論文 コンクリートの振動締固め時の挙動を考慮した配合設計手法に関す る研究

取違 剛^{*1}・松下 博通^{*2}・三宅 淳一^{*3}・Le Quang Nhut^{*4}

要旨:一般に,コンクリートの配合は静的な詰め込み状態によって決定されるが,実施工で は振動締固めを行うことから,動的な状態を考慮した配合設計を行うことも必要とされる。 本研究では,細骨材の動きに着目してモルタル加振時の液相限界粒径を判定する試験を行っ た。その結果,振動エネルギーを与えたときに0.6mm~1.2mmを境界とし,それより小さい 細骨材は液相として挙動していることが明らかとなった。そこでさらに VB 試験を行うとと もに,0.6mm 以下の細骨材までを液相と見立てることにより,動的な状態を考慮したコンク リートの配合設計への余剰ペースト理論の適用性について検討を行った。

キーワード:加振時液相限界粒径,余剰ペースト理論, VB 試験,最適細骨材率

1. はじめに

これまで,ダムコンクリートや舗装コンクリ ートのように振動締固め性状を重んじるコンク リートにあっても,スランプ試験に代表される 静的な詰め込み状態を想定した配合設計手法が 基本とされている。しかし,コンクリートは振 動エネルギーを与えられることによって静的な 状態とは異なる挙動を示す。既往の研究¹⁾によ っても,VB沈下度最小となる細骨材率はスラン プ最大となる細骨材率よりも大きくなり,両者 は必ずしも一致しないことが示されている。

一方, C.T.Kennedy²⁾が提唱した余剰ペースト 理論の配合設計への適用の可能性については, 松下らによる締固め係数試験から得られる最適 細骨材率と最大余剰ペースト膜厚を与える細骨 材率の関係に関する研究³⁾等があるが,いずれ も実験的に得られた結果に着目したものであり, 振動締固め時のコンクリートの配合設計手法と して余剰ペースト理論の適用を試みた研究は見 られない。

以上のことから本研究では,振動締固めを考



図 - 1 余剰ペースト理論の概念図

慮したコンクリートの配合設計手法の確立を目 的とし,その第一歩として余剰ペースト理論に 着目して,その適用性に関する検討を行った。

 振動締固めによるコンクリートの性質の変 化と余剰ペースト理論の適用性

余剰ペースト理論とは図 - 1 に示すように,コ ンクリートをセメントペースト(液相)と骨材 (固相)の二相材料とみなし,充填状態の骨材 間空隙がペースト(充填ペースト)で充たされ, さらに余剰のペーストが存在することで骨材が

*1	九州大学大学院	工学府建設システム工学専攻 (正会員)
*2	九州大学大学院	工学研究院建設デザイン部門教授 工博 (正会員)
*3	電源開発(株)	技術開発センター茅ヶ崎研究所所長 工修 (正会員)
*4	九州大学大学院	工学府建設システム工学専攻

分散されて,コンクリートに流動性が付与され るというものである。

コンクリートの静的な状態における液相はセ メント等の粉体と水で構成されていると考えら れ,液相を構成する粉体として挙動する最大粒 径(以下,液相限界粒径という)は90µm 程度で ある⁴⁾といわれている。よって,微細な粉体以 外の細骨材および粗骨材は全て固相であるとい うのが一般的な概念となっている。

しかし振動締固め時には,振動エネルギーを 与えられた骨材が挙動することによって骨材間 空隙内に過剰間隙水圧が発生し,液状化が起こ る。小粒径の細骨材はセメントペーストととも に挙動して液相を構成し,また,大粒径の細骨 材は液相内を沈降して再配列する。よって,振 動締固め時の液相限界粒径は,静的な状態の液 相限界粒径とは定義が異なる。この定義を明確 にすることによって加振時の液相領域が明らか となり,余剰ペースト理論の適用が可能になる と考えられる。

