

苏联道路科学研究院

工程师 И.Н.塞烈庚著

預应力鋼筋混凝土桥的受力分析

先立志譯

人民交通出版社

本書系根據蘇聯汽車運輸與公路部全蘇道路科學研究院的研究結果編成的。書中不僅指出了預應力鋼筋混凝土橋由於設計與施工不良而造成的各項缺點，而且還提出了減少或消除這些缺點的具體意見。本書可供橋梁設計與施工人員參考。

預應力鋼筋混凝土橋的受力分析

МИНИСТЕРСТВО АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА
И ШОССЕЙНЫХ ДОРОГ СССР

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ВСЕСОЮЗНЫЙ ДОРОЖНИЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
(СОЮЗДОРНИИ)

Инж. И. Н. СЕРЕГИН

АНАЛИЗ РАБОТЫ МОСТОВ ИЗ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
АВТОТРАНСПОРТНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
Москва 1956

本書根據蘇聯汽車運輸與公路部出版社1956年莫斯科俄文版本譯出

先立志譯

人民交通出版社出版

(北京安定門外和平里)

北京市書刊出版業營業許可証出字第〇〇六號

新華書店發行

公私合營慈成印刷工廠印刷

1956年8月北京第一版 1958年6月北京第一次印刷

開本：787×1092毫米 印張：1張

全書：28,000字 印數：1—2100冊

統一書號：15044·1260

定價(10)：0.20元

目 录

序言	2
概論	3
預应力上部構造的主要缺点	9
預应力混凝土桥的特殊缺点	9
預应力过份的损失	9
沿着鋼絲束的裂縫	13
苏苏河桥上部構造的裂縫	17
鋼絲束外露、灌漿不良以及其他缺点	24
裝配式結構的缺点	25
施工中一般的缺点	29
結論与建議	30

序 言

近几年来，在公路桥梁建筑中广泛地采用預应力鋼筋混凝土，可以解决与其結構及計算有关的多数問題，創造与掌握了必要的設備，推广了各种各样的施工与吊裝方法，同时，为制作标准設計与过渡到广泛修建这种先进而經濟的結構准备了条件。

国立全苏道路科学研究院在对預应力鋼筋混凝土桥梁进行系統研究中，发现了一系列由于施工質量低劣、結構选择的錯誤而产生的缺点，这些缺点降低了桥梁上部構造的載重能力与耐久性。

在H. H. 塞烈庚工程师所写的这本通报性的文件（他根据研究結果写成的）中，对产生缺点的原因进行了分析，并向設計与施工部門提出了减少或消除这些缺点的建議，其目的在使預应力鋼筋混凝土結構更为完善。

道路科学研究院院長技术科学碩士

H. Ф. 霍罗希洛夫

道路科学研究院桥梁試驗室主任工程师

Л. А. 查哈罗夫

概 論

預应力鋼筋混凝土構造物比一般普通鋼筋混凝土構造物具有許多优点。預拉鋼筋可以有效地在結構中采用高标号混凝土与優質鋼，从而大大减少構造物的靜重，减少混凝土中的拉应力，所以能获得更坚固与耐用的結構。借助于鋼筋的預加应力，使裝配式結構能可靠地联成整体，結果就大大地扩大了鋼筋混凝土在工程建筑中的应用范围。这些优点保证了預应力混凝土近年来在很多国家中得到了广泛的采用。特别是在法国、德国、比利时，捷克斯洛伐克等国家中，采用預应力混凝土是很有成效的。在这些国家中，預应力混凝土不仅用来制造在結構方面有趣而合理的桥梁構造物，这种構造物能胜利地与鋼構造物競爭，而且还用它来做屋頂、樓板、圍籬与路灯杆等的構件。

在苏联預应力混凝土获得了广泛的采用。在公路桥梁建筑中，从1949年起就开始采用預应力混凝土結構。目前由預应力混凝土建成而已通車的公路桥与跨綫桥有18座，共有82个上部構造，全長約2000延長公尺，其中74个上部構造是梁式的，8个上部構造是悬臂式的。梁式桥的淨跨为12.0~30.0公尺（如图1与图2），而悬臂式桥的淨跨則为15.0~50.0公尺（如图3与图4）。

极大多数的梁式上部構造与悬臂梁式上部構造都沿桥的寬度作成裝配式块件。在橫断面的方向，每个上部構造都由独立的Π字形、T字形或工字形截面的大梁組成，并用橫隔板联結，有时用形成桥面板的擱板来联結。裝配式公路桥橫截面的类型示于图5。上部構造橫截面上的大梁数目視淨跨的大小而定，淨跨12.0公尺时由

