

陶粒混凝土及其在桥梁上的应用

張樹仁 編譯

人民交通出版社

陶粒混凝土及其在桥梁上的应用

張樹仁 編譯

人民交通出版社

011266

本書系根据国外新近研究資料和实践成果編譯而成，較全面地敘述了陶粒混凝土的主要物理力学性能；对陶粒鋼筋混凝土和預应力陶粒混凝土桥跨結構的制造工藝过程及其試驗結果，都作了較詳細的介紹。

本書可作为公路工程技術人員，大专学校师生以及从事桥梁科学研究工作参考。

陶粒混凝土及其在桥梁上的应用

张树仁 編譯

*

人民交通出版社出版

(北京安定門外和平里)

北京市書刊出版业營業許可証出字第〇〇六号

新华书店北京发行所发行 全国新华书店經售

人民交通出版社印刷厂印刷

*

1964年9月北京第一版 1964年9月北京第一次印刷

开本：787×1092 $\frac{1}{32}$ 印張：2 $\frac{3}{4}$ 張 插頁3

全書：42,000字 印數：1—2,500册

統一書号：15044·1481

定价(科六)：0.32元

目 录

一、概述	3
二、陶粒混凝土的物理力学性质	5
(一) 陶粒混凝土的配合比及其容重	5
(二) 陶粒混凝土的强度特征	7
1. 陶粒混凝土强度增长规律	8
2. 陶粒混凝土的抗压强度	9
3. 陶粒混凝土的抗拉强度	13
(三) 陶粒混凝土的变形性质和弹性模量	14
(四) 陶粒混凝土的组成对其强度特征和变形性质的影响	15
1. 用水量的影响	16
2. 水泥用量的影响	17
3. 陶粒容重的影响	18
4. 骨料体积比(陶粒/砂)的影响	20
5. 陶粒用量的影响	20
6. 陶粒混凝土期龄的影响	21
7. 结论	21
(五) 陶粒混凝土的收缩和徐变特性	23
三、陶粒混凝土在桥梁上的应用	32
(一) 陶粒钢筋混凝土桥跨结构	32
1. 试验梁的制造工艺	33
2. 试验梁的静力试验	33
3. 裂缝的形成	37

4. 桥梁的动力試驗	37
5. 几点結論	39
(二) 装配整体式槽形截面預应力陶粒混凝土桥跨 结构	40
1. 桥跨结构的构造	40
2. 試驗梁的靜力試驗研究	44
3. 桥梁的动力試驗	50
4. 几点結論	54
(三) 預应力陶粒混凝土在城市跨綫桥中的应用	55
1. 桥跨结构的构造	55
2. 預应力陶粒混凝土梁的制造工艺	57
3. 試驗梁的靜力試驗研究	60
参考文献	63

一、概 述

陶粒混凝土是由人造的輕质骨料——燒結陶粒、石英砂（或碎陶粒）和水泥膠結材料所組成的。

燒結陶粒就是將含有有机雜質和具有膨脹性質的粘土質岩類（頁岩、粘土、砂質粘土或黃土）團成小球，在 $1050\sim 1250^{\circ}\text{C}$ 的高溫下迅速煅燒而形成多孔結構的輕質而堅硬的骨料。

陶粒按其容重可分為二種：

（1）輕陶粒，松散容重為 $400\sim 600$ 公斤/米³，顆粒抗壓強度為 $25\sim 100$ 公斤/厘米²。

（2）重陶粒，松散容重為 $700\sim 800$ 公斤/米³，顆粒抗壓強度為 $50\sim 200$ 公斤/厘米²。

目前在蘇聯利用工廠生產的陶粒可以製成200~400號的陶粒混凝土，其容重為 $1600\sim 2000$ 公斤/米³。這種陶粒混凝土很適合建造道路橋梁及某些水工結構物。

在橋跨結構中採用陶粒混凝土的主要優點是：

（1）陶粒混凝土是一種輕質高強度的材料，容重小，强度高。這對於靜荷載影響較大的橋跨結構來說是很重要的。

在陶粒混凝土梁式橋跨結構中，結構自重比一般混凝土者約減少35~25%，計算內力也相應的降低了。由於計算內力的降低，受力鋼筋面積減小，因而節省了鋼筋用量，比如：對20~30米跨徑的橋梁，可節省鋼材12~15%；對40米跨徑的橋梁，可節省鋼材達20%。一般說來，用陶粒混凝土時，其標號比普通重混凝土可降低20%。

