め方法や程度によって異なる。締固めが不十分であると、潜入した空気が十分取除かれず、気隙を生じて強度低下の原因となる。Glanville²⁾によれば気隙の量が 5%, 10%, あるいは 25% あれば、強度は、それぞれ約 30%, 60%, 90% 低下する。従って硬練りコンクリートでは締固めがとくに重要である。

3. 硬練りコンクリートにおよぼす骨材の影響

硬練りコンクリートはコンシステンシーは小さいが、なるべくウォーカーブルで締固めやすいように工夫すれば強度、耐久性、水密性などが向上する。ウォーカーピッチャーに影響する骨材関係のおもな事項をあげるとつぎの三

つとなる。

- (1) 骨材の最大寸法
- (2) 骨材の粒度
- (3) 骨材の形状および表面の粗滑程度

これらは骨材関係以外の諸事項とも互いに関連しあつて影響するが、硬練りの場合には、骨材は軟練りの場合より、いちじるしい影響力をもつものである。

(1) 骨材の最大寸法

最大寸法を大きくすると、単位水量が一般に少なくできるから、適当なウォーカビリチーのえられる範囲内であるべく大きくとるとよい。ただし、大きくなるに従つてコンクリートは荒々しくなり、過度になると分離の傾向を生じる。したがつて、構造物の種類、断面寸法、施工法などに適したものを選ばなければならない。

(2) 骨材の形状および表面の粗滑程度

粒形が丸味のあるほど、ウォーカブルなコンクリートがえやすく、また表面の滑らかなほど互いの摩擦抵抗が少なくウォーカブルになる。形状不良のものは空隙率も大きくなり好ましくない。

硬練りコンクリートにおいては、強硬な砕石は表面が粗でセメントペーストの付着強度が大きく、かつ石のかみ合わせがよいので、天然砂利にくらべ曲げ強度や圧縮強度のほか、衝撃強度や耐摩耗性の大きなコンクリートをつくることのできる。従つて砕石は舗装用などに最適であるが、振動機を用いるなどして、十分な締固めをしなければ効果はあがらない。なお w/c が 40% 以下の場合には、同一 w/c に対し天然砂利より強度が大きい。その差は w/c が小さくなるほど大きくなり、ウォーカビリチーも天然砂利よりよくなるといわれる³⁾。

(3) 骨材の粒度

骨材の大小混合の割合であつて、コンクリートを経済的につくるための骨材のもつべきもっとも重要な性質である。ある粒大がとくに多いもの(集中粒度)は一般によくない。不良粒度はコンクリートに分離の傾向を与えるおそれがある。

良好な粒度の骨材を用いれば、同一単位水量に対してよりウォーカブルなコンクリートがえられる。すなわち粒度の良否は必要セメントペースト量(これは所要のウォーカビリチーをえるように骨材の表面をおおい、かつ骨材の間隙を満たさなければならぬ)、ひいては所要単位水量の大小に影響する。一般に骨材の空隙率が小さく、かつ、その比表面積も小さいような粒度は良好であつて、単位セメント量とウォーカビリチーとが一定の場合には、セメントペースト量を少なくし(単位水量を減じて)、水セメント比を下げるので、より強いコンクリートを経済的に(セメント量を増さず

に) つくることのできる。このような骨材は適切な不連続粒度(一種以上の粒大が欠けているもの)を用いることによりつくりやすいものである。また適切な不連続粒度は粒子干渉(Particle Interference)を生ぜず、コンクリートの流動性(mobility)をよくする。

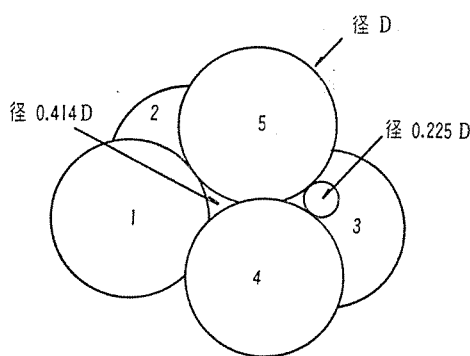
(4) 最小空隙をえる粒度と不連続粒度

これに関する Worthington⁴⁾の結論はつぎのようなものである。

最小空隙を与える粒度は最大粒が全容積をみたし、つぎに最大粒の数分の一の次級粒大が大粒の空隙をちょうどみたす量だけあつて、さらにその数分の一の粒大がそれらの空隙をみたす量だけあるというように、各粒大とそれらの量が(最小粒大まで)配列されているものである。