4~6个大梁組成，淨跨30.0公尺时由10个大梁組成。

現有大梁的高度約相当于跨徑的1/20，腹板厚度約为6.0~16.0公分。

上部構造大梁所用的材料是300~400号混凝土，最常用的是350号混凝土。用硅酸盐水泥拌合而成，其活性为400~500。

装配式上部構造大梁的主要受張拉的鋼筋，是由直徑4~5公

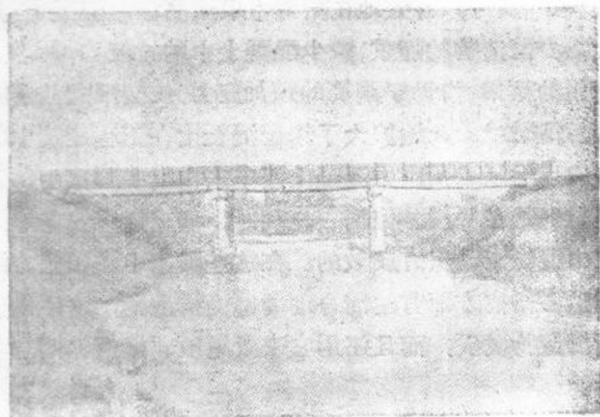


圖1 上部構造为12.0公尺的梁式桥



圖2 跨徑为30公尺的多孔梁式桥

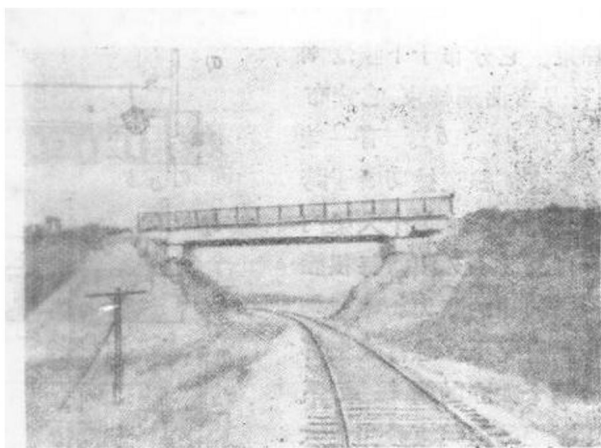


圖3 双懸臂上部構造跨綫桥計算跨徑 $L_p = 4 + 20 + 4$ 公尺



圖4 双懸臂上部構造萨拉河桥浮跨

$$L_0 = 9.5 + 33.0 + 9.5 \text{公尺和} 16.5 + 53.2 + 16.5 \text{公尺}$$

厘、极限强度10000~14000公斤/平方公分的平行鋼絲作成的粗鋼絲束，此鋼絲束封于鉄皮管内，在其兩端裝有科罗夫金式錨头。

Π字形大梁內有兩根弯曲的能承受40.0吨应力的鋼絲束(图6, a)①。其余箱支式大梁上部構造的鋼絲束孔成兩種形式：一种

① 原書漏印了圖6——譯者。

是平直鋼絲束，它分布于下弦範圍內，另外一種是彎曲鋼絲束，它分布于腹板範圍內(圖 6, б)。有一些上部構造平直鋼絲束被切斷于跨徑以內(圖 6, в)。每個大梁內鋼絲束的數目為 3~7 根，每根能承受 46.0~65.0 噸的應力。

在大多數情況下，懸臂式上部構造大梁有兩個獨立的鋼絲束系統。承受正彎矩的鋼絲束分布于大梁的下弦內，承受負彎矩的鋼絲束分布于攔板內，大多數鋼絲束的一端有固定錨頭(圖 6, г)。在由正彎矩轉變到負彎矩的範圍內的鋼絲束只安裝在上部構造的懸臂內(圖 6, д)。

大梁內的其餘不受張拉的鋼筋由普通鋼作成。在大梁的腹板內，每隔 12~40 公分設有 $\phi 6 \sim 12$ 公厘的箍筋與平行鋼筋，而在大梁下弦內，每隔 12~40 公分(或距離更短一些)設有末端帶鈎的 $\phi 6 \sim 8$ 公厘的箍筋。

