

矿物組成不同的水泥对 膠砂和混凝土强度的影响

A. B. 薩 达 尔 金 著

蔣 家 奋 秦 佳 寬 譯

建 筑 材 料 工 業 出 版 社

矿物組成不同的水泥对 膠砂和混凝土强度的影响

技术科学碩士 副教授 A. B. 薩达尔金 著

蔣家奇 秦佳寬 譯

建筑材料工業出版社

內 容 簡 介

本文是苏联“列宁格勒铁路工程研究所文集”中的一篇論文。該文不仅通过系統的試驗，研究了不同矿物組成的水泥对水泥石膠砂及混凝土的強度所起的影响，从理論上作了一些分析和說明，并且还提出了在配制混凝土时，如何根据不同的矿物組成合理地使用水泥。

本文可供建筑、施工、設計及水泥生产与研究部門的工程技术人员参考。

А. В. САТАЛКИН: ПРОЧНОСТЬ РАСТВОРА И БЕТОНА НА
ЦЕМЕНТАХ РАЗНОГО МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО СОСТАВА
ТРАНСЖЕЛДОРИЗДАТ (МОСКВА—1954)

矿物組成不同的水泥对膠砂和混凝土強度的影响 蔣家奮 秦佳寬 譯

1958年3月 第一版 1958年3月北京第一次印刷845册
787×1092· $\frac{1}{32}$ ·字24,000 · 印 張1 $\frac{1}{2}$ · 定 价(10)0.18元
北京市印刷一厂印 新华書店發行 書号00109

建筑材料工業出版社出版(地址:北京復興門外南礼士路)
北京市書刊出版業營業許可証出字第094号

目 录

一、水泥石和膠砂的强度·····	7
二、混凝土的强度·····	16
三、結論·····	35

1947~1948年，本文作者^①在列宁格勒铁路运输工程研究所机械实验室中，曾研究了混凝土的机械性能，其研究结果述于本文中。

作者研究了用四种不同矿物组成的水泥所调制的胶砂及混凝土的机械性能。

虽然混凝土的性能不仅取决于水泥的性能，但首先研究水泥矿物组成对混凝土性能的影响仍是必要的，因为在混凝土工艺学中对这方面的問題研究得最少。特别是在跨度大的桥梁中的各个不同部分应当选用最适合的水泥品种。

还必须确定A.E.謝依金关于混凝土的性能是取决于结构系数 K 这一原理的正确性的范围与条件，还必须寻求水泥矿物组成对选择混凝土配合比及评价混凝土的重要性能——蠕变、收缩、水化热的影响及其实用的各种计算方法。

我們研究了混凝土的抗压、抗折、和抗拉强度，也研究了混凝土在短時間內經受反复荷重时，混凝土的抗压、抗拉、变形特性以及混凝土在負荷的長時間作用下的蠕变。

同时还测定了混凝土收缩变形，并研究了不同矿物组成的水泥石及胶砂的强度。

因为研究計劃中規定有后期强度試驗，所以調制了供各个齡期試驗的試体，一直到10年之久。

在本文中，闡明了水泥石胶砂和混凝土强度的研究結果。关于混凝土变形性能的問題，載于本选集另外一篇論文中。

在試驗中采用四种不同矿物组成的矽酸鹽水泥进行研究，其矿物组成（根据化学分析計算出）列入表1。

① 参加研究的科学工作者有机械实验室的Г.И. 別里雅夫斯卡婭和З.И. 頓斯卡婭，一級实验員К.К. 特勞依次基和实验員 А.И. 依万諾娃及Е.К. 謝維摩娃。

表 1

水泥編號	含量(以%表示)				$K = \frac{M_{cp}}{M_{ecAb}}$	
					(按謝依金数据)	
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	旧 公 式	新 公 式
8	75	0	3	18	0.45	0.73
1	59	18	4	15	0.36	0.54
3	41	33	6	16	0.17	0.34
6	16	60	8	12	0	0.11

經岩相分析証实，熟料中各矿物含量是符合表中数据的。

虽然从化学分析結果看来，在熟料8中沒有貝利特，但按岩相分析却發現含有少量貝利特。

上述情况并未显著改变熟料的矿物組成。

进行試驗用之水泥的矽酸鹽总含量波动范围很小：从74%（熟料3）到77%（熟料1）； C_3S 的含量是75~16%，而 C_2S 的含量为（实际上有很小部分）0~60%。

