

轻 混 凝 土

В.И.Н.阿赫維尔多夫 等著

建 筑 工 程 出 版 社

輕 混 凝 土

郭成舉 譯

建 筑 工 程 出 版 社 出 版

• 1957 •

內容提要 本書討論有关輕混凝土的新的应用范围和現代化施工方法等方面的工艺問題。

本書著者根据实验資料提出了混凝土振動流动性的分級和檢查混凝土流动性的方法，列举出輕混凝土强度随時間增長和机械作用对强度影响的数据。書中还討論了輕混凝土成分配合的設計、輕混凝土的透水性以及拌制耐热輕混凝土的特点等問題。

本書可供工程技術人員及科學研究人員參考。

原本說明

書名 ЛЕГКИЙ БЕТОН
編著者 Ц. Н. Ахвердов, Н. С. Годзиев, И. М. Овадов-ский
出版者 Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре
出版地点与年份 Москва 1955

輕 混 凝 土

郭成羣 譯

*

建筑工程出版社出版（北京市東廠門外南風土路）

（北京市書刊出版業營業許可証出字第052号）

建筑工程出版社印刷廠印刷·新華書店發行

書号 559 79千字 787×1092 $\frac{1}{32}$ 印張 3 $\frac{5}{8}$

1957年8月第1版 1957年8月第1次印刷

印數：1—1,850冊 定價（11）0.75元

目 录

前 言	4
第一章 輕混凝土的流动性·····	9
第二章 輕混凝土的强度·····	33
第三章 机械作用对于輕混凝土强度的影响·····	63
第四章 輕混凝土的透水性·····	76
第五章 設計輕混凝土成分配合的一些論据·····	84
第六章 耐热輕混凝土·····	96
結束語·····	110
参考文献·····	113

前 言

在混凝土及鋼筋混凝土結構和構造物中大量地 and 多样化地采用各种輕混凝土的問題，首先在苏联得到了解决。

关于在我国建筑工程中广泛应用以阿尔明尼亞蘇維埃社会主义共和国蘊藏极为丰富的浮石为主要原料的輕混凝土这一問題，是P. M. 米哈伊洛夫 (Михайлов) 教授提出来的，在他的著名的著作中[31、32] ^①，对浮石产地作了叙述，并指出浮石和浮石混凝土的主要性能。

苏联最高国民經济會議为了在建筑中实际采用輕混凝土 (从前叫做“热混凝土”)，曾組織了一个“热混凝土”公司，該公司于1926~1928年第一次采用輕混凝土建筑了各种住宅、公用房屋和工业廠房；他們的經驗已在积极参加这一新型建筑工程的H. A. 波波夫(Попов)教授的著作中[37、38]作了系統的叙述。

除了实际的建筑工程以外，P. M. 米哈伊洛夫和H. A. 波波夫曾在1926~1930年展开了一些牽涉很广的研究工作，不但研究了不同种类的多孔集料(浮石、爐渣、貝殼岩、燒石、多孔凝灰岩、蛋白土等等)的性能，而且也研究了以这些原料做成的輕混凝土的性能。这些研究的結果已經发表在P. M. 米哈伊洛夫和H. A. 波波夫的許多联合著作中[33~35]，并且使輕混凝土更广泛地应用在实际工程中，例如1928~

① 此處和后文中方括弧內的數字，系指書末所列的參考文獻的順序號數。

1931年在莫斯科、列宁格勒、图拉、伏龙涅日、巴庫、馬哈契卡拉、梯比里斯、埃里温等城市曾应用輕混凝土建造了許許多多用途不一的房屋。这一批建筑工程的規模可以举这样一个例子來說明：1930年“热混凝土”公司平均每月在它所建造的房屋中灌注6万立方公尺以多孔集料拌制的混凝土。这一項工程的經驗和随之而进行的研究工作的結果，不論是关于整体式結構方面〔39〕，或是关于牆壁及樓盖用的輕混凝土磚的生产和应用方面〔40〕，都已經发表在Н.А.波波夫的著作中。后来，Б.Н.考夫曼(Кауфман)、Н.А.波波夫和А.А.希什庚(Шишкин)〔18,19〕又对輕混凝土磚的应用問題繼續进行探討研究。選擇輕混凝土成分配合的方法已在上述一系列著作中和И.П.亞历山德林(Александрин)及Б.Г.斯克拉姆塔也夫(Скрамтаев)〔1〕的著作中作了闡明。

