

10
預应力鋼筋混凝土技術小叢書

(6)

碼頭工程的預应力鋼筋 混凝土迭合板

河北省交通廳航務工程局 編

人 民 交 通 出 版 社

目 录

前言.....	2
一、概述.....	3
二、迭合板的結構.....	4
三、迭合板的設計計算.....	8
(一)設計条件	8
(二)設計計算	10
四、迭合板的靜載荷試驗.....	16
(一)試驗要求	16
(二)試驗的布置与結果.....	17
五、几点体会.....	27

前 言

一九五八年的工农业生产大跃进中，本省交通厅航务工程局（前交通部渤海工程处）的职工积极响应党的号召：大力节约原材料——首要是钢材。并力求改进海港建筑物的质量，增加使用寿命，在去年预应力桩试制成功解决了多年来打桩中出现裂缝问题的基础上，在塘沽新港建成预应力钢筋混凝土预制场，作为预应力钢筋混凝土桩制造的主要场地。半年来使用110~150公尺台座已有28公尺预应力钢筋混凝土桩生产使用，正常的生产秩序已初步建立，质量亦趋稳定。此外，在预制场中我们还作了一些其他产品，也获得了一些技术革新措施的經驗。

在整风及技术革命运动的鼓舞和推动下，预制场的技术革新有了一定的收获，为使生产和科学研究更好的结合起来，预制场的技术干部和技术工人创办了“预应力钢筋混凝土施工技术研究”以便更好地来提高预应力钢筋混凝土的施工水平。

为了不使这些资料散失，我们发动了施工的技术人员和工人，大家动手将工作中的一些主要体会和初步經驗分别编写成册作为专题的报导。这些资料仅仅是我们工作的纪录，不是完全成熟和经过严格考驗的作品。印了它目的在于可以提供各有关兄弟单位交换资料，广泛征求意见，从而修正錯誤来提高認識，并积累出一套比較完整的预应力桩制建經驗，更好为水工建筑服务。

限于我們的水平，資料中錯誤之处，在所难免，望讀者多給指正。

河北省交通厅航务工程局

一、概 述

在海港工程中，高樁承台型式的碼頭被廣泛採用。但這種結構型式的碼頭在我國過去都習慣於按照一般混凝土製造方法施工；即將樁打入土中後，碼頭上部結構，如：樁上的縱橫梁、碼頭面板等，皆採用現場澆注施工。這樣，需要大量的木材製作模板，模板要在水上安裝和拆除，工作繁重且易發生危險。同時碼頭上部的建造因非採用預制安裝，便延長了施工時間。

近代在預應力鋼筋混凝土的施工中，製造預應力迭合構件是一種新穎的先進方法。預應力迭合板是迭合式構件的一種，是由預應力板與一般澆注的混凝土結合而成；預應力板位於構件受拉區，澆注混凝土位於構件的受壓區。迭合式構件，在我國建築工程部已試制成功，已經生產的有迭合式吊車梁、蕊棒大型屋面板、基礎梁、迭合式空心樓板等。

考慮到將迭合構件用在碼頭工程中，先在予制場作好預應力板，作為碼頭面板的底模，從而代替大量的木模板，施工時，將預應力板安裝在樁頂的大梁上，然後加澆上部混凝土與預應力板結合成“迭合板”，碼頭上部結構仍可整體受力（圖1）。這樣，不但提高了碼頭施工的裝配程度，使工期大大縮短；同時，還提高了工程的質量，創造了安全施工的条件；并大大地節約了木材。

為此，我們在1957年底至1958上半年，進行了碼頭工程預應力迭合板的設計和試制，以及迭合結構的靜載荷試驗，得到了初步的成果。現在，正在大批製造，以供給碼頭工程的應