3. 余剰ペースト理論の適用方法

図 - 1 に示した C.T.Kennedy の考え方に基づき, ペーストを骨材空隙を充たす充填ペーストと, 骨材を分散状態にする余剰ペーストに区別する と,余剰ペースト体積は式(1)で求められる⁵⁾。

$$Vexp = 10(G_i - G_c)$$
(1)
Vexp: 余剰ペースト体積 (cm³/l)

配合実積率とは,コンクリート体積に対する骨材体 積の割合のことである。

また,余剰ペースト膜厚は余剰ペースト体積 を骨材表面積で除することによって式(2)により 求められる。

$$\delta = \frac{V \exp}{V_{\rm s} \cdot S_{\rm s}} \times 10000 \tag{2}$$

δ :余剰ペースト膜厚(μm)

Ss : 骨材の比表面積 (cm²/cm³)

本理論を適用するには,固相と考えられる骨 材粒径の最小値と骨材の比表面積の算定法が問 題となる。固相と考えられる骨材粒径の最小値 については後述の試験により判断することとす る。骨材の比表面積を求めるためには粒子形状 や表面の平滑度を考慮する必要があるが,本研 究は計算により得られた余剰ペースト膜厚を相 対的な大小で比較するため,膜厚の絶対値は問 題視されない。そこで,骨材粒子を球と見立て て,各ふるい目間に存在する骨材の全骨材に対 する体積割合と,各ふるいに留まる骨材の平均 粒径を用いて式(3)により算出した。

$$Ss = \sum \left[Ss_i \cdot \frac{P_i}{100} \right]$$
(3)

Ss_i =
$$\frac{\pi d_i^2}{\frac{\pi d_i^3}{6}} = \frac{6}{d_i}$$
 (4)

Ss_i: JIS Z 8801 に規定される, 各ふるい目間に存在 する骨材の比表面積(cm²/cm³)

P_i:上記の各ふるい目間に存在する骨材の,全骨材
 に対する体積割合(%)

d_i:上記の各ふるい目間の骨材の平均粒径(cm)

各ふるい目 *l*_{1i} と *l*_{2i}の間の骨材の平均粒径は幾 何平均とし,式(5)により求めた。

$$\mathbf{d}_{i} = \sqrt{\mathbf{l}_{ii}} \cdot \mathbf{l}_{2i} \tag{5}$$

4. 実験概要

4.1 使用材料及び配合

本実験で使用した材料の物性を表 - 1 に示す。 練混ぜ時に添加する AE 減水剤はセメント質量 に対する標準使用量とした。なお,細骨材中の 微粉の影響を除外するために細骨材中の 0.15mm以下は除いた。加振試験に用いたモルタ ルはW/C=60% S/C(重量比)=3(フロー:278mm) の配合で使用した。コンクリートの配合は余剰 ペースト膜厚の計算結果とともに 5.3 に示す。 コンクリート試験は細骨材率の変化のみに着目 した試験であるため, s/a のみを変化させてスラ ンプおよび VB 沈下度を測定した。

4.2 実験項目および方法

実験項目は,加振時の液相限界粒径を判定す るためのモルタル加振試験,細・粗骨材混合実 積率試験およびコンクリートによる VB 試験で ある。

モルタル加振試験は,前述の配合のモルタル を練混ぜ後ただちに 10×20cm 円柱型枠に3層 に分けて詰め,その後振動台(回転数3500vpm, 全振幅1.0mm)に設置して加振した。所定の時 間が経過した後に振動台から型枠を外し,上層, 中間層,下層の3層に分けて採取し,各層ごと にふるいの上から適宜水を流してふるい分け, 各層ごとに粒度分布分析を行った。

細・粗骨材混合実積率試験は,細骨材と粗骨 材の混合割合(細骨材率)を変化させた混合骨 材の単位容積質量試験をJIS A 1104の粗骨材の 試験に基づいて行い,細骨材率と実積率の関係 を求めた。実積率は余剰ペースト膜厚を計算す る際に必要な値である。