Н.А.波波夫在1931~1932年將截至当时为止所积累下来的应用輕混凝土的施工經驗和对其性能所作的广泛研究加以系統化和概括起来之后，第一次創立了以实验为基础的关于輕混凝土的一般性理論。在这一杰出的著作〔41〕和Н.А.波波夫后来的一些著作〔42、43、48〕中，确定了一些共同适用于各种混凝土及砂漿的极为重要的基本規律，并且查明和評定了一些輕混凝土不同于以密实集料拌制的混凝土的規範性的区别。这些規律給主要施工因素(水泥及水的用量；水泥的活性和吸附性能；粉狀添加料的影响；集料的强度、顆粒級配、含孔程度和吸附性能；增实方法和其强烈程度；硬化条件等等)对于輕混凝土和易性及强度的影响提供了根据。

上述各項工作的結果获得广泛利用，主要是在建造那些以水泥用量比較少的低标号(15~50)輕混凝土做成整体牆壁的房屋的时候，以及应用夯搗法和联合增实方法来制造輕

混凝土磚的時候。

但是近年來輕混凝土的应用範圍已經大大擴展。以多孔集料拌制的混凝土已經逐漸应用于鋼筋混凝土結構和制品了。

在我國应用輕質鋼筋混凝土的問題，是 E. B. 柯斯德爾科 (Костырко) 教授在 1930 年第一屆全蘇混凝土及鋼筋混凝土會議上首先提出來的 [49]。但是由於蘇聯中部地區沒有質量適宜的多孔集料，輕質鋼筋混凝土結構的研究和应用在開始時都是極其有限的。但在外高加索則因為天然多孔岩石的蘊藏很豐富（浮石、凝灰岩），這個問題就顯得十分現實。因此在格魯吉亞，後來又在阿爾明尼亞，曾經組織了研究輕質鋼筋混凝土性能的系統化工作，並展開了廣泛的實驗工程。

由於 1936 年在梯比里斯召開了第一屆外高加索混凝土及鋼筋混凝土會議，人們有可能總結在建築工程中試用輕質混凝土及鋼筋混凝土的最初經驗。會議指出了輕混凝土的積極性能，並且認為有必要進一步研究工藝問題，以及輕質鋼筋混凝土結構的設計和建造方法問題。

在第一屆和第四屆全蘇混凝土及鋼筋混凝土結構會議之間的一段時期內，在推動輕混凝土应用于各種土木工程結構中去的事業中，有了巨大的成就。

中央工業建築科學研究所進行研究的結果證明有可能在工業和民用建築工程中应用以輕質鋼筋混凝土制成的裝配式板和板件。

梯比里斯鐵路運輸工程師學院 (ТБИИЖТ) 的研究工作，开辟了在橋梁工程中应用輕質鋼筋混凝土的可能性。

根據梯比里斯水工構造物及水電工程科學研究所的研究工作，輕質鋼筋混凝土已經以薄殼結構的形式应用來作為房

屋的樓蓋和屋頂。

梯比里斯水工構造物及水电工程科学研究所的工作，以及阿尔明尼亞蘇維埃社会主义共和國科学院建築材料和結構研究所的工作，提供了在裝配式建築工程中（梁式鋪板、空心屋頂板、隔牆板、空間桁架等等）应用輕質鋼筋混凝土的可能性。

梯比里斯水工構造物及水电工程科学研究所1941年進行研究的結果，是一些巨大的成就，這些結果給在重力式水工構造物和有壓隧洞襯砌中有效地采用天然多孔集料調制混凝土的可能性奠定了基礎。

由于輕混凝土領域內的 研究工作得到了發展，因此就有可能將輕混凝土 作為一種 材料应用于種種承受高溫作用的結構。

現在，由于在住宅及民用房屋建築工程中有了一種应用大型板件及大型塊件的趨勢，輕混凝土就具有特殊重大的意義。這一種施工形式要求人們組織優等輕質集料（陶礫、團集爐渣、爐渣浮石）的大量生產，以便制造作承重構件用的混凝土。根据蘇聯建築科学院建築技術研究所的資料，应用這種集料做成輕質鋼筋混凝土制品，以代替普通的鋼筋混凝土，在建造一座十層高的住宅房屋中，就可以節省鋼料 15% 和水泥 20%。

以上所述的研究工作同樣也使人們可以提出一項应用輕混凝土作為預應力鋼筋混凝土結構的問題。在這一方面，利用混凝土聯合灌筑機制造預應力鋪板時采用輕混凝土，是非常現實的。

在輕質混凝土及鋼筋混凝土建築工程的发展中，施工的機械化具有非常重要的意義。

實踐証明，如果用振動器搗實輕混凝土，或者用混凝土泵輸送輕混凝土隨後施行振動，輕混凝土的物理力學性能可以達到特別高。在水泥凝結以前，對輕混凝土施行間歇重複振動，是一項提高強度的極為有效的措施。