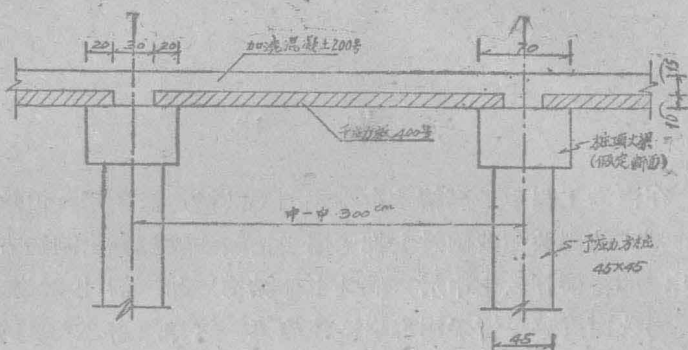


圖1 碼頭上採用預應力迭合板結構

用。

这里，將我們的設計、試制和試驗情况作一簡單的介紹。
限于技术水平，不当之处，尚希讀者指正。

二、迭合板的結構

根据碼頭基樁樁頭橫梁的間距为 3 公尺，迭合板長度分为 3 公尺及 6 公尺的兩種，板寬皆为 56.5 公分，厚为 25 公分，預应力板在預制場制成，澆注混凝土在現場进行。（圖 2）。

預应力板位于構件的受拉区，板長 270^{cm}，寬 56.5^{cm}，板厚 10^{cm}，混凝土标号是 400 号，配筋用 4 ϕ 12 光 5 螺紋鋼，該預应力鋼筋經過冷拉，冷拉按伸長率 4 % 控制，經過 200°C 时效后，流限 $\sigma_T \geq 5000 \text{ kg/cm}^2$ 。

預应力板采用先張法施工。張拉时控制应力 $\sigma_{ak} = 0.9 \sigma_T = 4500 \text{ kg/cm}^2$ 。張拉鋼筋时是在長 20 公尺之台座内进行的，鋼筋的彈性伸長 5.8^{cm}，預应力板在 1957 年 12 月 14 日下午澆筑混凝土，混凝土澆筑完畢采用蓄热法上盖稻草养护。

