



吳山廟砂桩基础石拱桥

浙江省交通厅 編

人民交通出版社

內 容 提 要

石拱桥一般都是選擇在較硬的地基上修筑的。浙江省試用砂桩处理軟土地基修筑了一座石拱桥，效果良好，为擴大石拱桥的使用范围創造了經驗。

書中介紹了砂桩和垫層的布置与施工，沉降观测資料及不均匀沉降对拱圈的影响，地基土質試驗資料，以及修筑这种桥的經濟比較。

吳山庙砂桩基礎石拱桥

浙江省交通厅 編

*

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

新华书店科技发行所发行 全国新华书店經售

人 民 交 通 出 版 社 印 刷 厂 印 刷

*

1960年7月北京第一版 1960年7月北京第一次印刷

开本：787×1052毫米 印張：4張

全書：12000字 印數：1—2500册

統一書号：15044·1423

定价(0)：0.08元

前 言

吳山庙桥是一座修建在砂桩基础上的石拱桥，为本省宁波区公路运输局修建。该桥为一孔，净跨6.00米，位于宁波至曹娥公路上，桥位有残存老桥桩基础，經拔除后重打砂桩，新建了石拱桥。

用砂桩处理軟土地基修建石拱桥，在我省是第一次，由于石拱桥对地基承载力的要求比一般簡支梁式桥高，且对不均匀沉陷有严格的控制，因此对軟土地基用砂桩来处理，如何能达到質量要求，保証拱圈的整体性不产生裂縫是首要問題。通过这座桥的修建，观察工程效果，观察沉降，进行分析研究，探討其可能性，将为扩大石拱桥的使用范围創造条件。現桥已建成通车，情况良好，作出初步总结，为进一步提高砂桩基础質量、修建較大孔径的石拱桥打下基础。

一、桥基土質試驗資料

在桥台基底标高（地面下1.2米）取原状土壤进行了試驗，其結果詳見附表1。

土質是砂質粘土，天然含水量达飽和状态。稠度指数 $B(1.1)$ 大于1，成流动状态，承載能力很小，孔隙比 $e(1.1)$ 大于1，可压缩性很大，根据剪力（快剪）試驗結果的数据，参照 HNTy 127-55 规范計算地基上的平均允許压力，在基底标高处：

$$P_{1/3} = (A_1 b^1 + B h) r + D \cdot C^H = (0.675 \times 3.12 + 3.0 \times 1.2) \times 0.9 + 5.5 \times 0.3 = 6.9 \text{ 吨/平方米} = 0.7 \text{ 公斤/平方厘米}$$

同样計算在基底下2.0米深处

$$P_{1/3} = 1.2 \text{ 公斤/平方厘米}$$

在基底下2.0米深处做实地荷載試驗达到破坏应力

$$P_K = 15 \text{ 公斤/平方厘米}$$

取安全系数2，則其允許压应力为0.75公斤/平方厘米。在这次試驗中，荷載板用 70.7×70.7 厘米，加荷物用石块，未能保持加載平衡，产生偏心破坏作用，所得結果是不够确切的，小承板的結果对实际建筑物是偏于安全的。

从打砂桩鋼套管及钎探中，基底2.5米以下，有一厚度从0到2米的較硬土层（見图1），厚度不一，再下去則見軟粘土。

二、砂桩和垫层的布置和施工

上部结构传至桥台基底的压力，在静载情况下，最大压应力为 1.87 公斤/平方厘米，当静载加活载的情况下，最大压应力达 2.23 公斤/平方厘米，计算基底下应力的分布在基底下 2.5 米深处，基底中心点的位置 0 点， $\sigma_0 = 1.55$ 公斤/平方厘米，而该处土壤的允许承压力计算为 1.36 公斤/平方厘米，不能达到设计要求，须进行加固，另一方面建筑物的沉降是一个控制因素，计算基底 2.5 米以下的最终下沉值为 2.22 厘米，其数值很大，因此下卧层的加固更为必要，从以上计算的数据及基底土质的情况以及考虑到设备条件等，采用 2.5 米厚砂垫层、3.5 米长的砂桩（原来设计 2.0 米砂垫、4.0 米砂桩由于硬层存在而改变）。掌握土层的厚度约等于基底宽度的 2 倍，由于在此范围内压缩量很大，对砂桩的作用，按排水砂井来考虑间距 1.00 米 (4D)，对砂桩的桩径、长度和间距缺乏理论的计算和分析，是参考铁路地基试验的资料而选用的。