根據這些情況，就有必要去尋求解決一些與輕混凝土的新的應用範圍和現代化施工方法有關的輕混凝土工藝問題。

本書著者認為，引用那些足以說明混凝土中水泥結石內部結構的形成的物理化學和流文學學說來解決這一新的問題，是有必要的。這種努力可以使人們全面地弄清楚許多重要問題，而解決了這些問題，就可以開辟輕混凝土在建築工程中應用的新的遠景。

本書是由下列著者分別編寫的：第一、二、四、五章，由И. Н. 阿赫維爾多夫 (Ахвердов) 執筆，第三章由 Н. С. 戈齊也夫 (Годзиев) 執筆，第六章由 И. М. 奧瓦多夫斯基 (Овадовский) 執筆。

著者認為有必要在此向蘇聯建築科學院院士、技術科學博士 Н. А. 波波夫教授和技術科學碩士 Б. Н. 考夫曼致以深切的謝意，因為在編著時他們曾給了我們許多寶貴的指示。

著者將以十分感激的心情接受讀者們的批評、商榷和指示。

第一章 輕混凝土的流动性

水泥漿是一种由水泥顆粒和水構成的多相播散体系。由于水泥与水之間的相互作用,每一个水泥顆粒都蒙着一层水膜——由吸附水和扩散水組成的溶合层^①。

如所周知,为了在固体顆粒的表面上包盖一层厚度最大的溶合层而所需的水量,已由A.Ф.列別捷夫(Лебедев)〔24〕定名,称为最大分子水容量。在后文中我們將把所論述的水泥与水体系的这一个水量称为水泥的最大分子水容量。

按照著者的实验資料,水泥的最大水容量可以用下列实验关系式求算:

$$K_{MB} = 0.88 K_{HT} \quad (1)$$

式中 K_{MB} ——与水泥最大水容量相应的水灰比;

K_{HT} ——与水泥漿正常稠度相应的水灰比。

当水灰比 $B/L \geq K_{MB}$ 时,水泥漿就开始表现出某种顫变性能。譬如說,水灰比 $B/L = 0.88 K_{HT}$ 的松散水泥干糊,当它在振动台(振动台頻率 $n = 1200$ 次/分鐘,振幅 $a = 0.06$ 公分)上振动兩分鐘后,就轉入稠漿状态。但是在靜置片刻后,这种干糊就不再具有它的原始状态。只是当水灰比在 $B/L = K_{HT}$ 至 $B/L = 1.65 K_{HT} = K_n$ 的范围内时,水泥漿才有可逆的顫变轉化。

水灰比 $B/L > 1.65 K_{HT}$ 的水泥漿是没有顫变性的,因为

① 詳見著者的其他著作〔4,5〕。著者的“堆石瀝漿圪工”(4)已有中譯本,人民交通出版社 1956 年出版——譯者注。

它的結構形狀是如此的不穩定，以致在極小的外力作用下水泥漿就開始流動。

混凝土拌合物是粗細集料用水泥漿粘結起來成為整體的一種體系。因此，要使混凝土拌合物進入流動狀態，必須用加置剪力的方法來破壞體系的內部聯繫。

在剪移時，水泥漿的結構抗力先被克服，這樣它的浮載能力就要減小。集料的顆粒接着移位，並且承擔剪力；此時水泥漿的結構被破壞愈烈，則集料承擔剪力愈多。

當水灰比增大時，水泥漿就失去承受剪力的能力，而集料的表面摩擦就成為反抗剪移的主要抗力。例如，當水灰比大於 K_0 時，水泥漿就像剛才所說的那樣，失去它的結構聯繫。

這樣，隨著水泥漿結構種類變更時混凝土拌合物內部所發生的量和質的變化，流動性的機能可能是不一樣的。特別是當水泥漿內沒有結構聯繫時，混凝土拌合物的流動性就完全失去了物理意義，因為在這樣的情況下混凝土拌合物的組成材料不是相互聯繫地流動，而是各自獨立地流動的。

由於水泥漿的顫變現象，也因為集料顆粒的表面摩擦系數在機械作用下減小，體系的流動性應當被認為不僅是取決於水灰比的數值，而且也同結構變形的速度和混凝土拌合物的肌理^①有關。因此非常明顯，要控制輕混凝土拌合物的流動性，應當確定，在某種施工方法之下，體系的結構和肌理將以怎樣的速率變形。在這一關係上，必須指出，用標準圓錐體測得的輕混凝土的坍塌度並不能表明體系的流動性。