400 号混凝土的配合比为 1 : 1.41 : 2.85， $B/\sqrt{V} = 0.4$ ，500

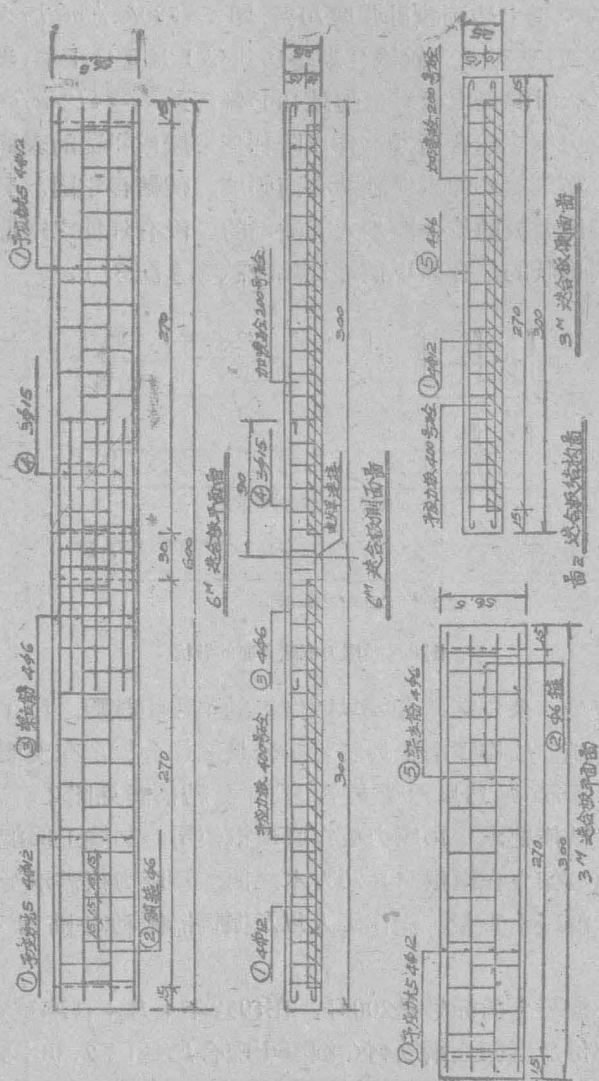


图 2 迭合板结构图

号大同矽酸盐普通水泥 $\eta=431\text{kg}/\text{M}^3$ $R_f=412\text{kg}/\text{cm}^2$, 規定是当澆筑的混凝土达到設計强度70%, 即 $R=280\text{kg}/\text{cm}^2$ 后才放松預应力鋼筋, 事实上, 放松日期是1958年1月2日下午, 当时气温是 20°C , 而混凝土标号已超过400号(因为 $R_f=412\text{kg}/\text{cm}^2$)。

預应力板之迭合面处, 作成阶梯形形状或粗糙的表面, 并有剪力鋼筋鋼箍外伸, 保証迭合面强度, 使結合牢固。另外, 有一块預应力板的迭合面是人工凿毛的, 沒有外伸之鋼箍。作几种不同形状的迭合面以便进行比较試驗(图3)。

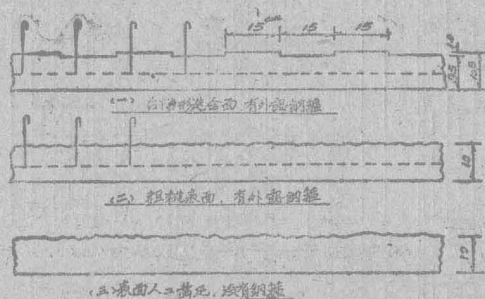


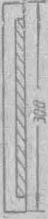
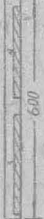
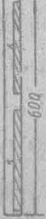
图3 預应力板迭合面的形状

长度为3公尺之迭合板只能作板的正弯矩試驗, 为了試驗支座負弯矩, 故作了兩块长度为6公尺之迭合板, 在支座部分增加尤3鋼筋 $3\phi 15$ 以承受支座負弯矩。結構詳见图2。

根据結構要求, 預应力板作底模板使用, 加澆上部混凝土时預应力板架立在兩根 35×20 方木之間。預应力板需承受板自重、加澆混凝土重量、操作工人以及振捣器振动之临时荷重(图4)。

加澆混凝土的标号是200号, 在1958年4月4日澆筑完成。在加澆部份放置架立鋼筋 $4\phi 6$, 混凝土配合比是 $1:2.38:5.47$, 水灰比 $B/\eta=0.65$, 采用400号矽酸盐水泥 $R_f=140\text{kg}/\text{cm}^2$ 澆

表 1

試件編號	試件結構簡圖	選合面特征	預应力板尺寸 (cm)		選合板尺寸 (cm)		混凝土設計標号		鋼筋用量						
			寬度 b'	高度 h_1	長度 l_1	寬度 b_2	高度 h_2	長度 l_2	預应力板	加澆混凝土	預应力鋼筋	預应力鋼筋	配筋率 (對預应力筋)	支座負彎矩鋼筋	
1		人工鑿毛, 沒有鋼筋	56.5	10.0	270	56.5	25		300	400	200	4 ϕ 12	4 ϕ 8	$\mu = 4.52$ $\frac{56.5 \times 25}{= 0.0032}$	—
2		粗糙表面有鋼筋	56.5	10.0	270	56.5	25		300	400	200	4 ϕ 12	4 ϕ 8	0.0032	—
7		同上	56.5	10.0	270	56.5	25		600	400	200	4 ϕ 12	4 ϕ 8	0.0032	3 ϕ 15
8		合階形, 有鋼筋	56.5	10.0	270	56.5	25		600	400	200	4 ϕ 12	4 ϕ 8	0.0032	3 ϕ 15