在加寬一座兩孔舊橋時所用的兩根預應力 Γ 字形梁，是由沿上部構造的長度作成的 16 個裝配式塊件組成。每個塊件的長度約為 1.50

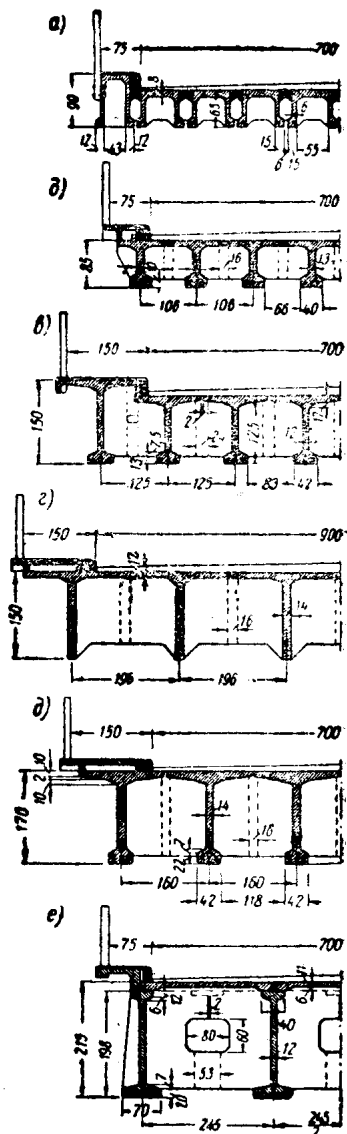


圖 5 裝配式上部構造橫截面，淨跨為：
 a-12.0 公尺；б-18.0 公尺；
 в和г-20.0 公尺；д和е-30.0 公尺。

公尺，这些块件是用拉紧10根鋼絲束（每根承受拉力45.0吨）的方法来联成整体的。

有8个上部構造是就地灌注的，其中有5个原先是設計成裝配式的，但因施工条件改变而改为就地灌注。有一个構造物，（苏拉河桥）是照就地灌注設計与施工的。这个構造物有三个双悬臂式箱形截面的上部構造：其中两个上部構造的計算跨徑是 $L_p=9.5+33.0+9.5$ 公尺，一个是 $L_p=16.5+53.2+16.5$ 公尺。这些上部構造的結構，將在下面作詳細的介紹。

当淨跨 $l_0 < 20.0$ 公尺时，其上部構造的活動支座是切綫式的，而大跨徑上部構造的活動支座則是滾軸式或摆柱式的。

桥面鋪裝是一般普通的形式。桥梁的人行道多用□字形預制構件。桥面伸縮縫最好采用封閉式。

上部構造是照最大載重汽-10，拖-60或汽-18，拖-80来計算的。計算是采用一般的方法依照“預应力鋼筋混凝土桥临时技术設計規范”（道路出版社1952年）来进行的。

全部裝配式上部構造大梁都是在現場附近的預制場上，于木模中制成的。大梁的混凝土是在天然的条件下游生得到強度的。在某些構造物中，用蒸汽養生或用大梁加熱的方法来使混凝土加速硬化。張拉鋼絲束時間的早晚取決于混凝土的硬化条件，一般在混凝土灌注后6~30天一次張拉。在某些上部構造中，混凝土是按三阶段早期受力的施工技术規程（該規程系由科学技术博士A.B. 薩塔金与科学技术碩士B.A. 森欽柯建議与拟定的）进行早期加載。

大梁安裝于跨徑以前，包鋼絲束用的鉄皮管中应以水泥膏或水泥砂漿注滿。大梁的安裝工作是用龍門吊裝机（該机沿低水位便桥移动）或悬臂吊裝机来进行的。在某些桥梁中，大梁是裝在滾运小車上运往桥跨（滾运小車沿工作便桥移动），然后橫向移动安裝就位的。

多数已建成的預应力混凝土桥的結構与施工方法,在“装配式鋼筋混凝土桥梁設計与施工論文集”(汽車运输与公路部出版社,1955)中已有詳細的說明。

除了少数例外,所有这些桥梁都經受过桥梁試驗站的靜載試驗,在一系列的情况下,还經受过动力試驗与冲击試驗。有一些桥梁,在进行上部構造的試驗前,先用試驗梁(其尺寸与大梁的实际尺寸相同)作破坏試驗。