在超靜定結構——剛架橋和拱橋中，採用陶粒混凝土還有更大的作用，由於靜載和彈性模量的降低，使得所用陶粒混凝土的標號比普通重混凝土可降低一半，節約鋼材達30%，同時還可節省相當數量的水泥。

(2) 採用陶粒混凝土能更好的利用當地的便宜材料——粘土。為不產砂石地區建造鋼筋混凝土橋梁提供了良好的條件。採用陶粒混凝土可以減少原材料和混凝土制件繁重的運輸工作，因此可降低混凝土的成本，對國民經濟具有很大的意義。

關於陶粒混凝土的研究工作在國外很早就開始了。美國1936~1937年在舊金山附近建造一座長6261米、寬20米的懸索橋，橋面採用了陶粒混凝土。1949年在涅列烏芝海峽建造了一座三跨的懸索橋，全長1822米，寬18米，橋面也採用了陶粒混凝土。

美國又於1952年在工廠試製了鋪設橋面用的預應力陶粒混凝土板（ $10.7 \times 10.0 \times 0.475$ 米），所用陶粒混凝土的強度為316公斤/厘米²，容重為1700公斤/米³。1955年又建造了跨長21米的裝配式預應力陶粒混凝土公路橋，梁高為1.35米，混凝土強度為335公斤/厘米²，容重為1648公斤/米³，應力損失達 $0.28 \sigma_p$ ，橋面板採用裝配式的陶粒鋼筋混凝土板（長4.2米，寬1.9米和2.78米、厚15厘米），混凝土標號為250公斤/厘米²，板內配置一般的焊接鋼筋網。

蘇聯莫斯科公路學院結構教研室在И.Г.伊萬諾夫、加特洛夫教授的領導下，從1954年開始對高標號陶粒混凝土的物理力學性質及配置低合金鋼筋及預應力鋼筋的陶粒混凝土結構進行了大量的研究工作。

蘇聯已有專門生產陶粒的工廠，陶粒的生產成本在技術熟練的工廠中為每立方米4~8盧布。蘇聯運輸建築部門有一種燒

結陶粒的流动式設備，其生产能力为每年一万二千立方米，其生产成本为每立方米6.6卢布。

苏联从1957年开始将陶粒混凝土应用于交通人工构造物中，开始是用在試驗性的结构中，后来用在实际使用的结构中。苏联公路工程总局、全苏道路科学研究院、莫斯科公路学院等十几个单位合作，建造了一系列的陶粒混凝土桥跨结构，并进行了靜載和动載試驗。

其中主要的有用陶粒混凝土建造的跨长7.5米和10米的試驗桥，用預应力陶粒混凝土建造了跨长11.1米、19.3米、21.9米的試驗梁。1960~1961年建造了一座跨长为16.13米+3×22.80米+16.13米的装配整体式槽形截面預应力陶粒混凝土桥。1962年在莫斯科修建了一座四跨的城市跨綫桥（跨长为25米），其中有一跨采用先张法制造的預应力陶粒混凝土T形梁。

通过試驗桥和实际使用桥梁的試驗結果，証明陶粒混凝土桥梁具有足够的强度和刚度，且有很高的抗裂能力和耐久性。

二、陶粒混凝土的物理力学性質

(一)陶粒混凝土的配合比及其容重⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

在陶粒混凝土中用做粗骨料的陶粒，其粒径一般为10~20毫米，容重为500、700、900公斤/米³，最大顆粒强度相应不小于50、100、180公斤/厘米²，如上述粒径的强度小于要求的数值时，可以采用較小粒径的陶粒（采用上述粒径下限——10毫米），其强度可以提高1.5~2倍。