(注) 7#、8#是6^m的選合板, 其中3#, 4#兩塊組成7#, 5#, 6#組成8#。

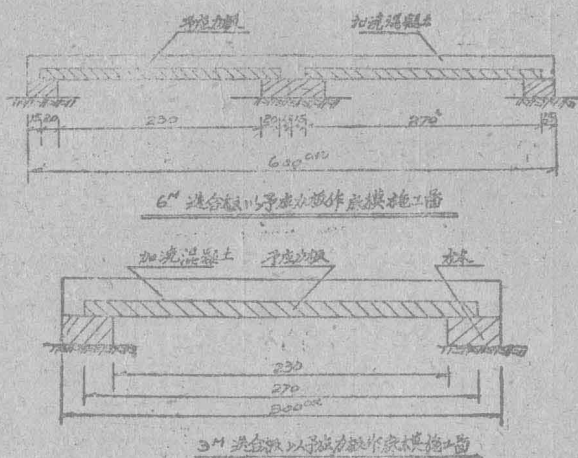


图4 预应力板作模板

筑时，由于工作量很少，所以用人工拌合混凝土。振动时两个工人与平板振捣器同时在预应力板上操作，加浇混凝土时，由于模板漏浆，使迭合面处混凝土质量不好，部分有蜂窝麻面。迭合板的构造情况如表1。

三、迭合板的设计计算

(一) 设计条件

1. 纵向预应力钢筋:

$$\text{尤 } 54\phi 12 \text{ 冷拉 } F_a = 4 \times 1.13 = 4.52 \text{ cm}^2$$

$$\text{流限 } \sigma_T = 5000 \text{ kg/cm}^2 \text{ (即 } \sigma_{an} \text{)}$$

$$\text{控制应力 } \sigma_{ak} = 0.9, \sigma_T = 4500 \text{ kg/cm}^2 \text{ (即 } \sigma_{au} \text{)}$$

$$\text{试验时钢筋的 } \sigma_{an}' = \sigma_{ak} - \sigma_n' - \sigma_{nt} = 4500 - 300 - 25\Delta t = 4200 - 500 = 3700 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{工作阶段钢筋的 } \sigma_{an} = \sigma_{ak} - \sigma_n - \sigma_{nt} = 4500 - 800$$

$$-500=3200\text{kg/cm}^2$$

$$\sigma_{aT'p}=\sigma_{a'n}+300=4000\text{kg/cm}^2$$

$$\sigma_{aTp}=\sigma_{an}+300=3500\text{kg/cm}^2$$

2. 尤3 ϕ 6的鋼筋作为橫向鋼筋及其他非預应力鋼筋用。

3. 混凝土标号:

① 預应力板用400号;

② 加澆混凝土用200号。

4. 構件尺寸:

① 預应力板断面(图5)。

$$b=56.5\text{cm}$$

$$h=10\text{cm}$$

$$l=270\text{cm}$$

② 迭合板断面(图6)。

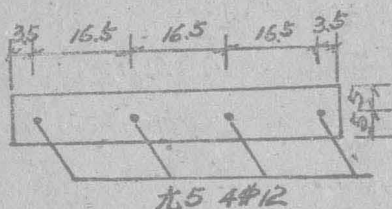


图 5

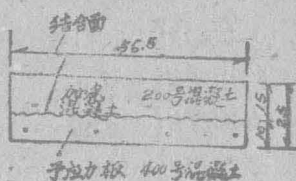


图 6

$$b=56.5\text{cm}$$

$$h=25\text{cm}$$

$$l=300\text{cm}$$

5. 迭合板的混凝土分兩次澆注。

① 第一次澆注混凝土須在張拉預应力鋼筋之后进行, 澆注高度为10^{cm}。

② 第二次澆注, 当第一次澆注之混凝土达到設計强度70%,

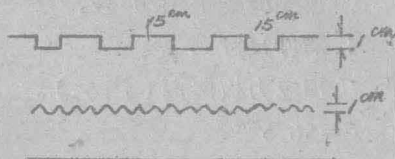
亦即 $R' = 280$ 号时放松預应力鋼筋，放松鋼筋要求緩慢。待混凝土达到設計强度即 $R = 400$ 号时，才許可澆注上部的加澆混凝土。