砂桩施工

每个桥台打砂桩 53 根，两台共打 106 根。由于是初次应用，在打桩过程中是边摸索边改进，在开始时试用了通气木桩施打，由于土壤回淤很快，不成功而放弃了，即采用钢管灌注法，钢管长 6.0 米、直径 2.0 厘米，用 6 毫米厚的钢板制成，用人力拉锤施打，所配备的机具设备如下表：

劳动组织：

①打桩阶段：拉老鹰钩 1 人，搖絞車 8 人，零星工作 1

序目	机具设备名称	规格	单位	数量	备 注
1	鋼 套 管	$L=8.0$ 米	根	1	內徑25厘米壁厚6毫米
2	龍 門 架	$H=8.0$ 米	架	1	
3	滑 車	双 門 式	只	2	
4	鋼 絲 繩	$\phi=19$ 毫米	米	100	負荷3噸
5	自 落 錘	重 500 米	斤	1	
6	手搖絞車	負荷 15噸	架	1	
7	量 計		只	1	木制，量砂用
8	石 桩 尖	直徑30厘米、高32厘米	只	106	打后埋棄于土中
9	石 夯		斤	1	

人，指揮 1 人，共 11 人。

②灌砂阶段：搖絞車 6 人，灌砂 4 人，指揮 1 人，共 11 人。

由于初次采用套管灌打砂桩，工人操作不熟練，加上土基中有厚 1.5 至 2.0 米的硬隔层，以及采用較笨重的龍門架，故工效很低，平均每台班只打砂桩 3 个。

施工情况：定好桩位，用人力自落錘打下鋼套至設計标高，鋼套管下为石头桩尖。将套管上拔 20 厘米左右，用右錘下击桩尖，桩尖即脱离套管埋弃于土中，繼将套管上拔 50 厘米，即行灌砂，砂的天然含水量 12% 左右，一次灌砂量也在 50 厘米左右，灌好用石夯打，这样逐段的拔、灌、夯打，直至完成一根砂桩。用这种办法，常遇到砂子阻塞鋼套管，要重行捣穿，增加工作困难；另一办法先灌 50 厘米砂，再上拔套管 50 厘米，同时进行夯打，同样遇到砂子阻塞鋼管；还有一种办法是将拔灌夯同时进行，这在掌握上很感困难，也不易灌好，因此砂桩的質量很不好，灌砂率一般仅 55%，距設計要求 90% 以上，相差很大。这些都是姚台情况。其后打宁台的砂桩时，工人提出用灌水的办法，即将砂桩打至設計标高，先灌下約 2.0

米水，再上拔鋼套管，这样桩尖无須錘击即行脫落，一边灌砂一边上拔套管，孔眼不致回淤，灌砂亦无阻塞套管現象，最后水即流到地面上，导至出水沟，砂也不夯，这样灌砂率一般全达到90%以上，最高达98%。对灌水是否侵入土壤作了測定計算。灌入的水除填充砂的空隙外，最后全流至地面，对土壤不至增加其含水量，而降低其質量。这个問題还有待进一步研究。灌入的砂要飽和，才便于灌注，这点在开始时我們未能掌握，因之产生工作上的困难。