このような粒度は当然不連続粒度となる。連続粒度では不要の中間粒大が粒子干渉を生じて空隙を大きくするのである。Worthingtonは単に粒状体の詰め込みの問題として上の結論をえたのであるが、コンクリート用骨材を対象として行なつた著者の実験によれば、不連続粒度になることは同じであるが、Worthingtonの粒度のままでは不連続区間(不連続部の両端の粒大の比)が大きすぎ、コンクリートとして荒々しすぎるので、もう少し不連続区間をせまくしたほうがよいようである。また、不連続型の砂利を用いると、単位水量や砂率を下げることができ、あたかも最大寸法を上げたと同様の結果をえた。なお Bate と Stewart⁵⁾の配合設計に関する骨材粒度の理論を紹介すると、骨材が図-3のように四種の球よりなり、斜方配列をするものと仮定した。この四種の球は

図-3 斜方配列骨材



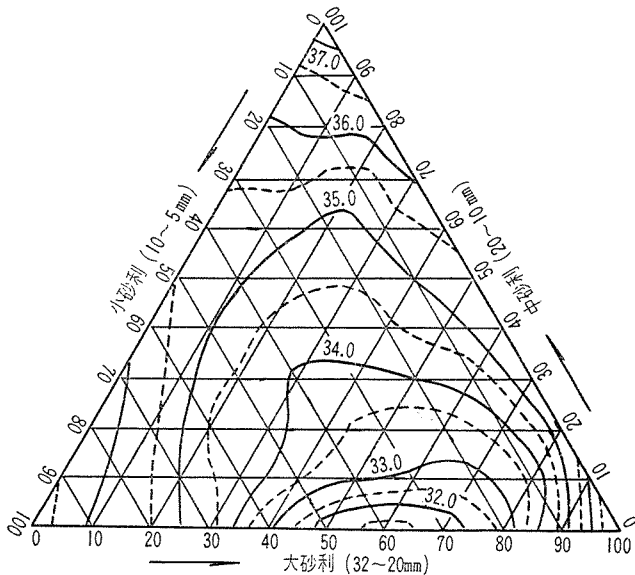
- 粗骨材 { 大球 (major sphere)D
- { 大閉塞球 (major occupational sph.) 0.414 D
- 細骨材 { 小閉塞球 (minor occupational sph.) 0.225 D
- { 出入球 (admittance sph.)0.155 D

よりなり、この配列が完成すると、大小閉塞球は動きがとれなくなり、出入球だけが大球の間を出入できる。そしてこの球は、コンクリートの締固め作業中に適当に出

入して、コンクリートに流動性を与える。従って中間の大小の閉塞球は不要であり、これを出入球でおきかえるとよい。すなわち粒度としては $D, D/8=0.125 D, D/64 \dots$, といった不連続型が締固め抵抗も少なく、ウォーカブルになりやすいことを示した。しかし、骨材の詰まり方が斜方配列の球の詰まり方と同一と考えたところに、現実とかけ離れた無理がある。

つぎに粗骨材について行なった著者の実験を述べると砂利(比重 2.60)を大(32~20 mm), 中(20~10 mm), 小(10~5 mm)の三種にふるい分け, それらの空隙率を測定したところ, それぞれ 37.0%, 37.3%, 36.8% となった。これらを種々の(重量)割合で混合し, 空隙率を測定した結果を三角座標をもって示すと図-4 のようになる。これをみると, 中砂利の欠けた(不連続の)大砂利約 60%, 小砂利約 40% のものが最小空隙となっていて, 中砂利が加わるにつれ空隙が大きくなる。

図-4 粗骨材の空隙率(%)



4. 不連続粒度骨材を用いたコンクリート

不連続粒度骨材を硬練りコンクリートに用いると, 上述のような特性を発揮しやすく有利である。すなわち単位水量が少なくても, 比較的ウォーカブルなコンクリートがえやすい。ウォーカビリティを論ずるにあたり, その測定法を考えなければならぬが, そのおもなものをあげ長短を述べるとつぎのようになる。

