
有孔陶粒砼

А. И. 瓦加諾夫

建筑工程出版社

有孔陶粒砦

鄭法學 蕭開仕 譯

內容提要 有孔陶粒码是一种新兴的有前途的优良建筑材料——輕码。用有孔陶粒码可制成各种强度的輕質码与輕質鋼筋码結構（包括預应力結構）。

本書敘述了有孔陶粒码的基本性質，及其变形和强度理論，同时闡明了有孔陶粒码的試驗研究方法及其运用於施工中的有关問題。

本書可供科学研究人員、工程技術人員和有关的高等及中等專業学校师生参考。

原本說明

書 名 Керамзитбетон

著 者 А. И. Ваганов

出 版 者 Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре

出版地点 及 时 間 Ленинград 1954 Москва

有 孔 陶 粒 码

鄭法學 蕭開仕 譯

*

建筑工程出版社出版（北京市東直門外南禮士路）

北京市書刊出版業營業登記證出字第052号

建筑工程出版社印刷厂印刷·新華書店發行

書號 316 57 千字 850×1168 32 開 印張 2 1/2 插頁

1956 年 7 月第 1 版 1956 年 7 月第 1 次印刷

印數：1—5,000 冊 定價（10）0.48 元

目 錄

緒 論	4
一、有孔陶粒 矽 受压时的变形	10
(一)有孔陶粒 矽 縱向变形与砂漿和集料性質之关系	10
(二)受压时的橫向变形和变形模量	22
二、有孔陶粒 矽 受压时的極限强度	26
(一)有孔陶粒 矽 受压时的極限强度与砂漿和集料性質之关系	26
(二)有孔陶粒 矽 受压时的强度理論	29
(三)有孔陶粒 矽 受压时的極限强度与主要因素之关系	38
三、有孔陶粒 矽 的基本物理力学性能	45
(一)破坏时的極限强度	45
(二)对冲击荷載的抵抗力	49
(三)有孔陶粒 矽 与鋼筋的粘結力	52
(四)有孔陶粒 矽 的收縮	52
(五)有孔陶粒 矽 的透水性	55
(六)有孔陶粒 矽 的耐冻性	57
四、实驗室的研究方法	61
(一)有孔陶礫的研究方法	61
(二)有孔陶粒 矽 的制作	68
(三)材料用量的計算	70
結 論	72
附錄：供莫斯科多層房屋建筑中 矽 用有孔陶礫的暫行技 術規范	73
参考書籍	76

緒 論

苏联共产党第十九次代表大会对建筑工作者提出的基本任务之一，即是進一步降低建筑造价。完成这个最重要的國民經濟任务的主要方法，是採用預制的裝配式構件來建造建築物。这种構件不論其在工厂中生產或在建筑現場上安裝，都能达到最高度的工業化。因此，就產生了裝配式構件的重量問題，而这重量即涉及到限制着裝配式構件尺寸大小的問題。

在砧和鋼筋砧結構方面，可以採取輕集料制造砧的方法，以解決裝配式構件的重量問題。此外，用輕砧代替重砧还有其他优点：如能減少基礎的尺寸和骨架構件的截面，以及傳声性和導热性較小等等。

在格魯吉亞和阿尔美尼亞，用浮石、凝灰岩等作集料的輕砧已得到非常廣泛地运用。在这些共和國里，輕砧既用於加筋的承重結構，也用於不加筋的圍护結構。

1932年，在第比利斯建筑冷藏庫时，第一次試用了加筋的輕砧。这个設計是由A. A. 格沃茲傑夫(A. A. Гвоздев)教授編制的。

在苏联的建筑實踐中，輕質鋼筋砧的廣泛採用，开始於1933年，建造馬克思、恩格斯、列寧学院第比利斯分院。同时，在第比利斯，輕質鋼筋砧还用於建造“季納摩”运动場、新的大學校舍以及許多其他的建築物。