細骨料根据出產和成本的情况，可以采用普通的石英砂，也可以采用碎陶粒（陶粒砂）。在工厂实际生产陶粒中，小于5毫米的顆粒約占30~60%，可以直接利用这种陶粒做为骨料，然后再用石英砂来調整其配合比。水泥一般采用400~500号，每立方米混凝土中水泥用量为400~500公斤，水灰比一般采用0.4~0.5。根据各工厂所生产陶粒的具体情况，陶粒混凝土配合比一般是在实验室内由試驗的方法确定，其参考值見表1和表2。

陶粒混凝土体积配合比
(1957年莫斯科公路学院資料)

表 1

混凝土标号 R_7 (蒸)	水泥用量 (500号) (公斤)	陶 粒			砂用量(米 ³)		水灰比 B/H	陶粒混凝土容重 (公斤/米 ³)	用途
		粒 径 (毫米)	容重 (公斤/米 ³)	用 量 (米 ³)	容重为 700~ 800公斤 /米 ³ 的 陶粒砂	石英砂			
35	150~170	10~40	260	1.10	0.25~0.30		0.50~0.55	800~950	砌牆塊件
50	160~180	10~40	260~300	1.00	0.40~0.50		0.55~0.66	900~1000	砌牆塊件
75	190~210	10~30	350~400	1.05~1.10	0.50~0.52		0.55~0.66	1100~1200	砌牆塊件
100	220~230	5~30	400~450	1.00~1.05	0.55		0.52~0.55	1250~1350	砌牆塊件
150	260~280	5~20	500~550	0.95~1.00		0.43	0.52~0.55	1500~1550	結構
200	310~340	5~20	550~600	0.90		0.46	0.52	1650~1700	結構
300	360~400	5~15	600~700	0.90		0.48	0.52	1750~1800	結構
400	450~480	5~15	600~700	0.85		0.50	0.50	1850~1900	結構

附注： R_7 (蒸)代表蒸汽养护7天以后的强度。

陶粒混凝土重量配合比
(1962年莫斯科公路学院资料)

表 2

陶粒混凝土的容重 (公斤/米³)	重 量 配 合 水						水灰比	强 度 (公斤/厘米²)
	水 泥		石英砂		陶 粒			
	标 号 (公斤/厘米²)	用量 (公斤)	容 重 (公斤/米³)	用量 (公斤)	容 重 (公斤/米³)	用量 (公斤)		
1400~1600	400~500	400~500	1400~1500	600~700	400~600	325~385	0.4~0.5	150~250
1600~1800	400~500	400~500	1400~1500	600~700	600~800	450~552	0.4~0.5	250~350
1800~2000	400~500	400~500	1400~1500	600~700	800~1000	600~650	0.4~0.5	350~450

陶粒混凝土的容重一般为1600~2000公斤/米³，用陶粒做粗骨料，用石英砂或石英砂与陶粒砂混合物做细骨料的陶粒混凝土的计算容重可按表 3 取用。但用陶粒砂做细骨料的陶粒混凝土的计算容重比表 3 中数值小100公斤/米³。

表 3

陶粒容重 (公斤/米 ³)	各种标号陶粒混凝土的计算容重(公斤/米 ³)						
	100号	150号	200号	250号	300号	350号	400号
500~600	1500	1600	1600	1700	—	—	—
600~700	1600	1700	1700	1800	1900	1900	—
700~900	—	—	1800	1900	2000	2000	2000

(二)陶粒混凝土的强度特征 [1][2][3]

陶粒混凝土的强度特征在很大程度上取决于它的变形性质和结构特性。

由于陶粒的孔隙具有吸收水泥浆和吸收骨料之间多余水分

的能力，因而改善了水泥石和混凝土的结构，使水泥石如同箍圈一样，紧紧的箍在低强度陶粒的周围。水泥石的强度提高了，水泥石与骨料之间的粘着力也提高了。因此就可利用低强度的骨料——陶粒，而制得高标号的混凝土。陶粒的强度比重骨料——砾石的强度低10~20倍，但陶粒混凝土的水泥用量仅比同一标号的普通重混凝土的增加20~30%。