按熟料中矽酸鹽的含量可以將其特点表示如下：

熟料8——高阿利特型的；熟料1——阿利特型的；熟料3——中阿利特型的；熟料6——貝利特型的。

同时，还应当指出：水泥中熔剂矿物間的比值亦發生变化，这些熔剂矿物对水泥性能是有很大影响的。熟料中 C_3A 的含量变化范围在3~8%之間（相差一倍多）。 C_4AF 的含量比較一致，但是它仍然發生变化，其变化范围在12~18%之間（相差0.5倍）。

这样，随着熟料中部份矽酸鹽含量的变化，將使 C_4AF 的含

量也發生显著的变化，同时 C_3A 的变化更为显著。

如果鑑定水泥水化作用所产生的結晶体与膠体的相对含量，并以 A.E. 謝依金教授采用之 K 值作为鑑定系数来鑑別这些熟料，則所使用之熟料的 K 值在这方面的变化是極大的(見表 1)。

所有水泥的細度是相同的，其物理性能見表 2。

表 2

水泥 編号	标准稠度		比 重	容 重	粉磨細度		初凝 时, 分	終凝 时, 分	硬練膠砂的 28天活性 (公斤/公分 ²)	体积变 化的均 勻性
	淨漿	膠砂			200号 篩篩余	通过 90号篩				
8	27.5	7.9	3.14	1.08	0.2	95.0	2~05	7~10	412	安定
1	28.7	8.2	3.10	1.12	0.4	93.8	2~25	7~40	396	安定
3	26.5	7.6	3.13	1.17	0.4	91.4	2~45	7~20	402	安定
6	27.2	7.8	3.17	1.15	0.2	91.4	3~15	6~10	281	安定

表 3

材 料	比 重	容 重 (公 斤/公 升)	空 隙 率 %	粘 土 淤 泥 含 量 %	比 色 試 驗	累 計 篩 余%(按重量)										通 過 0.15 公 厘 篩 孔
						(孔徑尺, 寸以公厘計)										
						40	20	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15		
碎 石	2.71	1.36	50	—	—	—	1.8	81.7	99.2	99.7	99.7	99.7	99.7	99.8	—	
砂 子	2.57	1.51	41	1.8	淺 于 標 色	—	—	—	0.5	2.8	5.3	17.3	59.5	94.5	—	