三、沉降观测資料及不均匀沉降 对拱圈的影响

这次沉降观测是从基础大方脚浇筑起就开始，用水平仪及鋼尺观测。每个桥台上設立四个观测点，每台沉降以四点加权平均之数值。沉降观测的目的，一方面了解砂桩地基的作用，另一方面了解基础不均匀沉降对拱圈的影响。理論計算的最終下沉值为22.2厘米（除去基底下2.5米砂垫层的沉降），实际沉降至通车止为8.9~9.7厘米，沉降并趋于稳定。根据以往經驗，理論計算沉降量大大超过实际沉降，这就說明砂桩对土壤起了加速排水固結的作用。至于不均匀沉降对拱圈的影响，采用鋼尺量孔径观测其水平位移，水平仪观测其豎向位移。这次基础的沉降，在合拱后比較均匀，故除了在砌拱过程中两拱脚端的背面沿断面的各有发絲状裂縫外，并无其它裂縫发现，下面是該桥到通车止的沉降观测資料。

关于拱桥基础不均匀沉降，在理論上拱圈內将产生較大的次应力。为了防止拱圈一次砌上基础不均匀沉降对拱圈产生裂

台名	平均豎向沉降 (厘米)				59年11月19日落拱梁前之淨跨 (M)	
	合拱前	封拱	58年11月20日	合計	南端	北端
燒台	4.93	0.17	3.75	8.9		
寧台	5.60	0.40	3.70	9.7	6.023	6.025

縫，因此这次在离拱脚90厘米处（第四至五块拱石）留一預留縫，但其效果不够明显，当时称砌过 $\frac{L}{4}$ 时，拱脚端的背面沿拱寬产生发絲狀的裂縫，合拱后裂縫有所扩展至拱厚的 $\frac{2}{3}$ 。为了吸取这次經驗教訓，今从理論上来分析預留縫留在拱脚最为有利。

假定右拱脚具有豎向位移 a_1 、水平位移 a_2 及轉角 a_3 （如图 1）。

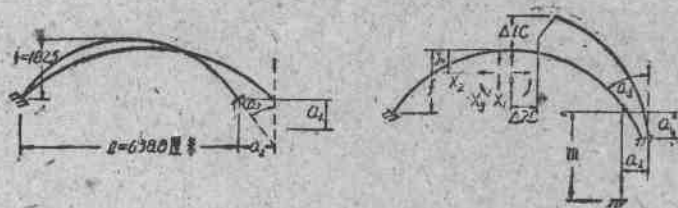


图 1

由几何关系知:

$$\Delta_1 C = -a_1 + \frac{l}{2} a_3 = -a_1 + \frac{l}{2} \cdot \frac{a_2}{m}$$

$$\Delta_2 C = a_2 + (f - y_0) a_3 = a_2 + (f - y_0) \frac{a_2}{m}$$

$$\Delta_3 C = -a_3 = -\frac{a_2}{m}$$

式中: m ——基底至拱脚間的距离。

弹性中心力法方程: 外力和未知力对中心的变位代数和等于零,

$$\delta_{11} X_1 + \Delta_1 C = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\delta_{22} X_2 + \Delta_2 C = 0 \dots\dots\dots (2)$$

$$\delta_{33} X_3 + \Delta_3 C = 0 \dots\dots\dots (3)$$

則:

$$X_1 = -\frac{\Delta_1 C}{\delta_{11}} \dots\dots\dots (4)$$

$$X_2 = -\frac{\Delta_2 C}{\delta_{22}} \dots\dots\dots (5)$$

$$X_3 = -\frac{\Delta_3 C}{\delta_{33}} \dots\dots\dots (6)$$

由位移定理, 略去剪力的影响,

$$\begin{aligned} EJ_0 S_{11} &= \int_S M_1^2 dS + \int_S N_1^2 \frac{J_0}{F} dS \\ &= 2 \int_0^l \frac{l}{2} X^2 dX + 2 \frac{J_0}{F} r \int_0^{ln_1} \sin^2 \phi d\phi = \\ &= \frac{l^3}{12} + \frac{h^2}{b}, \quad p \left\{ \frac{\phi_n}{2} - \frac{1}{4} \sin 2\phi_n \right\} \end{aligned}$$

$$\text{以 } l=638.8 \quad h=45 \quad p=370.7 \quad \phi_n=1.03778$$

$E=60000 \quad J_o=759375$ 代入上式
得 $\delta_{11}=0.000477$

$$EJ_o\delta_{22} = \int M_2^2 ds + \int N_2^2 \frac{J_o}{F} ds$$

$$= \int_{-\phi_1}^{\phi_1} r \left[r \cos\phi - (r - \gamma_0) \right]^2 d\phi + 2r \int_{\phi_1}^{\phi_n} \left[(r - \gamma_0) - r \cos\phi \right]^2 d\phi + \frac{h^2}{12} r \int_{-\phi_n}^{\phi_n} \cos^2\phi d\phi$$