从1936年起，輕質鋼筋砧开始用於裝配式的建筑。1936~1937年間，還會用來制造鋪設总面积为8,000平方公尺的“西姆卡尔”(Симкар)式的裝配式鋪板構件。

这种構件有两个圓孔，其長度达7.70公尺，有效荷載为550公斤/平方公尺。

目前,苏联的南高加索在建筑工程中广泛地采用了下列輕硃构件:供厂房屋面板用的六圓孔加筋板,其尺寸为 $10 \times 50 \times 125 \sim 225$ 公分;單圓孔或多圓孔的板式梁(西姆卡尔),其长度为 6 公尺及 6 公尺以上;供厂房楼板用的复合梁;以及用各个单独构件組合而成的复合桁架。

最近,輕硃和輕質鋼筋硃开始运用於水利工程的建設中。

由於注意了格魯吉亞和阿尔美尼亞建筑工作者在运用輕硃和輕質鋼筋硃方面的成就,全苏硃与鋼筋硃結構代表會議曾在決議中指出,在民用和工業建筑中,广泛地採用輕質鋼筋硃結構(用凝灰岩、浮石、有孔陶粒及其他集料制作)的合理性。

在俄罗斯苏維埃联邦社会主义共和國地区,輕質鋼筋硃曾首次运用於建造莫斯科的苏維埃宮。因为,要从阿尔美尼亞运來天然集料是不可能的。所以,就只能利用在專門工厂里制成碎石与礫石狀的有孔陶粒來当作輕質集料。

随着多層房屋建筑计划的擴大,随着向裝配式建筑方法的过渡,輕質鋼筋硃就应当得到更广泛地应用。

有孔陶粒是用於承重加筋构件的唯一的人造輕質集料。根据苏联部長會議的決議:在莫斯科应組織有孔陶粒的生產,在苏联的其他城市也都应無条件地建立起來。

根据我們的資料,当輕硃的容重为 $1,200 \sim 1,300$ 公斤/立方公尺时,可獲得 $110 \sim 200$ 公斤/平方公分的标号,即是其容重較重集料的硃減輕 $30 \sim 45\%$ 。

輕硃容重的这种顯著地減輕,不僅有經濟的效果,而且还能使裝配式构件的尺寸獲得顯著地增大。因此,在应用於建造圍护結構时,有孔陶粒硃乃是礫渣硃的主要对手。

根据苏联建筑科学院的資料,当水泥用量为 $150 \sim 200$ 公斤/立方公尺时,标号为 $30 \sim 70$ 公斤/平方公分的有孔陶粒硃,其容重为 $700 \sim 1,000$ 公斤/立方公尺,即較礫渣硃輕 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$ 。

根据苏联建筑科学院的統計,每立方公尺有孔陶礫的价值約为 60 盧布。

有孔陶粒是一种輕質的膨脹材料,是用焙燒易熔粘土的方法而得的。

有孔陶粒是1925年,由Е. В. 科斯蒂尔科(Е. В. Костырко)教授首次提出的。后来,Г. Д. 拉谷諾夫(Г. Д. Лагунов),Г. Д. 拉斯托尔谷耶夫(Г. Д. Расторгуев)和其他人員,在研究有孔陶粒制取方法方面,作了进一步的探索。建筑科学院一级科学研究员、技术科学碩士С. П. 奥納茨基(С. П. Онацкий)則制定了現代的有孔陶礫生產工藝过程。

根据С. П. 奥納茨基的理論,氧化鉄与还原剂的相互作用,是确定膨脹过程的決定因素。这个相互作用的物理化学本質就是,当温度达 $1050\sim 1250^{\circ}\text{C}$ 时,在还原剂——可能是固体炭、一氧化碳或氢——的作用下,高度氧化的氧化物过渡到低度氧化的氧化物——氧化亞鉄,氧化亞鉄容易和其他含粘土的礦物起反应,而形成易熔矽酸鹽。因而粘土团獲得了一定的流动性,这种流动性足以使氧化鉄和还原剂相互作用所產生的气体压力,与离解和分解含粘土的礦物所產生的气体压力,引起粘土团的膨脹。