1. 陶粒混凝土强度增长规律

陶粒混凝土的强度与绝对用水量有很大的关系，用水量过多或过少均会使陶粒混凝土强度降低。此外还与振捣的密实程度有关。

一般说来，陶粒混凝土强度增长的规律符合保罗米公式：

$$R_0 = KR_n \left(\frac{U}{B} - A_0 \right)$$

式中： R_n ——水泥标号；

$\frac{U}{B}$ ——灰水比；

K ——经验系数，取 $K=0.4$ ；

A_0 ——经验系数，取 $A_0=0.25$ 。

陶粒混凝土蒸汽养护7天后的强度与水泥标号、水灰比及粗骨料的强度有关。

对用陶粒砂做细骨料的陶粒混凝土：

$$R_{7(\text{蒸})} = \frac{0.3a R_n \left(\frac{U}{B} - 0.4 \right) + (1.25 \sim 2.0) R_s (100 - a)}{100}$$

对用石英砂做细骨料的陶粒混凝土：

$$R_{7(\text{蒸})} = \frac{0.4a R_n \left(\frac{U}{B} - 0.4 \right) + (1.5 \sim 2.5) R_s (100 - a)}{100}$$

式中: $R_7(\text{蒸})$ ——蒸汽养护7天后的强度;

a ——粗骨料的孔隙度%;

R_u ——水泥标号;

R_a ——陶粒颗粒的抗压强度。

系数 (1.25~2.0) 和 (1.5~2.5) 表示陶粒颗粒在混凝土中所提高的强度。

结构实际受力的时间一般不早于90天, 这时陶粒混凝土的强度 $R_{90} = 1.33R_7(\text{蒸})$ 。

陶粒混凝土的强度随时间增长的关系曲线如图1所示。

2. 陶粒混凝土的抗压强度

陶粒混凝土按其立方体抗压强度 (标号) 大致可分为35、50、75、100、150、200、250、300、350、400号, 对陶粒钢筋混凝土桥跨结构一般采用150、200、250、300号; 对预应力陶粒混凝土桥跨结构一般采用200、250、300、400号。

对150~400号陶粒

混凝土立方体试件进行抗压试验时, 其破坏一般是既通过混凝土的砂浆部分, 也通过陶粒的垂直面。所以这样破坏是因为陶粒混凝土砂浆部分 (水泥石) 的强度经常大于陶粒本身的强度。

陶粒混凝土的立方体强度是用 $20 \times 20 \times 20$ 厘米的标准试件

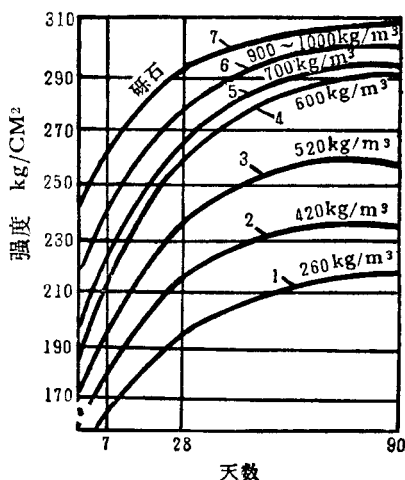


图1 陶粒混凝土强度增长规律曲线
(所用陶粒的容重如上图所示)

測得的，也可以用 $10 \times 10 \times 10$ 厘米和 $15 \times 15 \times 15$ 厘米的立方體試件進行試驗，這時應乘以相應的標準試件的換算系數。莫斯科公路學院對陶粒混凝土的上述系數的數值進行了換算（見表4）。

最近蘇聯一些單位所進行的普通重混凝土和輕質混凝土的試驗證明，考慮試件尺寸的換算系數不符合蘇聯國家標準6901-54的規定，但是對於最終的建議來說應該進行關於確定這些系數的補充試驗工作，這樣確定之後便可以消除某些人為地提高混凝土實際標號的現象，因而可以收到顯著的經濟效果，今後在未確定這些換算系數之前，可以按表4採用具有一定安全因素的換算系數。

表 4

試件尺寸 (厘米)	換 算 系 數				
	普通重混凝土		陶 粒 混 凝 土		
	蘇 聯 國家標準 6901-54	根據Г.Н. 比山科的 試 驗	根據莫斯 科公路學 院的試驗*	莫斯科公路學院推薦的數值	
				150號以下	150~400號
$20 \times 20 \times 20$	1.00	1.000	1.000	1.000	1.00
$15 \times 15 \times 15$	0.90	1.039	1.030	1.000	0.95
$10 \times 10 \times 10$	0.85	1.100	1.050	1.000	0.90