試驗梁載重試驗的結果很好,这証明了計算假定条件的正确性。大梁的抗裂性一般都接近于設計要求,而实际的强度安全系数还超过了設計的要求。

上部構造的試驗結果一般也很好;活載有規律地分布于全部上部構造的大梁之間,量出的撓度与应力沒有超过理論数值,而动力振動很快就消失了。装配式上部構造在載重試驗中出現的唯一缺点,是在橫隔板接头处有不大的裂縫,这些裂縫在活載取去后就恢复了原狀。

在調查时發現許多桥梁的工程質量很低。在个别上部構造中,发现了非常严重的預应力結構所特有的缺点。在复查时,不仅发现在其他上部構造上也存在着上述缺点,而且在个别上部構造上还发现了新的、以前所沒有的缺点。多数缺点是很严重的,这些缺点大大影响構造物的寿命,而在个别情况下还影响構造物的承重能力,甚至需要进行修理。

上述事实說明預应力桥梁在設計与施工方面都存在着严重的缺点与疏漏。在下面的报告里,簡要地叙述了預应力鋼筋混凝土桥梁研究的結果,同时对一些严重缺点作出了分析,并提出了今后建桥时防止产生上述缺点的意見。

預应力上部構造的主要缺点

所发现的預应力混凝土桥的缺点基本上可分为三类：

第一类：預应力結構特有的缺点，与預应力材料有关的缺点，与預应力鋼筋混凝土上部構造的结构特点有关的缺点；

第二类：装配式鋼筋混凝土上部構造特有的缺点，其中也包括預应力特有的缺点；

第三类：鋼筋混凝土桥梁結構特有的施工中的一般缺点，其中也包括預应力在施工中的一般缺点。

預应力混凝土桥的特殊缺点

預应力过份的损失

随着时间的增長，通过鋼絲束傳导的預应力，由于鉤头移动与挤压，主要是由于混凝土受压引起的收縮与徐变而造成一些损失。混凝土受压而产生徐变是由一系列的因素引起的，这些因素现在尚未研究清楚。所以計算时只憑估計。設計时不考虑混凝土的級配、加压的时间与受力的大小，估計因混凝土收縮与徐变，在鋼絲束上引起預应力的最終损失为1000公斤/平方公分。这个数字是根据一些密实而堅固的混凝土經過28天養生后的受力經驗得出来的。

桥梁的研究結果証明，許多構造物的預应力损失，实际上大大超过了設計数字。

苏拉河桥的大跨徑上部構造下面的一根用作檢驗而未灌漿的受拉鋼絲束表明，經過一年以后，其預应力损失达1300公斤/平方公分，假如照这段時間內增長的应力损失来作表示函数的規律（采用多数的試驗結果），其結果預应力的损失数字約比設計数字大一倍。

許多被調查的橋梁，其上部構造下垂，這同樣證明預應力有很大的損失及大梁下部受拉範圍內的壓應力有相當大的減縮。照大梁設計應力圖的施工預拱高度進行計算來證明，有一系列的橋都應當是增加而不應減少。

個別上部構造內的鋼絲束在很短時間內，其預應力損失了50~70%。這樣就使一些上部構造在其下部受拉範圍內發生橫向裂縫，此種裂縫的寬度達2.5公厘，而長度超過1公尺。

分析這些橋梁的調查結果可以得出結論，預應力如此顯著地損失的主要原因是施工人員違反設計技術規程，例如：當混凝土的強度遠未達到設計強度時就張拉鋼絲束，而在個別情況下，毫無根據地增加鋼絲束的計算控制拉力，在張拉時亦未採取辦法使大梁脫模。

圖7是在德國用來決定混凝土最終徐變數值與混凝土受壓時強度的關係圖。由此圖看出，混凝土受力時強度僅僅減少35%，徐變就增加2倍

混凝土的徐變與受應力大小的關係表現得如此明顯，近來把混凝土的非彈性變形分成兩部分——徐變與塑性變形。混凝土受壓未超過其極限強度的40~50%在非彈性變形時的逐漸減縮稱為徐變，它與混凝土中應力的重行分布，傳遞一部分應力於組成混凝土的膠體、結晶結合物與填充料有關。塑性變形出現在混凝土受高應力而接近於其極限應力時，混凝土結合間重行分布應力而部分水泥結構已被破壞，沿立體移動，並出現毛細裂紋。以其大小來