从表2中看到熟料 8[#]、1[#]和 3[#]的28天活性很接近, 与其平均值

的誤差均不超过 2.2%，而貝利特型水泥 6[#]則比上述水泥的活性低 30%。

調制硬練膠砂和軟練膠砂是采用伏尔斯基标准砂。

制备混凝土所用的砂子及碎石的特性載于表 3。

当制备尺寸較小的混凝土試体，其断面为 8×8 公分或 10×10 公分时，应选择并采用較細的集料。

一、水泥石和膠砂的强度

水泥石試驗的結果見圖 1。

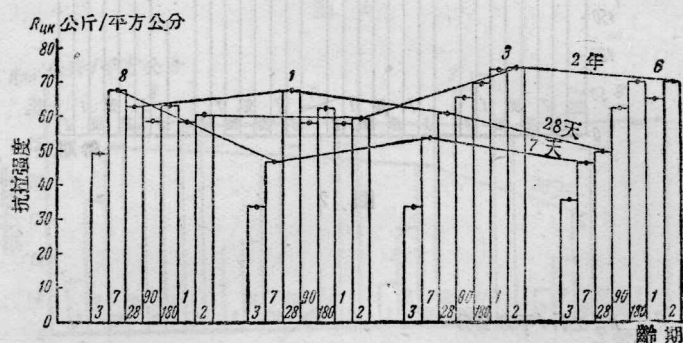


圖 1

硬練膠砂强度的結果見圖 2 及圖 3。

軟練膠砂强度的結果見圖 4 及圖 5。

在这些强度的数据圖表中，各种水泥是按 C_3S 含量及系数 K 值的高低为序而排列的。

从圖 1 看出：不同水泥的水泥石强度的增長曲綫是不一样的。

8[#]水泥——高阿利特鋁鉄酸鈣水泥，7 天强度增長率甚为显

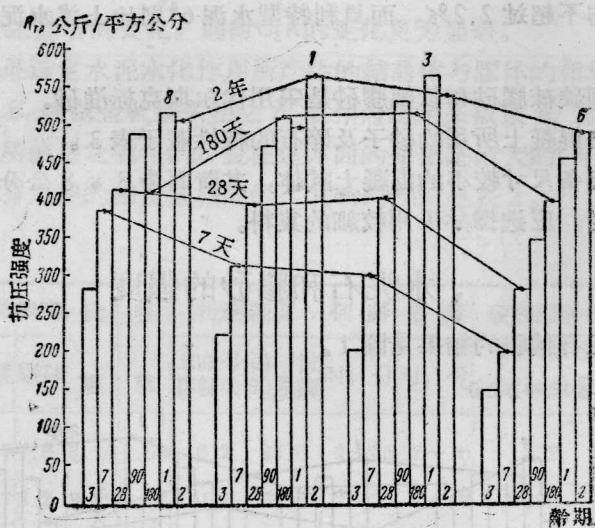


圖 2

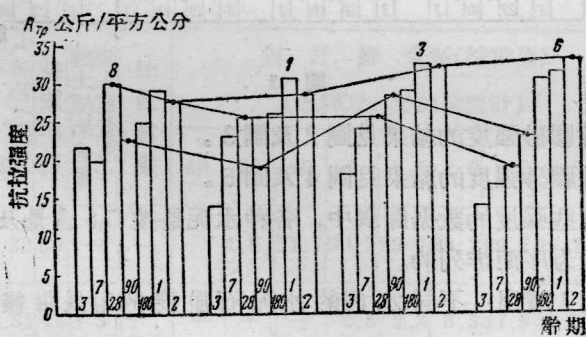


圖 3

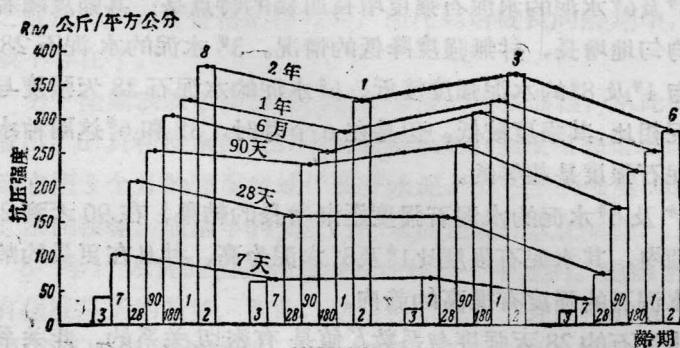


圖 4

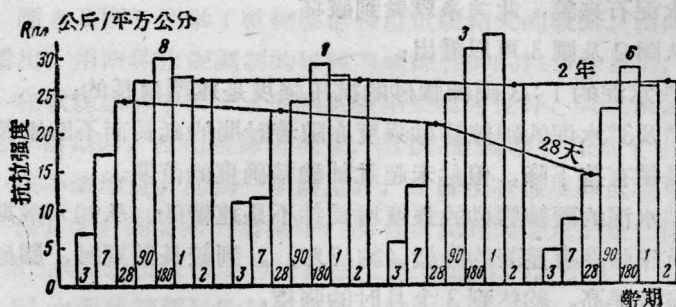


圖 5

著，于此齡期中強度亦屬最高。但其后期強度則有增有降。實際上可以認為 8# 水泥的水泥石強度，從 28 天到 2 年的時間內是不變的。

1# 水泥——阿利特水泥，28 天前的強度是一直在增長的。在此齡期內，此種水泥石強度與 8# 水泥很接近。28 天以後 8# 和 1# 水泥的水泥石的硬化曲綫是相同的，並且實際上這兩種水泥的水泥石強度，從 28 天到 2 年的時間內也是相同的。

3[#]及6[#]水泥的水泥石强度增長曲綫的特点是：其强度随着時間而均匀地增長，并無强度降低的情况。3[#]水泥的水泥石28天强度与1[#]及8[#]的水泥强度接近。6[#]水泥的水泥石28天强度与其他水泥相比，其强度較低。但是在6个月时，3[#]和6[#]这两种水泥的水泥石强度是相等的。