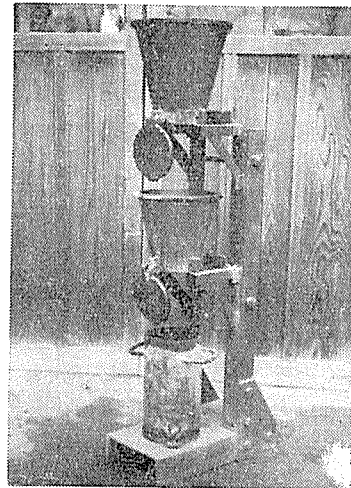
(1) スランプ試験

装置も測定操作も簡単で, 現場向きである。しかしごく硬練りに対しては鈍感であり, 他の試験法におとるけれどもポピュラーな方法である。

(2) 締固め係数試験(英)^{2), 5)}

振動締固めを行なうようなコンクリートに最適で, 正確かつ敏感である(写真-1)。

写真-1 締固め係数試験機



(3) Vee-Bee 試験(スウェーデン)⁶⁾

(2) と同様な長所があり, また締固めやすさをも示すといわれるが, 著者の経験では, 硬練りコンクリートの場合, その上面が円板全部に接する最後の瞬間をとらえにくいのが欠点である(写真-2)。

写真-2 Vee-Bee 試験機

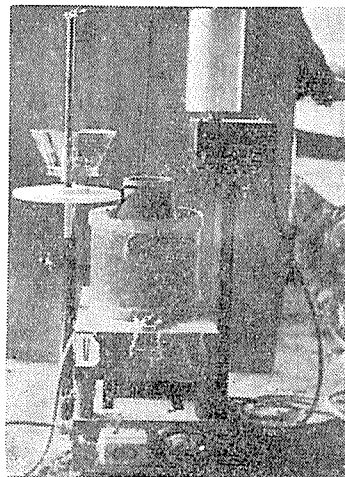
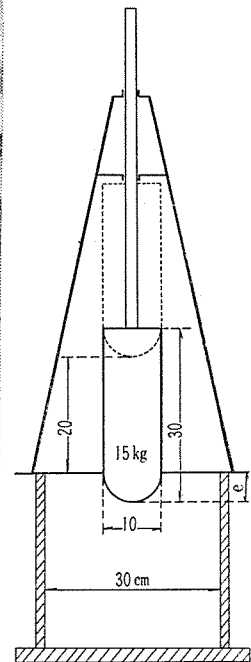


図-5 貫入試験機



(4) 貫入試験(ドイツ)⁷⁾

中練り以下のコンクリートに用いられるが, オモリの貫入する付近の局部状況に貫入量が影響される場合があり, 試験法としては(2)におとると考えられる(図-5)。

以上のうち著者は(1), (2)および(3)の方法を用いてつぎの実験を行なった。ただし(1)を用いた理由は, 学問的には不適當であるが, 現場試験との関連性をもたせるためである。

a) 細粗両骨材の粒度を変えた場合の実験 混合骨材の粗粒率がほぼ同一で、粒度の異なる約 30 余種類の骨材を用い、同一配合(表-1)の硬練りコンクリートをつくり、ウォーカビリチーと材令 14 日の圧縮強度とを試験し、骨材の不連続粒度の影響を調べた。

砂利は粗粒率が 7.0~7.2, 表-2 の 3 種(連続, 不連続, 集中型)で、これに粗粒率 2.91 の連続あるいは不連続(不連続部が 1~3 個)の砂 27 種類(その一部を 図-6 に示す)を組合わせた。セメントはアサノ普通

ポルトランドセメントを用いた。実験結果のおもなものを表-3 に示す。

この実験結果(表から省略したのもふくめて)を要約すると次のようである。

① ウォーカビリチーについて: スランプ, 締固め係数および Vee-Bee の三者が完全に同一傾向とまではならなかったが, 同一の砂を用いても, 組合わせた砂利の粒度によってウォーカビリチーが大いに異なる。すなわち, 適切な不連続砂利を用いたものはウォーカブルで,