6. 預应力板凝固前其上表面（即与加澆混凝土結合之表面）应作处理，并在第二次澆注前把結合面清洗干淨，使混凝土之間緊密結合，結合面处理之方法有三种（图 7）：

① 矩形結合面

② 鋸齒形

③ 平接划毛



7. 預应力板应作脚手架

（即底模板）使用。

图 7

8. 任何时候構件中的預应力板应在受拉区域不許把構件任意倒置存放。

9. 安全系数参考 И-148-52 采用。

10. 根据外力設計資料給出預应力迭合板的弯矩为：

跨中弯矩 $+M_{\max} = 2.17T \cdot M/M$

支座弯矩 $-M_{\max} = 3.04T \cdot M/M$

最大切力 $+Q_{\max} = 6.31T/M$

（二）設計計算

主要参考書籍及規範：

Н. А. Канашиков 著“預应力混凝土迭合梁在桥梁上的应用”。

И-148-52 預应力鋼筋混凝土結構設計規範。

1. 預应力板的計算。

預应力板的断面及配筋情况见图 8

制造时期：

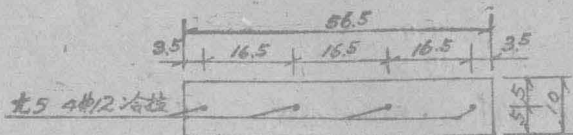


图 8

- ① 放松预应力钢筋，混凝土承受按装应力 σ_{1H} ，此时混凝土标号相应为 300 号，而钢筋的应力考虑用蒸汽养护而损失 $\sigma_{nt} = 25\Delta t = 500 \text{ kg/cm}^2$

$$m = \frac{Ea}{E_1} = \frac{2.1 \times 10^8}{3.4 \times 10^5} = 6.17 \quad \mu_c = \frac{f}{F_1} = \frac{4.52}{5.65} = 0.008 = 0.8\%$$

$$\sigma_{1H} = \frac{\mu_c(\sigma_{au} - \sigma_{nt})}{1 + m\mu_c} = \frac{0.008(4500 - 500)}{1 + 6.17 \times 0.008} = \frac{32}{1.05} = 30.5 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{1H} = 30.5 \text{ kg/cm}^2 < R' = 0.6R_n = 0.6 \times 300 = 180 \text{ kg/cm}^2$$

- ② 吊运出槽时，混凝土标号相应为 300 号。

$$\text{吊运时按二点起吊即 } 0.207l = 0.207 \times 300 = 62.1 \text{ cm}$$

$$q = 0.565 \times 0.1 \times 2500 = 141 \text{ kg/m}$$

$$M = \frac{1}{2} q l^2 \times 1.5 = \frac{1}{2} \times 141 \times 0.621^2 \times 1.5 = 40.8 \text{ kg-m}$$

强度的计算

$$f\sigma_{an} = R_{1u} \cdot b \cdot x$$

$$x = \frac{f\sigma_{an}}{R_{1u}b} = \frac{4.52 \times 5000}{250 \times 56.5} = \frac{22600}{14100} = 1.6 \text{ cm}$$

$$M_p = R_{1u} b x \left(ha - a - \frac{x}{2} \right) = 250 \times 56.5 \times 1.6 (10 - 5 - 0.8) = 950 \text{ kg-m}$$

$$K_p = \frac{950}{40.8} = 23.2$$

抗裂性的計算，按彈性公式：

$$W = \frac{I}{\gamma} = 944 \text{ cm}^3, \sigma_{1H} = 30.5 \text{ kg/cm}^2$$

$$R_{1pu} = \gamma \cdot R_p = 1.7 \times 23 = 39$$

$$M_T = (\sigma_{1H} + R_{1pu}) W_1 = (30.5 + 39) 944 = 656 \text{ kg-m}$$

$$K_T = \frac{656}{40.8} = 16$$

③在試驗時期混凝土所承受的按裝应力 σ_{1H} ，此时混凝土
標号相应为400号而鋼筋的应力則按

$$\sigma_{au} - \sigma_{nt} - 300 = 4500 - 500 - 300 = 3700 \text{ kg/cm}^2$$

$$m = \frac{E_a}{E_1} = \frac{2.1 \times 10^6}{3.8 \times 10^5} = 5.53$$

$$\sigma_{1H} = \frac{0.008 \times 3700}{1 + 5.53 \times 0.008} = \frac{29.6}{1.044} = 28.4 \text{ kg/cm}^2$$