以 $\phi_1=0.188\pi \quad \phi_n=0.331\pi \quad \gamma_0=630 \quad r=370.7$
 $h=45 \quad E=60000 \quad J_o=759375$ 代入上式
得 $\delta_{22}=0.00597$

$$EJ_o\delta_{33} = \int_s M_3^C ds' = \int_s ds' = 769.42$$

$\therefore \delta_{33}=0.000000017$

由右拱脚的位移拱圈內任一断面內力图 (見圖 2)

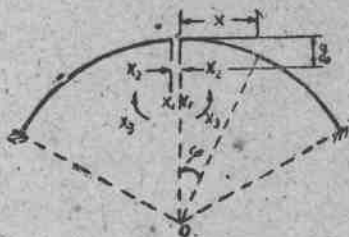


圖 2

內力

$$M\phi = X_2 \left[\gamma_0 - r (1 - \cos\phi) \right] + X_1 r \alpha^T \phi - X_3$$

$$N\phi = -X_2 \cos\phi - X_1 \sin\phi$$

应力

$$B\phi = -\frac{1}{F} \left(X_2 \cos\phi + X_1 \sin\phi \right) \pm \frac{1}{W} \times \left\{ X_2 \left[r_0 - r \left(1 - \cos\phi \right) \right] + X_1 r \sin\phi - X_3 \right\} \dots\dots\dots (7)$$

$$\text{令 } \frac{d\sigma\phi}{d\phi} = 0 \quad \text{得 } X_1 \cos\phi + 2a_1\phi = 0$$

$$\frac{1}{r} \phi = \frac{-X_1}{X_2} \dots\dots\dots (8)$$

今有三种情况:

1. 当右拱脚只有竖向移位, 无水平移位时 (即 $a_1 \neq 0$, $a_2 = a_3 = 0$), 则 $X_2 = X_3 = 0$ 。拱断面中应力的, 决定于 X_1 , 因 X_1 离拱脚的距离最远, 故拱脚处应力最大。

$$\begin{aligned} \max B\phi_n &= \pm \frac{M}{W} = \frac{X_1 \frac{l}{2}}{W} = \frac{4017606a_1}{202500} \\ &= \pm 19.8a_1 \text{ 公斤/平方厘米} \end{aligned}$$

2. 当右拱脚只有水平位移, 无竖向位移时 (即 $a_1 = 0$, $a_2 \neq 0$, $a_3 = 0$), 则 (8) 式 $= 0$, 表示最大应力产生在拱顶。

$$\begin{aligned} \max B_o &= \frac{-N_o}{F} = \frac{-X_2}{F} = \frac{-167.5a_2}{45 \times 100} \\ &= -0.0371a_2 \text{ 公斤/平方厘米} \end{aligned}$$

3. 当右拱脚只有水平位移沿繞基底轉一角度时

(即 $a_1 = 0$ $a_2 \neq 0$ $a_3 \neq 0$)

$$M\phi = -X_1 r \sin \phi + X_2 \left[y_0 - r (1 - \cos \phi) \right] - X_3$$

$$N\phi = +X_1 \sin \phi - X_2 \cos \phi$$

$$\sigma\phi = \frac{N\phi}{F} \pm \frac{M\phi}{W} = \frac{1}{F} \left(X_1 \sin \phi - X_2 \cos \phi \right) \pm$$

$$\pm \frac{1}{W} \left[-X_1 r \sin \phi + X_2 y_0 - X_2 r + X_2 r \cos \phi - X_3 \right]$$

$$\text{令 } \frac{d\sigma\phi}{d\phi} = 0 \text{ 得 } \left(\frac{1}{F} \mp \frac{r}{W} \right) (X_1 \cos \phi +$$

$$+ X_2 \sin \phi) = 0$$

$$\text{解得 } \frac{1}{y} \phi = \frac{X_1}{X_2} \quad \phi = 83^\circ 32' > \phi_n = 59^\circ 29' \text{ 表示在拱}$$