3[#]及6[#]水泥的水泥石强度逐漸增長的結果，在90天到2年的齡期內，其水泥石强度比1[#]及8[#]水泥为高，并且在更長的齡期內，水泥石的强度有提高的趋向。

水泥石的28天强度与系数 K 值是有密切关系的。此关系对于更早期硬化之水泥來說，也有不同程度的正确性。而对較晚齡期的水泥石來說，此关系就受到破坏。

从圖2及圖3可以看出：

6[#]水泥的1:3硬練膠砂的抗压强度是連續增長的。

1[#]及3[#]水泥的硬練膠砂强度亦随着時間的延長而不断增長，其間虽稍有些下降，但并未超过試驗精確度的范围。

8[#]水泥的硬練膠砂的强度增長并不是連續的，从90天齡期开始，抗压强度有显著的降低（約17%），到較長齡期时，膠砂强度又显著提高，約达到3个月时的强度。

8[#]、1[#]及3[#]水泥硬練膠砂，其28天的抗压强度，实际上几乎相等（396~412公斤/平方公分），并且显然高于6[#]水泥的强度。

8[#]水泥的后期强度較低。因而6个月齡期的强度以3[#]水泥为最高，而1[#]水泥与3[#]水泥很接近（相差1.5%）。

以水泥强度高低为序，一年齡期的排列是：3[#]、8[#]、1[#]和6[#]，而按2年齡期的排列是：1[#]、3[#]、8[#]和6[#]。

总之，仅在7天齡期前，硬練膠砂强度的增長性質是和系数

K 之值及 C_3S 的含量密切相关的，而在以后較長的齡期中，此关系就不存在了。

另一些圖表表示硬練膠砂抗拉强度的增長曲綫，从此圖中可以看出：6[#]貝利特水泥及3[#]中阿利特水泥的强度增長是連續的，并且它們3个月的强度超过1[#]及8[#]水泥，其一年的强度，6[#]水泥与3[#]水泥相等，而兩年的强度，6[#]水泥还較3[#]水泥略高。

8[#]与1[#]水泥的抗拉强度增長曲綫是不平稳的。这两种水泥都有强度降低的趋势；因此，这两种水泥3个月齡期的抗拉强度比3[#]甚至比6[#]水泥都低，此种情况一直保持到2年齡期时还是如此。

圖4及圖5列举了軟練膠砂强度試驗結果的数据。由此圖可以看出，用四种水泥調制的硬練与軟練膠砂的性質的差別。

在軟練膠砂中，8[#]水泥的試驗結果極为良好，其抗压强度直到2年齡期时，沒出現降低現象。其抗拉强度，在6个月齡期前，在不断增長，而到一年齡期时，才發現有强度降低現象。

在6个月到2年的齡期中，所有水泥的强度几乎是一样的。

8[#]水泥的抗压强度与抗拉强度是相适应的。于3个月齡期中，8[#]水泥軟練膠砂的抗压强度，实际上等于1[#]及3[#]水泥膠砂的抗压强度，并且大大高于6[#]水泥。于6个月齡期时，8[#]及3[#]水泥的抗压强度相等，并大大地超过了1[#]及6[#]水泥的抗压强度。这种情况一直保持到1年至2年，所以軟練膠砂的强度和系数 K 的关系，仅仅在28天齡期中是完全正确的。

比較硬練和軟練膠砂的强度，可以得出下列結論：

从硬練和軟練膠砂的28天抗压强度中可以看出：1[#]及8[#]水泥硬練强度与軟練强度之比約为2:1；3[#]水泥为2.5:1；6[#]水泥几乎是4:1。該比值随着齡期的增加而逐漸降低。从6个月齡