制取有孔陶粒的最好原料是氧化鉄含量达 $8\sim 12\%$ 的易熔变种粘土。至少,氧化鉄的含量应为 5% 。作为有孔陶粒原料的粘土,当其含有密布腐植土狀的有机雜質时,即可大大提高其質量。在还原剂数量不足时,应当用热处理法,以保証材料中有充足的炭灰。

С. П. 奥納茨基的研究指出,生產有孔陶粒时热处理の漸進性(постепенность)会对最后的產品有坏的影响。在“國立水泥工業研究院”(Гипроцемент)的窑內所進行的試驗性的焙燒,完全証實了С. П. 奥納茨基的理論原理的正确性。

与苏联建筑科学院建筑技術研究所研究有孔陶礫生產方法的同时,中央河运科学研究所(在列寧格勒)也对有孔陶粒礫的基本工藝过程作了研究。以前,这方面的許多試驗工作,曾由Н. А. 勃勃夫(Н. А. Попов)教授,Л. Б. 米特加爾茨(Л. Б. Митгарц)副教授,М. З. 西蒙諾夫(М. З. Симонов)及其他等人領導進行。

1950年,联合了这两个研究所的力量,以探討利用列寧格勒

和莫斯科的粘土來制取有孔陶礫的方法。

在本著作中，闡明了這些研究的成果，研討了有孔陶粒的基
本性質，並規定了有孔陶粒的使用範圍。

有孔陶礫是當作輕集料來研究的。有孔陶礫的特性列於表 1。

有孔陶礫的特性

表 1

有孔陶粒名稱	每批 代 號	顆粒容重 (噸/立方公尺)	散粒容重 (噸/立方公尺)	有孔陶礫的吸水率%			
				在水中經過 下列時間		在塑性砂中經 過下列時間	
				10分鐘	30小時	10分鐘	24小時
列寧格勒有孔陶粒	0	0.66	—	4.1	10.2	3.0	5.1
	1	0.86	0.49	4.0	10.4	2.5	5.0
	2	1.07	0.62	4.1	9.7	—	—
	5	1.40	0.80	4.3	10.1	3.0	5.2
沃龍佐夫有孔陶粒	B	1.55	—	11	12	7.0	10.0
帕爾蘇科夫有孔陶粒(莫斯科)	П	0.52	—	8.0	10.0	6.0	7.5

在不同稠度的砂中，有孔陶礫的吸水率如圖 1 所示。

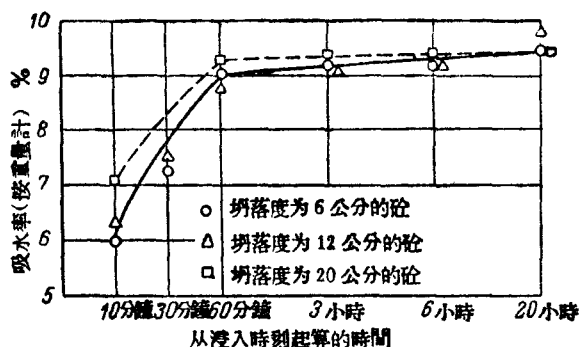


圖 1 有孔陶礫在砂中的吸水率與砂稠度之關係

有孔陶礫顆粒的大小：1 號為 16 公厘，2 號和 3 號為 13 公厘；
帕爾蘇科夫的為 20 公厘。

列寧格勒和帕爾蘇科夫的有孔陶礫是根據 С. П. 奧納茨基所
建議的工藝過程方案，在“國立水泥工業研究院”（列寧格勒）的密

內制造的。膠結材料系使用列寧格勒沃羅夫(Воров)工廠的矽酸鹽水泥。水泥的簡明指標列於表 2。

表 2

指 標	指 數
28 天齡期的抗压極限強度公斤/平方公分	350~400
1:3 砂漿經過 28 天齡期後在破壞時的極限強度 公斤/平方公分	26.0

每一組的試驗，應當用同一批水泥進行。

作評比試驗時，重集料採取最大顆粒度為 15 公厘的花崗岩碎石。有孔陶砂可由壓碎沃龍佐夫有孔陶礫來取得；部分亦可由焙燒帕爾蘇科夫粘土的橢圓體而取得。在列寧格勒和帕爾蘇科夫有孔陶礫的斷口上，有良好的細孔結構。