* 四組的平均值（每組為6個試件）。

陶粒混凝土的柱體強度比同一標號的普通重混凝土的柱體強度要高，一般情況下陶粒混凝土的柱體強度大於 $0.8 R$ 立方體強度（見圖2），從理論上可以這樣解釋：縱向受壓柱體的破壞通常是由於在橫向達到混凝土的抗拉極限而引起的，在陶粒混凝土中抗拉極限比普通重混凝土大一倍。

苏联Д.Н.阿格也夫和Р.О.克拉夫諾夫斯基工程师对 $10 \times 10 \times 30$ 厘米、 $15 \times 15 \times 45$ 厘米和 $20 \times 20 \times 80$ 厘米的柱体試件共进行了86个軸向受压試驗，其試驗結果如表5所示：

表 5

陶粒容重 (公斤/米 ³)	陶粒混凝土的 容重(公斤/米 ³)	柱体强度系数(R_{np}/R)
400~600	1400~1600	$\frac{0.57 \sim 0.99}{0.765}$ *
600~800	1600~1800	$\frac{0.64 \sim 1.00}{0.895}$
800~1000	1800~2000	$\frac{0.76 \sim 1.14}{0.950}$

* 分子表示 R_{np}/R 的最小值和最大值；分母表示所有試件的算术平均值。

全苏道路科学研究院В.И.卡里諾維穆工程师所进行的試驗結果如图2所示： $\frac{R_{np}}{R}$ 的平均数值，对陶粒混凝土來說比

普通重混凝土大15%。

綜合分析全苏道路科学研究院、莫斯科公路学院等单位的試驗資料(图3)考虑到各个試驗結果是很不稳定的，可以建議将其平均值

$\frac{R_{np}}{R} = 0.8$ 列入計算规范。

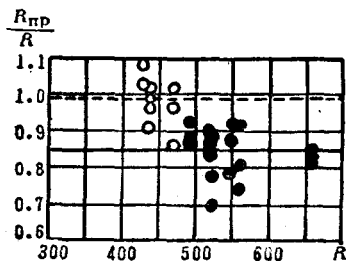


图2 В.И.卡里諾維穆的試驗資料
○—陶粒混凝土；●—普通重混凝土

为了測定陶粒混凝土构件受弯时的抗压强度 R_n ，莫斯科公路学院对 $L_p=590$ 厘米， $b=16$ 厘米和 $h=60$ 厘米的梁(七个)及 $L_p=180$ 厘米， $b=10$ 厘米， $h=30$ 厘米的梁(四个)进行了受弯試驗，梁的配筋率变化在0.25~2.25%之間，試驗結

果列于表 6。

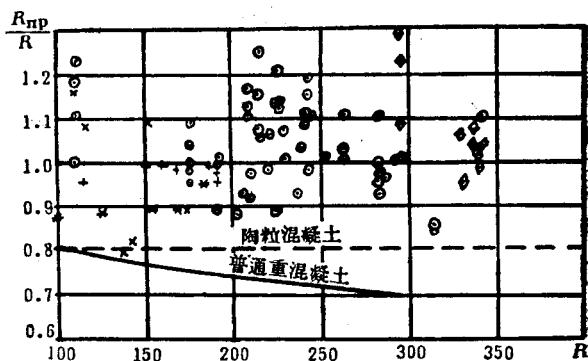


图 3 R_{np}/R 的試驗資料

⊙-全苏道路科学研究院庫拉索娃的試驗資料；◇-全苏道路科学研究院果尔諾夫的試驗資料；+ -莫斯科公路学院的試驗資料；×-苏联道路設計院試驗資料；* -西莫諾娃的試驗資料