$$W_1 = 944 \text{ cm}^3 \quad R_{1pu} = 1.7 \times 27 = 46$$

$$M_T = (28.4 + 46) 944 \\ = 0.702 \text{ T-m} = 702 \text{ kg-m}$$

2. 迭合板的計算（在作

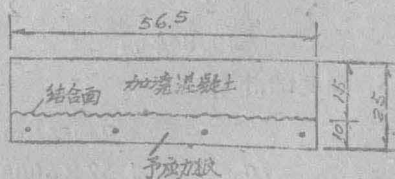
試驗時）

迭合板的断面见图9。

①強度的計算

图 9

$$f\sigma_{am} = R_{aub} x \quad x = \frac{4.52 \times 5000}{180 \times 56.5} = \frac{22600}{10180} = 2.22 \text{ cm}$$



$$M_p = f\sigma_{am} \left(h_a - a - \frac{x}{2} \right) = 4.52 \times 5000 (25 - 5 - 1.11) \\ = 4.27 \text{ T-M}$$

$$K = \frac{4.27}{2.17 \times 0.565} = 3.48$$

② 抗裂性的計算 (預应力板不作脚手架, 不考慮有凝縮應力的影响时)

$$M_{rpl} = \left(-\frac{t\sigma'_{am} Z_{1a'}}{W_1} + R_{1pu} \right) W \\ = \left(-\frac{4.52 \times 3700 \times 1.6}{944} + 1.7 \times 27 \right) 5650 = \\ (28.4 + 46) \times 5650 = 4.20 \text{ T-M}$$

$$K_r = \frac{4.20}{2.17 \times 0.565} = 3.42$$

③ 凝縮應力的計算

假定做加澆混凝土时預应力板混凝土的收縮与徐变已告終止, 此时

$$E_1 t = E_1 = 380,000 \text{ kg/cm}^2 \quad E_2 t = \frac{E}{1 + CE} \\ = \frac{290,000}{1 + 4 \times 10^{-6} \times 2.9 \times 10^5} = 134000 \text{ kg/cm}^2$$

$$mt = \frac{E_2 t}{E_1 t} = \frac{134000}{380000} = 0.352$$

求凝縮應力的中性軸 n_y

$$n_y = \frac{I_1 + mt I_2}{F_1 (h_2 - h_1)} - h_1 = \frac{4713 + 0.352 \times 15900}{565 (17.5 - 5)}$$

$$-5 = -3.54 \text{ cm}$$

n_y 值負号表示凝縮应力中性軸位于截面范围以內

$$\epsilon_H = - \frac{m\xi n_y}{h_1 + n_y + m\xi(h_2 + n_y)} \epsilon_y$$

$$\xi = \frac{F_2}{F_1} = \frac{847.5}{565} = 1.5$$

$$\epsilon_H = \frac{0.352 \times 1.5 \times 3.54}{5 + (-3.54) + 0.352 \times 1.5(17.5 - 3.54)} \times 0.00015$$

$$= \frac{1.87}{5 - 3.54 + 7.38} \times 0.00015 = 0.318 \times 10^{-4}$$

預应力板下部纖維中凝縮应力为:

$$\sigma_{1y} = E_1 t \epsilon_H = 3.8 \times 10^5 \times 0.318 \times 10^{-4} = 12.1 \text{ kg/cm}^2 (\text{拉})$$

預应力板上部中凝縮应力为

$$\sigma'_{2y} = 12.1 \times \frac{10 - 3.54}{-3.54} = 22.1 \text{ kg/cm}^2 (\text{压})$$