かつ締固めやすい。ただしいくらか荒々しくなっているものもある。集中型のもはウォーカビリチーも強度も小さい。

② 混合骨材の空隙率と比表面積との関係をコンシステンシーにより分類し, 図-7 に示したが一方が増すと他方が減る傾向があり, 不連続型のもはこの曲線の左下側(空隙と比表面積が小さい)に多い。

③ ウォーカビリチーと強度との関係は, 本実験では配合と締固め量が一定なので, ウォーカブルなものはよく締まり, 強度が一般に大きい。

④ 良好な粒度型について検討すると, 砂の粗粒率が等しい場合には, 砂利の空隙率が小さいことが重要である。混合骨材の粒度については, 不連続部の個数が 1~2 個(2 個の場合はそれらの間に 1~3 区間の連続部のある)で, 空隙率と比表面積が小さいものである。ここにいう 3 区間とは最大, 最小粒大の比が $2^3=8$ の粒大範囲を意味する。しかし連続粒度でも特選されたもの(たと

表-1 配 合

最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	w/c (%)	s/a (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)
40	0.5~1.5	45	35.8	135	300	722	1285

表-2 砂 利

粒度型	記号	混合割合 (%)			F.M.	単位容積重 (kg/m ³)	空隙率 (%)	比表面積 (cm ² /g)
		大 (40~20)	中 (20~10)	小 (10~5)				
連続型	A	30	40	30	7.00	1720	33.9	2.56
不連続型	B	60	0	40	7.20	1778	31.6	2.46
集中(単一)型	C	0	100	0	7.00	1632	37.2	2.22

図-6 砂 の 粒 度 曲 線

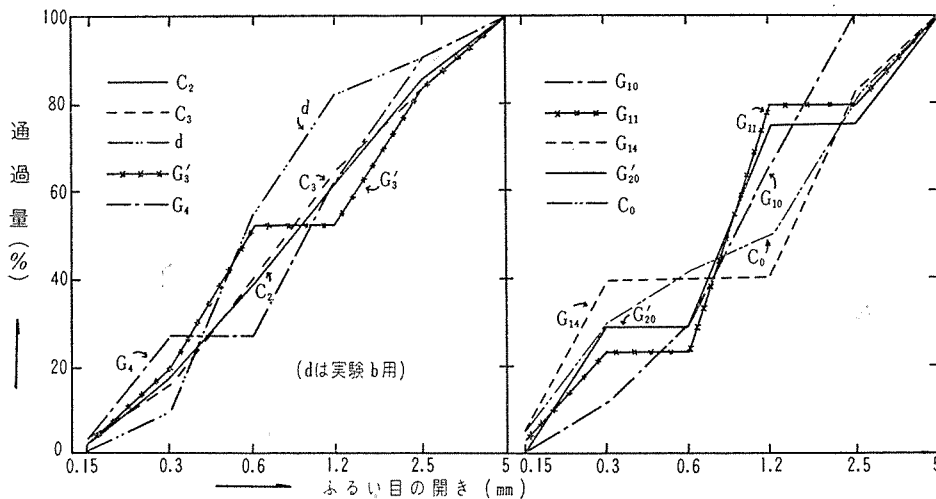
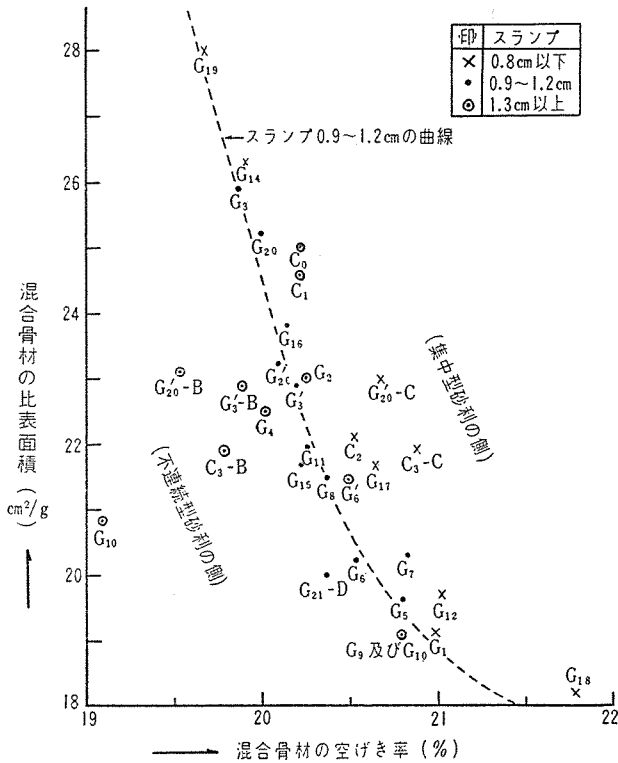