圈之外。

但由于函数 $\sigma\phi$ 在 $[0, \phi_n]$ 内是单调增函数，故最大应力在拱脚处，将 ϕ_n 代入 $\sigma\phi$ ，解得其应力值

$$\sigma_{\phi n} = \begin{matrix} -24.4 a_2 \\ +24.6 a_2 \end{matrix} \text{ 公斤/平方厘米}$$

为清楚起见，将前面的分析結合該桥計算立表如下：

右拱脚的位移，产生最大附加应力的断面：

編 號	位 移 情 况	因基础的位移在拱圈中產生最大附加应力之断面					
		拱 頂		左 拱 脚		右 拱 脚	
		上 緣	下 緣	上 緣	下 緣	上 緣	下 緣
①	$a_1=a_3=0 \quad 0.2 \neq 0$	-	-				
②	$a_1 \neq 0 \quad 0.2=a_3=0$			-	+	+	-
③	$a_1=0 \quad a_2 \neq 0 \quad a_3 \neq 0$					-	+

注：“+”表示压应力，“-”表示拉应力。

在恒載下右拱脚的位移，該挤拱圈断面最大应力值：

編 號	位 移 情 况	恒載与基础位移的組合应力 (公斤/平方厘米)					
		拱 頂		左 拱 脚		右 拱 脚	
		上 緣	下 緣	上 緣	下 緣	上 緣	下 緣
①	$a_1=a_3=0 \quad a_2 \neq 0$	+1.6- 0.037 a_2	+1.6- 0.037 a_2				
②	$a_1 \neq 0 \quad a_2=a_3=0$			+2.38- 19.8 a_1	+1.33+ 19.8 a_1	+2.38+ 19.8 a_1	+1.33- 19.8 a_1
③	$a_1=0 \quad a_2 \neq 0 \quad a_3 \neq 0$					+2.38- 24.0 a_2	+1.33+ 24.0 a_2

注：①表格中数据：前項表示恒載应力，后項表示位移附加应力。

② a_1 、 a_2 以厘米計。

③假左有端拱脚向下沉降 a_1 及向右水平位移 a_2 。

現在来研究拱桥的一段位移；設計一般拱桥外力的合力多半偏在基底中心后面，基底上除作用有水平力外，还有偏心力矩，使基础发生轉动，因此对一般土壤（对基底面有摩阻力），第一种情况成为不可能。再从基底是偏心应力以及两台土質不可能絕對相同，很难得到絕對均匀下沉，証明第二、三种情况也为不可能。

· 最常見的就是第二第三兩情況的組合。而吳山廟橋在拱圈合龍到拆拱架兩台接近絕對均勻下沉，但淨空增加0.8厘米（參沉降觀測資料表）；兩拱腳上緣發絲狀裂縫有所擴展。今以每台水平位移0.4厘米計，拱腳端上緣拉應力為7.21公斤/平方厘米超過灰漿的極限拉應力。從這一實例中說明軟地基拱橋拱圈砌築時預留縫留在拱腳，較為合理。

四、經濟效果

為了體現該橋的經濟性，將該橋的砂桩墊地基與木桩基礎作一比較（見下表）。

項目	砂 桩 砂 墊 地 基					木 桩 基			
		單位	數量	單價(元)	合價(元)	單位	數量	單價(元)	合價(元)
①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
土 方	人 工	工 日	908.0	1.20	1089.60	工 日	509.7	1.20	611.64
	材 料	立 方 米	3400			立 方 米	1950		
夯填砂 墊層及 打桩	人 工	工 日	818.63	1.20	982.36	工 日	518.4	1.20	622.08
	材 料	立 方 米	443.2	4.55	2016.56				
	材 料	立 方 米	0			立 方 米	45.0	122.30	5503.50
合 計 (元)					4088.52				8737.22