加澆混凝土下部中凝縮应力为:

$$\sigma_{2y} = E_2 t \left(\epsilon_y + \epsilon_H \frac{Z}{n_y} \right)$$

$$= 1.34 \times 10^5 \left(15 + 3.18 \frac{10 - 3.54}{-3.54} \times 10^{-5} \right)$$

$$= 12.3 \text{ kg/cm}^2$$

加澆混凝土上部中凝縮应力为:

$$\sigma'_{2y} = E_2 t \left(\epsilon_y + \epsilon_H \frac{Z}{n_y} \right) = 1.34 \times 10^5 \left(15 + 3.18 \right.$$

$$\left. \frac{25 - 3.54}{-3.54} \times 10^{-5} \right) = -5.76 \text{ kg/cm}^2$$

图10为凝缩应力分布图。

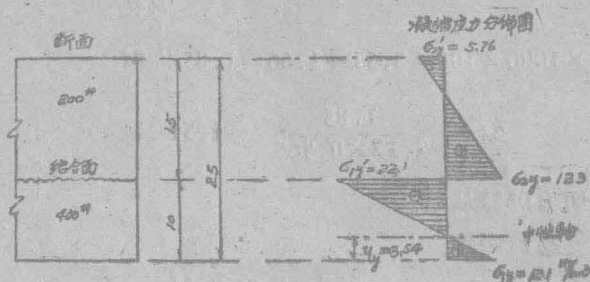


图 10

④如果把凝缩应力计算在内则抗裂弯矩为:

$$M_{TP2} = \frac{f\sigma_{an} Z_{1A}}{W_1} - (\sigma_{1y} + R_{1pu}) W$$

$$= (28.4 - 12.1 + 46) 5650 = 3.51 \text{ T-M}$$

$$K_T = \frac{3.51}{2.17 \times 0.565} = 2.86$$

⑤预应力板作脚手架使用, 抗裂弯矩 M_T 为:

简支计算跨度 $l_0 = 2.55 \text{ M}$

预应力板自重 $q_1 = 0.565 \times 0.1 \times 2.5 = 1.41 \text{ kg/m}$

振动荷重 $q_2 = 0.565 \times 100 = 56.5 \text{ kg/m}$ (见建筑 安装工程施工验收暂行技术规范第 3 篇)

加浇混凝土自重 $q_3 = 0.565 \times 0.15 \times 2.5 = 212 \text{ kg/m}$

$$\text{总重 } \Sigma q = q_1 + q_2 + q_3 = 409.5 \text{ kg/m}$$

$$M_1 = \frac{1}{8} q l_0^2 = \frac{1}{8} \times 409.5 \times 2.55^2 = 0.332 \text{ T-M}$$

$$M_{TP3} = (\sigma_{1H} - \sigma_{1y} + R_{1pu}) W - \left(\frac{W}{W_1} - 1 \right) M_1$$

$$=(28.4-12.1+45.9)5650-\left(\frac{5650}{944}-1\right)0.332$$

$$\times 1000 \times 100 = 3.51 - 1.66 = 1.85 T-M$$

$$K_T = \frac{1.85}{2.17 \times 0.565} = 1.51$$

3. 剪力計算从略。

4. 支座負弯矩:

$$-MP = 3.76 T-M$$

$$-M_{\text{tp}} = 1.82 T-M \text{ (計算从略)}$$

四、迭合板的靜載荷試驗

(一) 試驗要求

根据設計計算的資料，我們將6塊預应力板制成的迭合板进行了各种靜載荷試驗，試驗的要求是：

1. 强度檢驗：檢驗板的承载能力，观察板的破坏情况和破坏后迭合面之情况。

2. 抗裂性檢驗：預应力板作模板使用时，求出現第一条裂縫之 M_{tp} 值，以迭合板进行抗裂性檢驗时，注意迭合面有无裂縫产生。

3. 剛度檢驗：求出在使用荷重下之挠度，并与理論計算值之挠度作比較，挠度应符合规范要求，繪出挠度与荷重关系曲綫。

4. 預应力損失：作抗裂性檢驗，以了解預应力板之預应力損失情况。

5. 檢查各种迭合面之工作情况，找出施工方便、質量好而又合理之迭合面形狀的初步方案。