表-3 配合一定の実験結果

記号*	混 合 骨 材			コ ン ク リ ー ト				
	単位容積重 (kg/m ³)	空隙率 (%)	比表面積 (cm ² /g)	スランプ (cm)	締固め係数	Vee-Bee (sec)	ペースト膜厚 (1/1000mm)	圧縮強度 (14日) (kg/cm ²)
C ₀ -A	2 079	20.2	25.0	1.7	0.861	19.7	6.9	367
C ₂ -A	2 071	20.5	22.1	0.7	0.844	30.1	7.0	367
C ₃ -B	2 090	19.8	21.9	1.9	0.875	16.1	9.0	356
C ₃ -C	2 062	20.9	21.9	0.6	0.840	28.8	6.1	360
G ₃ '-A	2 080	20.2	22.9	1.2	0.857	20.0	7.6	362
G ₃ '-B	2 088	19.9	22.9	1.3	0.862	21.0	8.4	377
G ₄ -A	2 084	20.0	22.5	1.6	0.850	22.0	8.2	369
G ₁₀ '-A	2 064	20.8	19.1	1.6	0.860	23.0	7.2	364
G ₁₁ '-A	2 078	20.3	21.9	0.9	0.850	26.3	7.8	351
G ₁₄ '-A	2 087	19.9	26.3	0.8	0.829	32.8	7.3	356
G ₂₀ '-A	2 082	20.1	23.2	1.0	0.854	26.3	7.8	365
G ₂₀ '-B	2 098	19.5	23.1	1.8	0.864	19.5	9.4	356
G ₂₀ '-C	2 067	20.7	23.0	0.8	0.831	28.2	6.3	348

* ハイフンの左が砂 (C: 連続, G: 不連続), 右が砂利 (A: 連続, B: 不連続, C: 集中) の記号

図-7 混合骨材の空隙率と比表面積



例えばC₀-A)は不連続型におとらない。

なお他の実験において、近似不連続粒度(不連続部に相当する区間の粒大がごく少量あるもの)を用いてみたところ、不連続粒度よりも少し骨材の空隙率は大きくなるが、分離の傾向がより少なくなり良好であった。

b) 富配合で w/c がとくに小さい場合の実験 最大寸法が約 25 mm の連続型の砂利(N)と不連続型(17~10 mm が欠)の砂利(G)とを用いた場合を比較した(表-4 参照)。セメントはアサノ普通ポルトランドセメントを用いた。

表-4 砂 利

記 号	ふるい開き目 (mm) 間の残量 (%)					粗粒率	空隙率 (%)
	30	25	20	15	10		
N	4	16	16	34	30	6.90	35.5
G	11	25	24	0	40	6.95	34.3

配合は単位セメント量とウォーカビリチーとを一定(表-5)とし、砂は両者とも図-6の d(F.M.=2.62, 空隙率=36.4%)を用い、材令7日で圧縮強度を試験した。その結果を表-6に示す。

表-5

記号	粒度型	最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	w/c (%)	s/a (%)	W (kg/m³)	C (kg/m³)	S (kg/m³)	G (kg/m³)
N	連続	25	4~5	38.8	28.0	155	400	527	1345
G	不連続	(25)	4~5	38.0	24.0	152	400	454	1426

不連続型のほうが少し単位水量や砂率を少なくすることができたが、強度はたいして大きくならず、この実験

表-6 実験結果

記号	ウォーカビリチー		7日圧縮強度 (kg/cm²)				
	スランブ (cm)	締固め係数	1	2	3	4	平均
N	4.8	0.889	285	279	299	282	286
G	4.4	0.892	301	295	283	286	291