VB 試験は5.3 に示す配合条件のコンクリート を使用して JSCE-F 501-1999 に従って行い,振動 開始から円盤下面全面にモルタルが接するまで の時間を VB 沈下度とした。

5. 実験結果および考察

5.1 モルタルによる加振時液相限界粒径の判定

図 - 2 に各層における各粒径の経時変化を示 す。加振を行う前(棒突きのみ)の段階でも 3 層の間で粒度分布に多少の差が見られる。また, 図 - 3 は図 - 2 における各粒径に着目し,全骨材

表 - 1 使用材料の物性

セメント	密度3.16g/cm ³ ,比表面積3390cm ² /g									
	密度2.59g/cm ³ ,吸水率1.4%,実積率64.2%									
細骨材 (海砂)	0.15~0.3mm: 17.1%, 0.3~0.6r 粒度構成; 0.6~0.85mm: 13.1%, 0.85~1. 1.2~2.5mm: 24.0%, 2.5~5.0m	mm: 24.6%, 2mm: 12.7% m: 8.5%								
粗骨材 (砕石)	密度2.82g/cm ³ (5.0~10mm),2.89 g/cm ³ (10~20mm) 実積率62.1%									
100		0.15-0.3								
80		□ 0.3-0.6								
₩ 60		■ 0.6-0.85								
¥日 日 40		0.85-1.2								
剄 20		□ 1.2-2.5								
0		■ 2.5-5.0								
0	0 30 60 120 240 300									
100	加振時間(s)	□015-03								
<u> </u>										
数 (%) (%)										
		■ 0.0 0.00 ■ 0.85-1.2								
照 11 40		□ 1.2-2.5								
常 20		■ 2.5-5.0								
0										
	0 30 60 120 240 300 □ 加振時間(s)	[]								
100		□ 0.15-0.3								
80 🛞		□ 0.3-0.6								
例 60		0.6-0.85								
₩ ■ 40		Ø 0.85-1.2								
ì ₂₀		□ 1.2-2.5								
0		■ 2.5-5.0								
	0 30 60 120 240 300									
加振時間(S) 図-2 各層における各粒径の経時変化										



量に対する,各粒径部分を構成する細骨材量の 割合を,加振時間0秒の時点を基準とした変化 量で表し,その経時変化を示したものである。

上層においては,小粒径の細骨材が加振時間 の経過とともに増加しており,大粒径の細骨材 は減少していることが分かる。これは2.で述べ た通り,小粒径の細骨材が浮き上がり,大粒径 のものが沈降したためと考えられる。

中間層において明確な傾向は見られないが, 上層と下層の間の骨材移動の中間経路であることから,複雑な挙動をしているものと思われる。

下層においては,上層と逆の傾向を示してお り,大粒径の細骨材の沈降によって時間の経過 とともにその量が多くなっているのが分かる。

さらに,3層とも粒径 0.6~0.85mm, 0.85~ 1.2mm の部分は加振によってその量があまり変 化していない。これをさらに検討するために, 図 - 4 および図 - 5 に,加振による上層と中間層 および下層における粒度構成の変化を示す。い ずれも上層を基準に考えたため,縦軸の値がプ ラスの時は上層の方がその粒径の細骨材が多い ことを示している。これらの図より,0.85~ 1.2mmの細骨材は,加振によって上層と中間層, 下層でその量に顕著な変化が見られない。これ は、0.85~1.2mmの細骨材がその場に留まってい るとも解釈できる。しかし,実際には骨材は常 に挙動しており,この粒径付近の骨材は過剰間 隙水圧によって浮上する力と自重によって沈降 する力がほぼ同程度であり,浮上と沈降の繰り 返しによって,このような結果となったと考え られる。したがって,この粒径付近までが固相 を構成すると考えられる。しかし,過剰間隙水 圧の発生様態は粗骨材の存在,粒度分布,水セ メント比,与える振動の強さなどによって変化 するため、コンクリートにおいてモルタル加振 試験の結果が直接的に適用できるとは一概に言 えない。よって,厳密にはこれらの条件を考慮 したコンクリート試験が必要であるが,定性的 には本試験結果と同様に,細骨材のある粒径以 下が液相として挙動すると考えられる。