期的硬練與軟練膠砂的抗压强度中，發現有下列关系：8#水泥硬練强度/軟練强度=1.33，3#水泥为1.65，6#水泥为1.78，仅仅1#水泥仍保持2:1的比值。

硬練和軟練膠砂的抗拉强度存在另外的关系，即：28天、90天和2年的硬練和軟練的抗拉强度几乎是一样的。

总结以上膠砂的試驗結果，便可得到下列結論：

(1)用各种水泥制成的水泥石，其强度随着時間的变化各不相同。高阿利特水泥8#及1#的强度，在2年時間中有些降低。

(2)3#及6#水泥的水泥石强度，随着時間而逐漸增長，并且其增長速度是比較規律的。因此在長齡期中，發現以3#水泥(中阿利特水泥)的水泥石强度为最大，而6#水泥之水泥石(貝利特水泥)与3#水泥相似。1#及8#水泥之水泥石早期强度較高，可是随着時間的延長，它的强度却不再增長，結果，其后期强度較3#及6#水泥的水泥石强度小。

总之，所有的水泥石强度的差異，随着時間的延長而逐漸減少，在其他試驗中也發現此种現象。到2年齡期时，所有熟料的强度几乎是相同的，平均誤差均未超过5%。

(3)在硬練膠砂中看到的現象与水泥石發現的現象是相似的，在这些条件下，抗拉强度降低的現象是經常發生的。

在上述情况下，仅3#和6#水泥在2年硬化期間沒有發現强度降低。結果3#及6#水泥的長齡期的抗拉强度反而比其他兩種水泥为高，并且它們的內应力較其他兩種水泥小。

在水中养护的膠砂当受压时，其內部应力是較小的，因此活性高的1#水泥具有良好的結果。

所有水泥的長齡期强度是趨平的。

(4)在軟練膠砂中，1#及8#水泥强度降低現象是較少的。

但在該情況下，3#水泥最好，其強度較其他水泥都高。

關於強度降低的現象，在1932年，B.A. 金德所著的“波特蘭水泥的化學性質”[6]中曾闡述過。他用水泥石中的內應力來解釋此種現象，此內應力是由於水泥石膠相介質中，水化產物的晶化過程所促成的。在水泥石中產生高的局部應力，因而引起局部的裂紋並減弱了顆粒之間的粘結，從而引起了總強度的降低。

關於水泥膠砂中應力的存在，在K.Γ. 捷米切夫的著作，特別是在A.E. 謝依金[11]的著作中，都闡述過。

隨著時間的延長，顆粒間便互相結合——混凝土的“自身結合”，強度繼續上昇——從而使其強度降低現象消失。

顯然，在水泥石中組成的結晶合成體愈多，水泥的水化作用愈快，結晶愈大，水泥石愈密實則其應力愈大。尤其當水泥化學成分或礦物組成不一致時，則此應力愈加劇烈（根據A.E. 謝依金之研究）。因此，這現象在高 C_3S 和 C_3A 成分的水泥中應當更為明顯，並且它在水泥石中的呈現程度，比在膠砂和混凝土中更甚。

近年來，水泥膠砂及混凝土[2, 8]的長期試驗的結果表明：從一定齡期起，強度就開始不斷下降，特別是抗拉和抗折強度。同時其特點是：當在水中硬化時，發生強度降低現象，而在綜合條件下（即預先在水中，以後再置於空氣中硬化），則無此現象。

無疑的，為使水泥水化作用過程順利地進行，潮濕的條件是必需的。

但是，混凝土在水中連續硬化時，也可能引起抗拉和抗折強度的降低和抗压強度的少許降低。從圖1、3、5可知，我們的試驗確定了膠砂的抗拉強度趨向平穩，甚至有降低的趨勢。

強度降低的原因與水泥水化過程的終止有關，與水泥石及混凝土中內應力的產生有關；也與膠砂或混凝土內部表面上存在微

縫，以及当承受拉力和折力时微縫的开裂有关（根据П.А.列宾捷尔之研究）；还与充滿在混凝土毛細管中的水的作用有关（根据B.B.杰里雅金之研究）^①。

当承受压力时，表现出仅是与这些因素的一部分有关，即与水泥水化过程的終止及充滿在混凝土毛細管中的水分作用等因素有关。

膠砂和混凝土在此情况下，与充滿水的石材相似。当受压时，微縫开裂的影响是表现不出来的。

当承受拉力及折力时，由于最初的变形，致使微縫开裂，当被水飽和时，由于水的侵入作用致使混凝土及膠砂的强度降低。

П.А.列宾捷尔院士[9]引証了微縫开裂的事实，但都不是指混凝土而言。我們認為在膠砂及混凝土中，內应力愈大，則其影响愈大。

当水泥石在潮湿空气中或綜合的硬化条件下硬化时，其强度降低現象表现得并不显著。此外，在此情况下，由于膠体凝結致使結晶合成体产生压縮現象，由此压縮現象引起的水泥的收縮起着有益的作用（根据A.E.謝依金之研究）。