外高加索冶金工廠建築公司的經驗指出，錐體坍塌方法根本不能用來測量輕混凝土拌合物的流動性；還在1933年，

① 混凝土肌理的涵義包括集料顆粒相互分布的性質，以及集料的物理性質，如單位體重、粗糙程度、顆粒形狀等等。

H. A. 波波夫就已經指明这一点[41], 因为圓錐体变形的大小并不决定于水灰比的数值和輕混凝土的成分配合。当水灰比很大时, 拌合物就要分层离析, 水泥漿就要以乳液狀分泌出来, 而此时粗集料和砂就形成一种稳定的骨架, 并且仍然不变形。这一情况說明, 当水泥漿的稠度属于塑性及塑性粘性时, 集料的顆粒不会破坏水泥漿的内部結構, 而水泥漿的稠度属于粘性时, 則輕質集料的顆粒仍然处于互相联系的状态(圓錐体不变形)中, 因为顆粒表面粗糙不平, 摩擦系数很大。

輕質砂的摩擦系数远較河砂及沃尔斯克砂(苏联标准砂——譯者)大[4]。同时, 輕質砂充水时, 摩擦系数差不多不見降低。粗粒輕質砂的摩擦系数, 要比細粒及尘狀顆粒的摩擦系数大一些。細粒及尘狀顆粒的摩擦系数可以平均取0.7。

凝灰岩砂的真实單位体重(顆粒連同結構性細孔的体重), 介于1.50~1.70吨/立方公尺之間, 浮石砂介于0.90~1.10吨/立方公尺之間, 而爐渣砂則介于1.3~1.5吨/立方公尺之間。而普通砂的真实單位体重平均为2.60吨/立方公尺。

显而易见, 輕質集料的高度空隙率和其他独特的物理力学性能, 必然会以相应的方式反映在輕混凝土流动性的机能、强度和其他特性方面。

輕混凝土振动处理的物理实質

由于水泥漿具有結構联系, 它和一般液体有一点不同, 就是它的浮載能力很高, 这种浮載能力基本上决定于水灰比的大小。

水泥漿的結構愈强, 則其浮載能力亦愈大, 因此集料在混凝土拌合物中沉淀亦愈为困难。要使集料顆粒能够在靜止的

水泥漿中下沉,它的重量(扣除被它所排除的水泥漿的重量以后)必須大于抗剪力。

对于有規則几何形狀的顆粒,这一个条件可以写成下列公式:

$$d \geq \frac{6m\tau_0}{r-r_1} \quad (2)$$

式中 d ——集料顆粒的最小直徑;

τ_0 ——水泥漿的极限剪应力;

r ——顆粒的真實單位体重,包括集料充水而增加的重量;

r_1 ——水泥漿的單位体重;

m ——集料顆粒的形狀系数。

形狀系数决定于顆粒最大与最小橫向尺寸的比值。对于球形顆粒, $m=1$ 。測量的結果指出,对于輕質集料的顆粒, m 通常介于1.5~2.2之間。

当輕質集料在水泥漿中沉淀时水泥漿的浮載能力,可以用表1中所列的数据来表示。

从表1中的数据可以看出,在實踐中所应用的各級輕質集料根本不能在水灰比从0.3到0.5^①的靜止的水泥漿中沉淀。因此,要在使用塑性粘性拌合物的情形下获得密实的輕混凝土,必須降低水泥漿的浮載能力。

当水灰比大于0.5($B/H > K_n$)时,水泥漿的浮載能力可以同一切无結構的普通液体的一样按阿基米德定律来計算。此时,粒徑等于和小于5公分的輕質集料顆粒却不能够沉入水泥悬液中。

① 在一般情況下,應當是指水灰比從 K_{nr} 到 $K_n=1.65 K_{nr}$ 之間。

当輕質集料在水泥漿中沉澱时水泥漿的浮載能力 表 1

水泥漿的 水 灰 比	水 泥 漿 的 單 位 体 重 (噸/立方公尺)	不沉入水泥漿中的一部分輕質集料的 最小直徑(公分)		
		充水凝灰岩	充水浮石	充水爐渣
0.3	2.11	180*	340*	370*
0.35	1.96	60*	240*	100*
0.40	1.87	24	67*	40
0.45	1.78	10	20	13.0
0.50	1.75	5	8.5	5.8
0.55	1.73			
0.60	1.70			
0.65	1.68	5**	5**	5**
0.70	1.64			