一方,地震による地盤の液状化に伴う噴砂に 関する研究⁶⁾により,様々な地震において,地 点特性によって多少の変化はあるものの,多様 な粒度分布の地盤から噴出する砂の最大粒径は 約1.0mm 程度であるとされており,本研究で得 られた試験結果と大略の一致が見られる。

これらのことから,モルタル加振試験の結果 によってもコンクリートの加振時挙動を定性的 に示し得ると考え,本研究においてはモルタル 加振試験により得られた値をコンクリートにお ける液相限界粒径の概略値と捉えた。また, 0.85mm よりも若干小粒径側の方が液相として より確実に挙動するものと考え,液相限界粒径 として 0.6mm を設定した。

5.2 細·粗混合骨材実積率試験結果

図-6に細・粗混合骨材実積率試験結果を示す。 5.1 より粒径 0.6mm 以下の骨材が液相を構成し ていると考えられるため,細骨材を原粒度のま まで使用したものに加えて,粒径 0.6mm 以下の ものを除いた細骨材を用いて試験を行った時の 試験結果を示したものである。なお,図-5の横 軸は原粒度の細骨材率であり,0.6mm 以下を除 いた場合も原粒度に換算して示している(図-7, 図-8も同様。両者の細骨材率の対比は表-2参 照)。実積率が最大となる細骨材率は原粒度を用 いたものが約40%であったのに対し, 0.6mm 以 下を除いたものは約 65%であった。これは 0.6 ~ 5.0mm のみによる実積率表記では約 52%とな る。一般に,大粒径と小粒径の粒子を混合する 場合,両者の粒径差が小さくなるに従い,最大 実積率を示す小粒径粒子体積/全体積の比率は 大きくなることが示されており⁷⁾, 0.6mm 以下 の細骨材を除くことによって細・粗骨材各々の 平均粒径の差が原粒度より小さくなる本試験に おいても、それに合致する結果となっている。 5.3 余剰液相体積および膜厚の計算結果

表-2 に本試験で使用したコンクリートの配 合を,図-7 に余剰ペースト膜厚および 0.6mm 以下の細骨材までを液相とみなしたときの余剰 液相膜厚と細骨材率の関係を示す。

ここに,余剰ペースト膜厚とはセメントペース トを液相と考え,余剰液相膜厚とは粒径 0.6mm





水セメン ト比	細骨材率 (%)	0.6mm~0 5.0mmを細骨 5.0 材とした時 材 の細骨材率の (%)	0.6mm~ 5.0mmを細骨 材とした時	単位量 (kg/m ³)					空気量	スランプ	余剰液相 体積	余剰液相 膜厚
(%)			の実積率 (%)	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤	(%)	(Cm)	(<i>l</i> /m ³)	(µm)
				W	С	S	G	Ad				
	30	20	67.3		300	551	1421	0.75	3.0	1.9	89.2	59.1
	35	24	68.2			643	1320		3.3	4.3	97.0	79.2
	38	26	68.7			698	1259		4.0	4.5	101.7	88.5
	40	28	69.1			735	1218		3.3	3.5	104.8	95.2
	42	30	69.4	150		772	1178		3.7	3.5	107.9	101.5
	45	32	69.8			827	1117		4.3	3.4	112.6	108.0
50	50	37	70.4			919	1015		3.7	0.6	120.4	118.8
50	55	42	70.9			1011	914		4.5	2.0	128.2	126.5
	56	43	70.9			-	-		-	-	129.8	127.7
	58	45	71.0			-	-		-	-	132.9	129.8
	60	47	71.0			1102	812		5.3	0	136.0	131.4
	63	50	71.0	-	-	-	-	-	-	-	140.7	133.2
	65	52	71.0	-	-	-	-	-	-	-	143.8	134.0
	68	55	70.8		-	-	-	-	-	-	148.5	134.6