从圖1～圖5可以看出：水泥石和膠砂的强度与系数 K （水泥石中結晶相与膠体相的比值）的关系，大部分情况下仅在28天龄期中是正确的。随着水泥石龄期的增長，此关系就不成立了。根据我們的意見，主要有以下几个原因：

(1) 系数 K 的数值不是固定不变的，無疑，它随着龄期的增長而增大，以后逐漸趨平，而膠相較多的水泥，其系数 K 值，应比結晶合成体多的水泥变化得大。

① 关于这个問題參看H.A.莫斯科恩斯基的著作[8]。

(2) 强度并不可能仅由系数 K 值确定。如反对这个看法, 那就成为公式主义者。水泥石的强度, 除了結晶相与膠相的比值之外, 还有其他一些相关的因素, 忽視这些因素都是不允許的。这些因素是: 水泥水化速度和水化程度; 水泥顆粒間存在的未水化部分的多少, 以及由于膠相的变化和收縮, 使結晶的形成受到限制, 而使水泥石、膠砂、混凝土产生的內应力等。

(3) 强度的增長也与硬化条件有关, 这一方面取决于水化速度与水化程度以及水化終止期, 另一方面, 則决定于收縮程度与速度, 而該收縮在頗大程度上是与水泥石水分的蒸發有关。

在我們的試驗中, 水泥石及膠砂的硬化条件是相同的, 所以在極大的程度上, 是前二个原因起着作用。

随着齡期增長, 系数 K 之值的逐漸趨平, 致使强度曲綫趨平, 这也是由于水泥石中产生的內应力的作用所致。

因为水泥石中結晶的成長要比在膠砂中更为自由, 所以水泥石中內应力呈現更为剧烈。当水泥矿物組成不一致时, 內应力的成長更为剧烈。

系数 K 值本身不表示水泥熟料成分間之比, 而是表示水泥石在水化作用时, 所产生的結晶和膠体物質的体积之比, 并且此比值是随時間而改变的。

硬練膠砂与軟練强度之間的关系是具有其特点的, 这特点就是其关系是随着時間而变化的。

硬練与軟練膠砂的抗压强度, 在起初是显著不同的, 而后, 随着時間的变化就有些近似, 但是此近似值还不十分明显。

硬練与軟練膠砂的抗拉强度, 在初期更为接近, 至后期即趨平, 以致發生改变, 即軟練膠砂强度比硬練膠砂的抗拉强度高。此現象与軟練和硬練膠砂中水泥水化作用的程度及內应力状态的

不同有关。

从不同水泥的混凝土試驗結果看出，膠砂和混凝土的性質不是完全一样的。

二、混凝土的强度

我們进行的混凝土强度研究的試驗分为三項：

1) 鑑定 4 种不同矿物組成的水泥的混凝土抗压、抗折和抗拉强度。全部混凝土都进行了 28 天齡期的上述試驗，此外，对抗拉强度还进行了 7 天齡期的試驗。

2) 研究混凝土在不同齡期时的抗压、抗折和抗拉强度。采用下列两种水泥进行試驗：

1* 阿利特水泥及 6* 貝利特水泥，齡期为——3 天、7 天、28 天、90 天、180 天、1 年、2 年和 3 年，而其他水泥只試驗一年齡期之强度。

3) 輔助研究項目：确定試驗方法对机械强度的影响。

在第一批（主要）試驗中，以四种不同用量的水泥所得稠度

表 4

水泥用量 (公斤/立方公尺)	水 灰 比 (按重量)	混凝土体积配合比 1:n (水泥为 1)	坍 落 度 (公分)
400	0.46	1:4.4	各种水泥混凝土 的坍落度皆在 3.5 ~ 6 公分範圍內。 平均为 4.5 公分
320	0.60	1:5.6	
300	0.62	1:5.9	
280	0.66	1:6.4	
240	0.80	1:7.7	