研究有孔陶粒的變形和強度時，系採取用以制作有孔陶粒的砂漿之性質和重集料之含量，來作為確定有孔陶粒性質的基本指標

$$r' = \frac{K}{\gamma_s},$$

式中：K——1 立方公尺砂中重集料的含量，以公斤計；

γ_s ——集料顆粒的平均容重，以公斤/立方公尺計；

r' ——砂中重集料的相對含量。

砂漿試件應與砂試件同時制作。

將 1 立方公尺砂的水泥、水和砂的用量，分別以 $1-r'$ 除之，即可得砂漿的配合比。重集料所吸收的水量應由總用水量中預先扣除。這樣，砂漿和砂的實際水灰比與砂漿的配合比都是一致的。因此，使用同一種水泥時，水泥石的性質也是一致的。

在進行試驗時，水灰比在 0.66 至 0.28 之間變動；水泥用量則在 250 至 700 公斤/立方公尺之間變動；坍落度則在 2 至 10 公分之間變動。在各種情況下，砂混合物都具有良好的塑性。澆築時應當用振動作業法，以保證砂的密實。砂試驗和適用於砂的砂漿的試

驗,应在同一天內進行,齡期为 2 至 260 天。

研究变形时採取 $10 \times 10 \times 20$ 公分的柱体,研究抗压極限强度时採取 $10 \times 10 \times 20$ 公分的柱体和 $10 \times 10 \times 10$ 公分的立方体。不用特別說明,試件应儲存在潮湿的地方。將尺寸各为 $10 \times 10 \times 20$ 公分、 $10 \times 10 \times 30$ 公分和 $7 \times 7 \times 21$ 公分的柱体作評比試驗,即可求得精確度达 $\pm 10\%$ 的曲綫 $\varepsilon = f\left(-\frac{\sigma}{R}\right)$ 。

用試驗确定的,試件自 $10 \times 10 \times 10$ 公分立方体換为标准立方体的換算系数,变动在 $0.90 \sim 0.95$ 的範圍內;自 $10 \times 10 \times 10$ 公分立方体換为 $10 \times 10 \times 20$ 公分柱体的換算系数,变动在 $0.95 \sim 0.97$ 的範圍內。

力学方面的基本試驗曾在 ЛИИЖТ 力学試驗室進行,著者对該試驗室的全体人員致以謝意。

一、有孔陶粒砼受压时的变形

(一) 有孔陶粒砼纵向变形与砂浆

和集料性质之关系

有孔陶粒砼受压时的变形与重砼受压时的变形比较起来具有某些特点。这些特点既与砼的极限压缩值有关；又与砼的变形①和其所用砂浆的变形之间的关系有关。圖 2 所示 系石英砂 砂浆的极限压缩与极限强度的关系。