表 - 2 コンクリートの配合および余剰液相厚計算結果

以下の細骨材までを液相と考えて算出した膜厚 と定義する。この図より,余剰ペースト膜厚が 最大となる細骨材率は図-6 で示した全粒度骨 材の実積率が最大となる細骨材率とほぼ一致し ていることが分かる。また,余剰液相膜厚が最 大となる細骨材率68%は、図-6で示した0.6mm 以下を除いた骨材の実積率が最大となる細骨材 率にほぼ一致していることが分かる。

5.4 理論値と実験値の比較および今後の課題

図 - 8 に VB 沈下度およびスランプと細骨材率 の関係を示す。スランプ最大となる細骨材率は 約40%であり,図-6,7に示す原粒度骨材にお いて実積率最大,余剰ペースト膜厚最大となる 細骨材率に一致する。しかし, VB 沈下度最小と なる細骨材率は約45%とスランプ最大となる細 骨材率に比べて大きくなったものの,余剰液相 膜厚最大を与える細骨材率約 68%とはかけ離れ た値となっている。このことを詳細に考察する ために,図-9にコンクリートの振動締固めの難 易の決定要因に関する概念図を示す。この図に おける、「固相を構成する骨材の細骨材率と振動 締固めの難易の関係 (実線)」は,加振時の液相 性状を一定と考えれば,締固めの難易度は余剰 液相膜厚を算出することによって決定できると いうことを示している。

一方,「液相を構成する細骨材量と締固めの難 易の関係(一点鎖線)」は,細骨材率の増加に伴 って液相中の細骨材量が多くなるため,液相が 液状化しにくくなることを示している。

両者兼ね合いによって図中の「実際のコンク リートの締固めの難易(点線)」が規定されると 考えられる。今後,液相として挙動する部分の 構成と加振時性状の関係について検討する必要 がある。

6. まとめ

本研究により以下のことが確認された。

1)加振時のモルタルでは小粒径の細骨材は液相 として挙動する。本研究において加振時の液 相限界粒径は 0.6mm 程度であった。コンクリ



図 - 9 締固めの難易の決定要因に関する概念図

ートの場合も同様に,細骨材の一部がセメン トペーストとともに液相を構成する。

2) コンクリートの VB 沈下度最小となる細骨材 率は,細骨材率の変化に伴う余剰液相膜厚の 厚さと,液相部分の性状の変化の兼ね合いに より規定される。振動締固めを考慮した配合 設計手法を確立するためには,加振時の余剰 液相膜厚とともに,加振時の液相の性状を考 慮する必要がある。

参考文献

- 1) 松下博通ほか:砕砂コンクリートの適正配合に ついて,セメント技術年報,No.41,pp.102-105, 1987
- 2) C.T.Kennedy : The Design of Concrete Mixtures , Proceedings of the ACI , Vol.36 , pp.373-400 , 1940
- 3) 松下博通ほか: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
- 4) 枝松良展ほか:モルタルフローにおける粉体と 細骨材の役割と境界,土木学会論文集,No.571/ V-36,pp.131-147,1997.8
- 5) 松下博通ほか;コンクリートの配合設計への余 剰ペースト理論の適用に関する基礎的研究,土 木学会論文集,No.578/V-37,pp.57-70,1997.11
- 6) 沼田淳紀ほか:噴砂の粒度構成,土木学会論文 集,No.722/III-61,pp.129-147,2002.12
- 7) 徳光善治: 粒体のつめこみに関する研究,材料, Vol.13, No.133, pp.34~40, 1964.10