では有意差は認められなかった。この原因としては不連続区間の大きさ(巾)がやや小さいため、空隙率が連続型より十分小さくならなかったことにもよるが、富配合で w/c がとくに小さい場合は粒度の影響がやや少なくなるものと考えられる。なおついでにこれらの連続砂利と砂とを用い、アサノ早強セメントおよびポゾリス No. 8 を用いた PC 用(名田橋, Dywidag 工法)コンクリート配合と強度との一例を表-7に示した。実験室的にはこの配合より砂率を2~3%減らしても良好なコンクリートができた。

表-7 PC 用コンクリートの一例

最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	W (kg/m³)	C (kg/m³)	w/c (%)	s/a (%)	S (kg/m³)	G (kg/m³)	ポゾリス No.8 (g/m³)
25	3~5	2.5~3	135	370	36.5	33.5	629	1239	925

圧縮強度 (kg/cm²)

1.5日	7日	28日
241	415	502

c) 振動締固めと不連続粒度 振動締固めはコンクリートの各粒子を動的状態におき、粒子間の摩擦を減らし、コンクリートに粘性流体の動的性質を与えることであって、硬練り不連続粒度コンクリートにはぜひ必要である。その機構はつぎの三段階からなる。

① 初期沈下: 型ワケ内に入れたすぐのコンクリートは大粒子のアーチアクション、摩擦、ペーストの粘着力などにより、支えられた状態にあり、その一時的釣合が振動により破れ、各粒子間隔が縮まり全体としては、コンクリートの上面がさがり、粘性流体の特性をもつようになる。骨材の形状良好なものあるいは振動数が低い(3000 rpm)場合は、この段階が短い。

② 気隙の除去: モルタルに包まれた粗骨材が再配列し、気泡が上方へ追出される。この段階の終りには、気泡の噴出が止み、表面が光ようになる。

③ 緊密化: 骨材がよくかみ合わさり、コンクリートは緊密なものとなる。この場合、配合が不適切であれば砂利あるいはモルタルが上面に浮き出てくる。この段階が永すぎると、材料の分離を生じる。

以上の各段階に要する時間は配合の特性(主としてウォーカビリチー)と振動方式によって長短がある。

つぎに振動の伝播について二、三の傾向を述べる。

① 硬練りになるほど、振動機付近は強く振動されるが、その伝播はきわめて小範囲にとどまる(図-8⁸⁾ 参

照)。ことに荒々しいコンクリートでは振動エネルギーの吸収も伝播も悪くなる。

② 砂率の小さいほうが振動の吸収率や伝播性がよい。ただし、砂は 0.15~0.3 mm の適量をふくむものが水分の分離を防ぎよい。

③ 砕石は砂利より振動の伝播性が悪い。

④ 振動機の近くから逐次組織が緊密化し、伝導率がよくなっていくから、同一地点においても時間とともに振動の強さが増大する。貧配合ほどこの傾向がいちじるしい。なお硬練りコンクリートに対しては、内部振動機の間隔は約 50 cm 以下とするのがよい。振動数は通常 6000 rpm 以上で、10000 rpm 以上のももある。3000 rpm くらいの低振動数の場合は振巾が大きくないと効果が少ない。

打ち込み後 1~2 時間あるいは数時間 (w/c, 配合, 気温などで異なる) 後に再振動を与えることは、ヒビワレの防止, 水密性や強度の増大, 新旧コンクリートの密着などのために有効である。

Plowman⁹⁾ がテーブル振動機を用いて、不連続粒度と連続粒とのコンクリートを比較した例を示すと、完全締固めまでに要した吸収エネルギーは 図-9 のようになりその平均電力は 表-8 のようになり、不連続粒度のほうが有利となった。

また Williams¹⁰⁾ は一または二種の単一粒度からなる粗骨材を用いた不連続粒度コンクリートの振動締固めについて研究し、細粗混合骨材が粒子干渉をしなければ連続