当砂浆中使用粗集料时，则此种关系的性质就会发生变化。

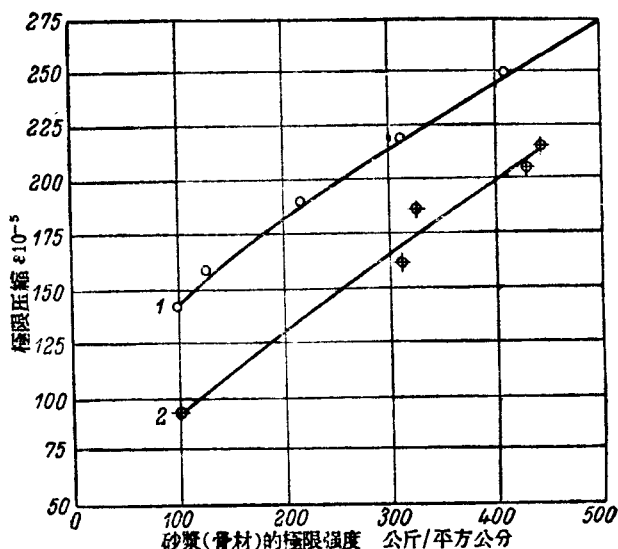


圖 2 重砼和砂浆的相对极限压缩与砂浆(骨材)极限强度的关系

1—砂浆； 2—花岗岩碎石

① 此处和以后所指的均系指相对变形而言。

表 3

混合物編號和齡期		受壓時的極限強度 (公斤/平方公分)		極限壓縮 $\varepsilon 10^{-5}$	
砂	漿	砂	漿	砂	漿
656—7	655—7	105	108	140	95
515—28	513—28	314	291	225	160
663—5	661—5	324	316	230	190
663—34	661—34	433	495	250	215
511—28	509—28	441	480	270	215

有孔陶粒砂及其所用砂漿的極限強度和極限壓縮
($10 \times 10 \times 20$ 公分的柱體, 保存在潮濕狀況下)

表 4

試件 編號	齡 期 (天)	砂 漿		用下列有孔陶粒制成的有孔陶粒砂							
		R (公斤/ 平方公 分)	εp 10^{-5}	0 號		1 號		2 號		3 號	
				R (公斤/ 平方公 分)	$\varepsilon 10^{-5}$	R (公斤/ 平方公 分)	$\varepsilon 10^{-5}$	R (公斤/ 平方公 分)	$\varepsilon 10^{-5}$	R (公斤/ 平方公 分)	$\varepsilon 10^{-5}$
656	5	105	140	—	—	—	—	—	—	—	—
613	7	150	160	—	—	107	160	—	—	116	160
650	12	154	—	—	—	120	—	—	—	—	—
613	28	190	180	—	—	154	180	—	—	176	180
616	6	210	190	—	—	153	190	—	—	187	190
658	4	214	190	145	190	—	—	167	180	—	—
648	3	286	—	—	—	193	190	—	—	—	—
616	30	312	220	—	—	210	190	—	—	278	220
648	7	420	250	—	—	248	210	—	—	—	—
658	14	413	250	206	170	—	—	300	230	—	—
658	28	480	270	230	180	—	—	357	240	—	—
602	12	500	260	—	—	266	210	—	—	—	—
605	9	505	235	—	—	247	200	—	—	418	285
658	60	520	280	236	170	—	—	—	—	—	—
605	30	640	310	—	—	286	190	392	230	470	270
605	120	670	300	—	—	—	—	—	—	493	270
675	140	600	—	220	—	—	—	400	230	—	—

当採用花崗岩碎石作为集料时,与砂漿强度成为函数的砂極限压缩值,由曲綫 2 (圖 2) 和表 3 的数据來决定。由極限压缩即可得知破坏时的縱向受压值。

曲綫 1 和 2 的相互位置,表示砂漿極限压缩的增加不断地引起重砂極限压缩的增加,而最后砂漿的極限压缩則略有减少,对有孔陶粒砂來說,这一关系还有另外的性質(圖 3 和表 4)。有孔陶粒砂的極限压缩在达到一定的数值时就停止繼續增長,但是,此时砂漿極限压缩的增長仍繼續着。