从上表可知，採用了砂桩砂墊相結合的橋基的處理，節約了2648.70元，更重要的是節約了原木料45立方米。

五、結 語

从吳山庙桥的試点工程效果，可以作如下的初步結語：

1. 在軟土地基上（无冲刷的河流）可以修建中 小 型 石拱桥，采用砂桩和砂垫相結合的办法来处理軟土地基是一有效的办法，加速土壤固結，增加其密实度，提高承载力，减少沉降量。还須繼續加以試驗研究，提高砂桩基桩質量。

2. 設計桥台采用短形基础，使合力（靜荷重）接近基底中心較為适合，压力均布沉降均匀，拱圈預留縫，应在拱脚起拱处。

3. 对砂桩的作用要致慮排水及挤紧的双重作用，同时要致慮打桩机具的条件，砂桩不宜过长而間距要密，短細密在推广上更有其现实可行性，对砂垫层的作用不仅是作排水通道层，而且要利用其扩散基底的应力，其厚度不宜太薄，但又要减少挖土工程的困难，宜采用1.5至2.0米为宜。

4. 砂子在灌注前要使其饱和，才不至在灌注过程中阻塞套管，同时要借用振动的作用来增加其密实度，灌水法施工能防止土壤回淤，可以研究其有无为害性后再行使用。

5. 在施工上要控制其不均匀沉降的产生，在拱圈合拱前施工可快些，使其起到預压加速固結作用，在封拱以后应将进度适当放慢些，使土壤能逐漸稳定。

6. 人工打桩工效低，以后应用柴油打桩机打桩和人字架拔桩和灌砂，提高桩砂的速度。

浙江省基中建設材料試驗所土壤試驗報告

天然地基土壤試驗

附表 1

送樣單編號: 59-1837

送驗單位: 交通厅料研所

收到日期: 59.11.25 報告日期: 59.11.27

土样编号				1
試驗室编号				319-1
取土深度(米)				1.2
自然含水量		W	%	41.5
容量	自然状态	rn	公斤/立方厘米	1.82
	干燥状态	rd	公斤/立方厘米	1.29
土粒比重		GS	-	2.71
孔隙度		n	%	52.6
孔隙比		e	-	1.107
飽和度		SW	%	100
阿太保稠度	流性限度	WL	%	37.4
	塑性限度	WP	%	24.0
	塑性指数	IP	-	13.4
稠度		B	-	1.31
顆粒組成	砾	20~2	%	
	砂	2~0.05	%	
	泥砂	0.05~0.005	%	88.0
	粘土	<0.005	%	12.0
	不均勻系数	0.60/0.10	-	
灼热损失			%	
快剪	凝聚力	C	公斤/立方厘米	0.03
	內摩擦角	φ	度	19.5
土壤分类				砂質粘土
固結快剪	凝聚力	C	公斤/立方厘米	0.057
	內摩擦角	φ	度	20°

浙江省交通厅工程队試驗室土壤試驗报告

人工地基土壤試驗

附表 2

送样单编号:

送样单位: 交通厅科研所

來 源:

报告日期:

土样编号 試驗室编号 取土深度(米)				
自然含水量		W	%	29.00
容 重	自然状态	rn	公斤/立方厘米	1.94
	干燥状态	rd	公斤/立方厘米	1.5
土粒比重		GS	—	2.70
孔 隙 度		n	%	
孔 隙 比		e	—	0.79
飽 和 度		SW	%	98.1
阿太堡稠度	流性限度	WL	%	35.8
	塑性限度	WP	%	23.3
	塑性指数	IP	—	12.5
稠 度		B	—	
固 結 快 剪	凝 聚 力	C	公斤/立方厘米	0.38
	內摩擦角	φ	度	35°22'
土 壤 分 类				砂質粘土