図-8 w/c と振動伝播の関係

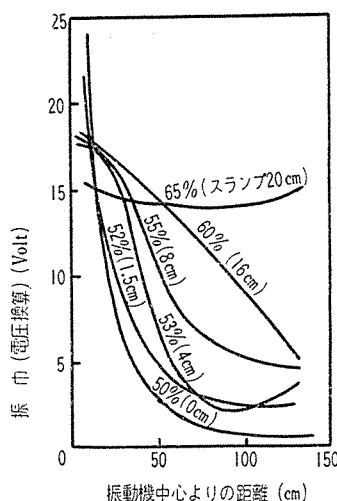


図-9 振動吸収エネルギー

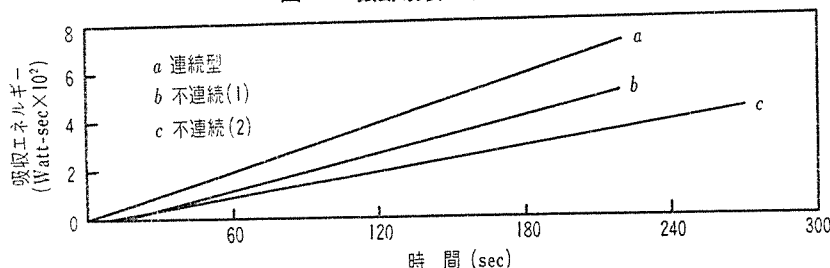


表-8

記号	粒度型	コンクリート 11b 当りの平均電力 (W)
a	連続型	0.65
b	不連続 (1 区間)	0.47
c	不連続 (2 区間)	0.34

粒度よりもウォークアブルで締固めやすいことを示した。粒子干渉を生じない条件としては、小粒子 (細骨材) の平均投写径 d_p が大粒子 (粗骨材) の平均空隙径 d_v より小さければよいとした。それらの径は

$$d_p = 1.38 \bar{d}, \quad d_v = \frac{2.53 E}{S_0(1-E)}$$

ここに \bar{d} : 関係ふるい目の平均値, E : 大粒子の間隙率, S_0 : 大粒子の単位絶対容積当りの比表面積である。たとえば 20~10 mm の粗骨材に対して、細骨材が 2.5 mm 以下ならば、実用上干渉は生じない。

5. むすび

以上不連続粒度骨材を主眼とした硬練りコンクリートについて述べたが、これらの特性を熟知して、骨材の選択, 配合設計, 施工法, 等を適切にすれば、その長所を十分発揮できるものである。なお不連続粒度は良好な連続粒度の骨材が容易にえられない地方 (状況) において用いるものであることに注意しなければならない。

最近のいちじるしいコンクリートの需要増大により、将来ところによっては、示方書に示された粒度範囲内の骨材の入手が困難となるおそれがあるので、その粒度範囲外の骨材を不連続粒度として用いることを研究すれば骨材資源の拡大に貢献することができると考えられる。

参考文献

- 1) H.C. Erntroy and B.W. Shacklock: Design of high-strength Concrete mixes, Mix Design and Quality Control of Concrete (Symposium) 1954, p 55.
- 2) W.H. Glanville: The Grading of Aggregates and Workability of Concrete, Road Res. Tech. Paper No.5 1947.
- 3) P.M. Worthington: An experiment on the theory of voids in granular materials, Mag. of Concrete Res., Apr. 1953 p 121.
- 4) E.E.H. Bate and D.A. Stewart, A Survey of Modern Concrete Technique, Proc. Inst. of Civil Engr. Part III, Dec 1955. p 589.
- 5) 岡田 清: 英国におけるコンクリート標準試験方法, セメントコンクリート, 昭和 31 年 6 月 p 29.
- 6) O. Beijer: Vee-Bee Scale, an International Standard for Consistency of Concrete, Jrn. ACI Sept. 1954, News Letters p 7.
- 7) Beton-Kalender, 1958, I. Teil S. 664 (DIN 1048)
- 8) 内山 実: コンクリート内部振動機使用時に於ける波動の波及状態に就て, 鉄道省業務研究資料, 第 26 巻, 第 5 号昭和 13 年
- 9) J.M. Plowman: The workability of Vibrated Concrete, Mag. of Concrete Res. Mar. 1954 p 127
- 10) T.E.H. Williams: Gap-graded Aggregates in Vibrated Concrete, Engineering, Jun. 1955 p 693

(筆者: 徳島大学教授)