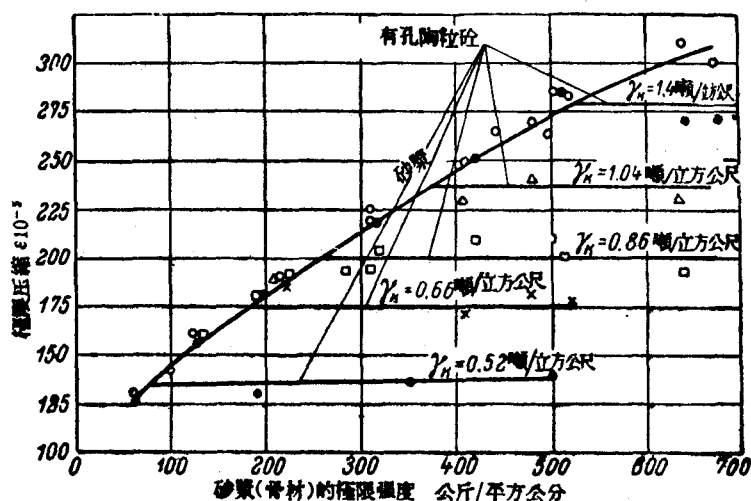


圖 3 砂漿和有孔陶粒砂的相对極限压缩与砂漿的極限强度和有孔陶粒顆粒容重 γ_k 之关系

對於每一种集料來說,砂的最大極限压缩值是各不相同的(表 5)。在使用同一种原料制作有孔陶粒的情况下,有孔陶粒的顆粒容重与砂最大極限压缩成正比例。

用各种輕集料制成的砂,具有一定的最大極限压缩值。这种情形是有孔陶粒砂受压时变形的第一个特点。考慮到这个特点,就可以把有孔陶粒砂变形特性的变化过程,分为两个阶段:在第一阶段中,砂漿極限压缩的增長,引起用此砂漿制成的有孔陶粒砂極限压

表 5

有孔陶粒 名 稱	顆 粒 容 重 (噸/立方公尺)①	最大極限壓縮 $10^{-5}\varepsilon_{\max}$	$\varepsilon=\varepsilon_{\max}$ 時, 石英砂 砂漿的極限強度 (公斤/平方公分)
П	0.52	140	—
0	0.66	176	200
1	0.86	200	260
2	1.04	235	375
3	1.40	280	540

縮的增長;在第二階段中,這一增長則顯示不出來。

試驗證明,用各種不同顆粒的混合物制成的有孔陶粒的極限壓縮,等於用那種極限壓縮最小的有孔陶粒制成的有孔陶粒的極限壓縮。例如:若採用 50% 1 號 ($\gamma_k=0.86$ 噸/立方公尺) 和 50% $\gamma_k=1.4$ 噸/立方公尺的有孔陶粒的混合物作為粗集料,那麼有孔陶粒的極限壓縮就等於用 $\gamma_k=0.86$ 噸/立方公尺的有孔陶粒制成的有孔陶粒的極限壓縮(圖 4)。

變形的第二個特點,就是在第一階段內砂漿和用此砂漿制成的有孔陶粒的極限壓縮相等。這個規律,已為用各種不同的集料和水泥所進行的許多試驗所証實。這些試驗的部分結果見圖 3②。

有孔陶粒變形的第三個特點,就是當相應應力相等時,有孔陶粒和其所用砂漿試件的變形亦相等,即是若:

$$\frac{\sigma}{R} = \frac{\sigma_p}{R_p},$$

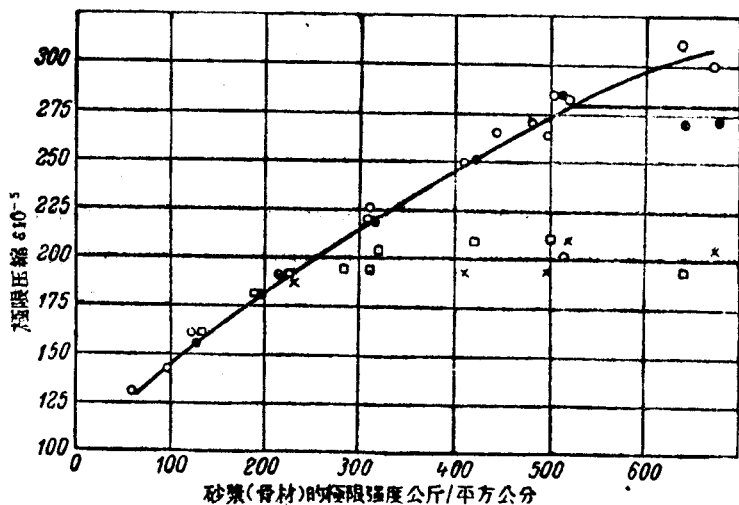
則

$$\varepsilon = \varepsilon_p。$$

當然,這個特點僅在輕的極限壓縮達到所用集料的最大值時才發生,即是說這是對第一個階段而言。

① 原文為公斤/立方公尺,按圖 3 應為噸/立方公尺——譯者註。

② 原文為圖 2,按文意系指圖 3——譯者註。



- 用 $\gamma_k = 1.4$ 噸/立方公尺的有孔陶粒制成的有孔陶粒砂
- 用 $\gamma_k = 0.86$ 噸/立方公尺的有孔陶粒制成的有孔陶粒砂
- × 用上面兩種有孔陶粒混合物制成的有孔陶粒砂
- 砂漿

圖 4 用各種不同顆粒容重的有孔陶粒混合物制成的有孔陶粒砂的極限壓縮

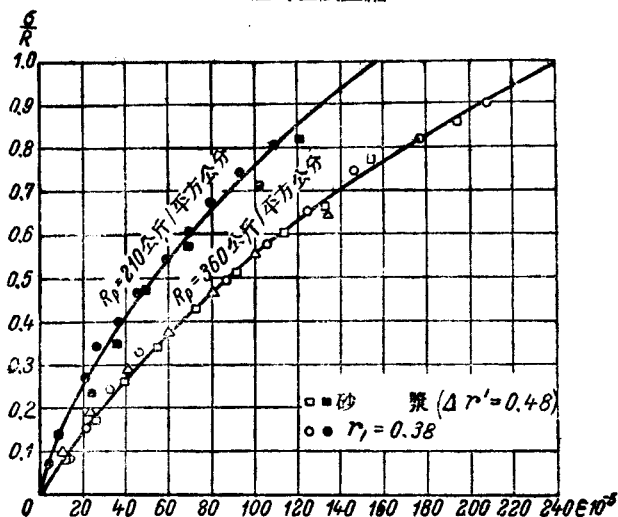


圖 5 有孔陶粒砂和砂漿受壓時的相對縱向變形與相應應力之關係
砂漿的極限強度 $R_p = 210$ 公斤/平方公分和 $R_p = 360$ 公斤/平方公分，
石英砂，沃龍佐夫有孔陶粒

研究时所得到的有关砂浆和用此砂浆制成的有孔陶粒砼的一些曲线 $\varepsilon = f\left(\frac{\sigma}{R}\right)$, 表示于图 5、6、7、8。图 5 和 6 是属于用沃龙佐

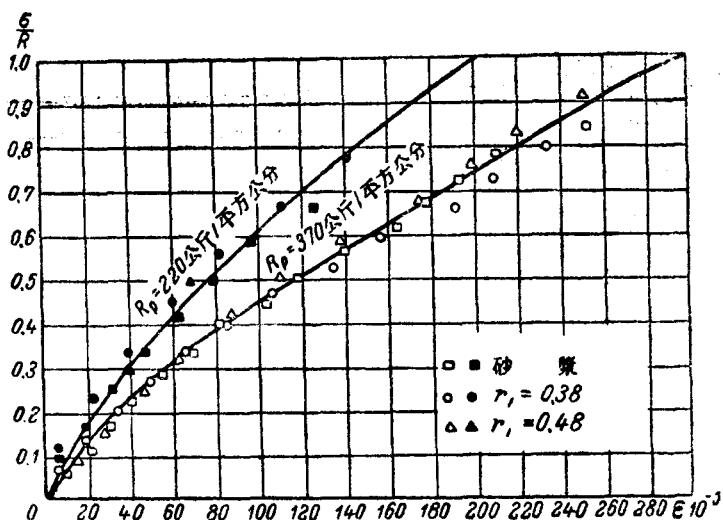
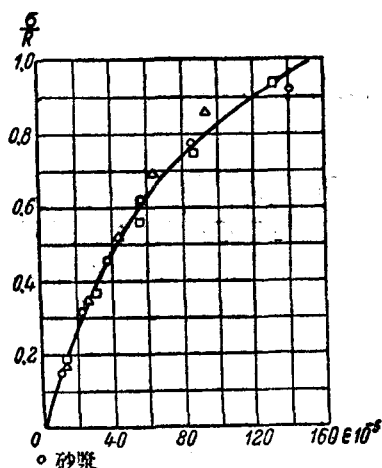