* 最小直徑是按理論計算的。

** 當水灰比 $B/H > 0.5$ 時，對於所述集料的水泥漿的浮載能力，同水灰比等於 0.5 時相比，差不多沒有變化。

假如对水泥漿施行振動，那末，數值和方向都在時刻變化的加速度就要傳遞于体系的粒子。這一种加速度將与重力的加速度相疊合。

實驗証明，在水泥漿受振動时向下降落的粒子，不能够在停止振動后浮升起来。這就是說，向下的合加速度超过了向上的分加速度，因此，我們所要注意的，仅仅是向下的最大加速度。

我們認為，振動对于减小水泥漿浮載能力的作用，可以当做因重力加速度使沉降物体重量增加一样看待。由此可以得出一个求算粒子沉降条件的公式。

在簡諧振動时最大的加速度，可用下列方程式来表示：

$$\text{最大 } p = 4\pi^2 a n^2 \quad (3)$$

式中 n ——頻率，以每秒鐘振動次數計；

a ——振幅，以公分計。

于是,在振动影响下似乎是增大了一些的粒子單位体重
虛拟值 r' 就等于:

$$r' = r \frac{p+g}{g} = \frac{4\pi^2 a n^2}{g} r + r \quad (4)$$

式中 g ——981公分/秒²。

將 r' 的数值代替公式(2)中的 r , 便得到 振动时粒子 在 水
泥漿中沉降的条件:

$$d > \frac{6m \tau_0}{r \left(\frac{4\pi^2 a n^2}{g} + 1 \right) - r_1}$$

整理后得出:

$$d > \frac{6m \tau_0}{(0.0402 a n^2 + 1)r - r_1}$$

从而

$$a n^2 \geq \frac{\frac{6m \tau_0}{r} - d \left(1 - \frac{r_1}{r} \right)}{0.0402 d} \quad (5)$$

指定 $m=2.2$, 并将相当于各种不同水灰比的水泥漿的 r_1 、
 r 和 τ_0 的数值代入, 就可以求得 $a n^2$ 值, 达到了这些数值时, 浮
石、凝灰岩和爐渣的顆粒就能够在輕混凝土拌合 物受 振动增
实时沉降(表 2)。

从表 2 可以知道, 水泥漿結構变形速度的大小, 决定于水
灰比的数值和分級集料的粒徑 (在集料形 狀及重量均为定值
时)。水泥漿的結構愈坚固, 以及分級集料愈細, 則振动的速度
也应愈大。

根据表 2 的資料可以确定, 在怎样的振动速度下, 具有一
定粒徑的分級集料可以在各种不同水灰比的水泥漿中沉降。

从按照这些资料繪制而成的图中可以看出,在水灰比 $B/U=0.3$ 的水泥漿中,当頻率为3000次/分鐘时,只有粒徑为1.5公分的凝灰岩顆粒能够沉降,而頻率为7000次/分鐘时,則粒徑为0.25公分的顆粒就已經能够克服水泥漿的粘性抗力。随着水灰比加大,較細顆粒的沉降也就比較容易;例如,在水灰比 $B/U=0.4$ 的情形下,粒徑为0.25公分的顆粒可以用頻率為3000次/分鐘的振动来增实,而頻率为7000次/分鐘时,就是更細的顆粒也能够沉降。

由此可知,使用振動器来使輕混凝土拌合物增实时,必須把振動的強烈程度同混凝土中水泥漿的水灰比互相联系起来,否則就不能达到应有的效果。在这一关系上,非常明显,要使流动度很小的輕混凝土密实,主要应当使用高頻率振動器。

在振動过程中,沉入水泥漿內达某种深度 h 的輕質集料,將在机械作用停止后停留在这一位置上,因为水泥漿中的結構联系从新恢复,粒子既不能沉降,也不能浮起^①。

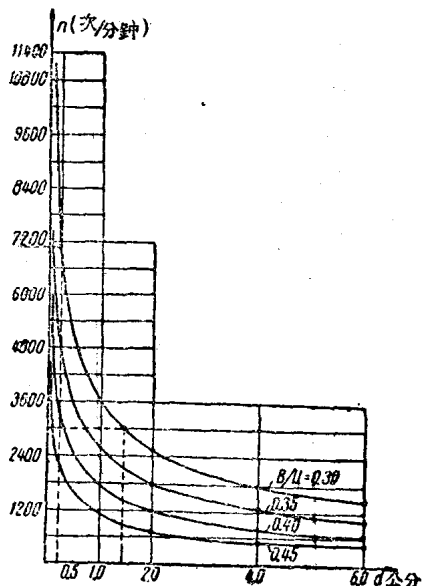


圖 1 振動頻率对于各級凝灰岩集料在水泥漿中沉降的影响 (振幅 $a=0.1$ 公分)

① 倘使水泥漿沒有結構联系時,輕質集料就要浮起,而這樣的体系就不可能被振實。