表 6

每組試件編號	陶粒混凝土 土标号 R (公斤/厘米 ²)	柱体强度 (理論值) (公斤/厘米 ²)	受弯时的抗压 强度 R_{np} (公斤/厘米 ²)	$\frac{R_{np}}{R}$	$\alpha = \frac{X}{h_0}$
1231	180	144	140	0.78	0.51
1431	180	144	152	0.85	0.52
1331	237	191	162	0.68	0.48
1531	237	191	178	0.75	0.51
4*	240	192	213	0.89	0.37
5*	300	240	211	0.70	0.42
6*	300	240	248	0.83	0.34
7*	260	208	229	0.88	0.35
8*	310	248	253	0.82	0.36
11*	250	200	225	0.90	0.32
12*	250	200	218	0.87	0.30

上述試驗結果表明沿受压区破坏之前的应力图形为三角

形。邊緣纖維应力值比立方体的强度高得多。

而按苏联混凝土及鋼筋混凝土結構設計标准及技術规范 (Н и ТУ123-55) 中规定的公式:

$$R_n = \frac{M_p}{bX(h_0 - 0.5X)}$$

式中: M_p —— 实际破坏弯矩;

X —— 試驗中测出的受压区高度。

按上式换算 R_n 时, R_n 的有效值接近 R_{np} 。同时考虑到这两种情况建議在計算受弯和偏心受压时的抗压强度采用 $R_n = R$ 。

3. 陶粒混凝土的抗拉强度

陶粒混凝土中心受拉强度比普通重混凝土稍有提高。莫斯科公路学院曾对六个 $10 \times 10 \times 80$ 厘米的 135~220 号陶粒混凝土試件进行了軸向抗拉試驗, 試驗所测得的中心抗拉强度 R_p 变动在 $14.0 \sim 15.2$ 公斤/厘米² 的范围内。

从梁的受弯試驗中表明, 陶粒混凝土受弯时的抗拉强度 R_{pn} 与中心受拉强度 R_p 之比 $\frac{R_{pn}}{R_p} = 1.600 \sim 1.845$, 根据苏联混凝土及鋼筋混凝土結構設計标准与技術规范 (Н и ТУ123-55) 普通重混凝土受弯时的抗拉强度与中心受拉强度之比值 1.7, 在陶粒混凝土中这一数值基本上沒有改变。

計算陶粒混凝土桥跨結構时, 抗拉极限强度采用与普通重混凝土同样的数值, 仅对經常处于水下的結構可以提高 15%。

各种标号陶粒混凝土的标准强度和計算强度可按表 7 参考采用。

应力状态	慣用 符号	陶粒混凝土的标号							
		35	50	75	100	150	200	300	400
中心受压 (柱体强度) (公斤/厘米 ²)	R_{np}^H	32	45	65	85	125	160	230	300
	R_{np}^P	19	27	39	51	81	107	150	200
受弯时受压 (公斤/厘米 ²)	R_H^H	35	50	75	100	150	200	290	375
	R_H^P	21	30	45	60	98	130	190	240
中心受拉 (公斤/厘米 ²)	R_p^H	5	6	8	12	15	18	25	26
	R_p^P	2.2	2.7	3.6	5	7	10	12	13.5
受压弹性模量 (計算值 × 1000) (公斤/厘米 ²)	E_{σ}^H	60	70	95	120	160	210	250	300
	E_{σ}^P	40	50	60	84	120	150	200	240

附注: R^H ——标准强度; R^P ——計算强度。

(三) 陶粒混凝土的变形性质和弹性模量^[2]

陶粒混凝土的变形性质与普通重混凝土有很大差别, 普通重混凝土抗拉极限变形的变化范围为0.05~0.3毫米/米, 而陶粒混凝土则为0.12~0.59毫米/米, 由此可见陶粒混凝土的抗拉极限变形范围上下限都比普通重混凝土的上下限高一倍。

陶粒混凝土的抗压极限变形随陶粒混凝土标号的提高而增加, 而普通重混凝土对所有各种标号采用同一个数值(2毫米/米)。陶粒混凝土抗压极限变形 ε_{max} 的数值与陶粒混凝土标号的关系见表 8。

陶粒混凝土的弹性模量比普通重混凝土要小, 在同一应力作用下, 陶粒混凝土柱体的纵向变形比普通重混凝土的纵向变形平均大30%, 而横向变形平均大60~70%, 因而陶粒混凝土