图 6 有孔陶粒砼和砂浆受压时的相对纵向变形与相应应力之关系
砂浆的极限强度 $R_p = 220$ 公斤/平方公分和 $R_p = 370$ 公斤/平方公分,
有孔陶砂, 沃龙佐夫有孔陶礫

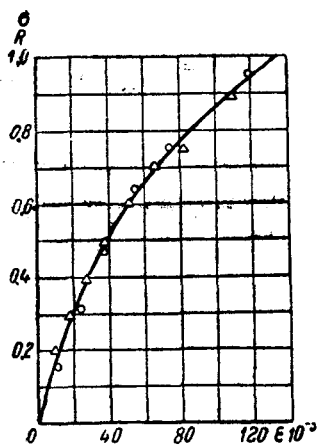
夫工厂的有孔陶礫制成的砼, 它的 $r' = 0.38$ 和 0.48 (表 6); 图 7 是属于当其 $r' = 0.38$ 固定不变时, 各种不同容重的列寧格勒有孔陶礫; 图 8 是属于帕尔苏科夫有孔陶礫 (表 4)。用沃龙佐夫有孔陶礫制成的柱体的試驗, 是随着剩余变形的消失而進行的; 用列寧格勒和帕尔苏科夫有孔陶礫制成的柱体的試驗, 是在当不断增加荷載且其变形並不恢复为零时進行的。

图 5~8 中所繪各点的位置, 表示有孔陶粒砼和砂浆的变形在第一阶段內, 是由同一条曲线确定的, 此曲线既不随輕集料的含量而变 (图 5 和 6); 也不随其容重而变 (图 7)。由試驗确定, 这个不变性是当用有孔陶砂和石英砂制成的砂浆的强度, 在 65 至 650 公斤/平方公分的范围內变化时才存在, 这变化, 正符合於有孔陶粒砼的强度变化自 50 至 500 公斤/平方公分。但这不变性僅在第一階



○砂漿
△用有孔陶粒($\gamma_K=1.40$)制成的有孔陶粒砂
□用有孔陶粒($\gamma_K=0.86$ 噸/立方公尺)制成的有孔陶粒砂

圖7 有孔陶粒砂和砂漿受壓時的相對縱向變形與相應應力之關係。砂漿的極限強度 $R_p=130$ 公斤/平方公分。列寧格勒有孔陶礫，石英砂， $\gamma'=0.38$



○砂漿
△有孔陶粒砂($R=50$ 公斤/平方公尺)

圖8 有孔陶粒砂和砂漿受壓時的相對縱向變形與相應應力之關係。砂漿的極限強度 $R_p=62$ 公斤/平方公分。帕爾蘇科夫有孔陶礫($\gamma_K=0.52$ 噸/立方公尺)。有孔陶砂。 $\gamma'=0.38$

砂漿和用此砂漿制成的有孔陶粒砂的極限強度(對於圖5和6)。

沃龍佐夫有孔陶礫

表6

試件編號	砂的種類	γ'	受壓時的極限強度 公斤/平方公分	
343, 342	石英砂	砂漿	210	360
346, 345	石英砂	0.38	145	270
349, 348	石英砂	0.48	117	218
381, 384	有孔陶砂	砂漿	220	370
382, 385	有孔陶砂	0.38	180	300
383, 386	有孔陶砂	0.48	140	250

段內才存在。

有孔陶粒砂變形的曲線表示於圖9(表7),這些曲線明顯地