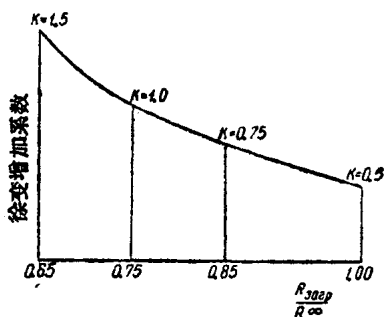


圖7 最終徐變數值與混凝土受壓時強度的關係圖

說，塑性變形大大地大于徐變，并不明顯表現減弱的性質。

在所有被調查過而預應力損失很大的橋梁中，混凝土開始受力都在灌注後10~25天，而且由於養生時間短、或者是周圍溫度低的結果，其硬化只達到設計強度的60~70%，有個別情況還更低。鋼絲束是一次拉到設計應力的。在這樣的條件下張拉鋼絲束時，在混凝土中所產生的應力，接近於其極限強度，這就使得混凝土的徐變有很大的增加，因而預應力也就有更多的損失。

預應力損失的大小與張拉鋼絲束時混凝土強度的關係特別明顯地表現於蘇拉河橋的大跨徑上部構造中。該橋上部構造分三次灌注——首先灌注箱形梁底板，其次灌注大梁的腹板，最後澆灌橋面板。以相反的次序來張拉鋼絲束，即是先張拉橋面板內的鋼絲束，然後張拉大梁底板內的鋼絲束。這兩部分的混凝土在張拉時都未達到設計強度，且橋面板混凝土強度大大低於底板混凝土強度，前者的強度僅為150~175公斤/平方公分，而設計強度是350公斤/平方公分。該橋建成後隔了一年再進行重復觀察，觀察的結果表明，無論底板或橋面板內鋼絲束預應力的損失都大大超過了設計所允許的數值；底板內的鋼絲束使用一年後，損失計算應力20%，橋面板內的鋼絲束損失應力50%左右，這樣就使得在大梁靠近橋墩截面的人行道懸臂上出現橫向裂縫，有一些裂縫直接穿過了橋面板。

在滬甯河橋的上部構造上，其預應力亦有很大的損失。這個橋多數大梁的混凝土，也是在它達到設計強度的50~75%時才張拉鋼絲束的。為了抵消由於混凝土早期受力而損失的預應力，施工人員就在不同的大梁上，比計算數值多加了18~31%的預應力。預制大梁的基礎不夠穩定；所以在張拉鋼絲束時，大梁未經過自動脫模，以及靜重未能全部發生作用。由這三個原因，使得大梁下部混凝土所受應力達到了極限強度，甚至超過了極限強度。在梁的下部增加很大的塑性變形，而使壓應力降低了很多，所以在大多數淨跨為30.0

公尺的大梁中，安裝好并鋪好橋面以後，在其三分之一的地方發生了很大的橫向裂縫。

在三根 $l_0=30.0$ 公尺與八根 $l_0=20.0$ 公尺的上部構造大梁中，塑性變形發展得特別厲害，脫模後經過2~3天張拉鋼絲束後，大梁下部就發生裂縫。所有這些大梁的鋼絲束都經過再次張拉， $l_0=30.0$ 公尺大梁的再次張拉，是在第一次張拉後4~8天進行的，當時的氣溫接近於 0° ，混凝土的強度實際上沒有變化，所以再次張拉鋼絲束沒有收到效果。大梁安裝到跨徑上後，又損失了很大一部分預應力。 $l_0=20.0$ 公尺大梁的再次張拉是在第一次張拉後15~18天進行的，由於兩次張拉的間隔時間較長以及混凝土的硬化條件較好（ $l_0=20.0$ 公尺的大梁是在橋頭填土上就地灌注的），混凝土的強度有顯著的增加，所以經過再次張拉鋼絲束後，雖然預應力有損失而且超過了設計允許的數值，但大梁並未發生裂縫。

從溫曼河橋的例子中可以看出，預制大梁時違反設計技術規程會導致什麼樣的不良後果，特別是在張拉鋼絲束時，要大梁脫模并使大梁全部靜重發生作用是有着何等重要的意義。以增加計算控制拉力來抵消預應力過多的損失並不是經常都能辦到的。假如在張拉時混凝土的強度很低，而短期內又沒有條件使混凝土的強度大大增加，那末增加計算控制拉力會得到不良的結果，因為這樣做會使塑性變形大為增加。

在某些橋梁中，鋼絲束是在混凝土早期分三階段進行張拉的。可惜對於這些分次張拉進行預加應力的橋梁上部構造，沒有組織用各種必要的儀器來進行研究，多數上部構造預應力的損失究竟有多大全蘇道路科學研究院並不知道。由於這些上部構造沒有橫向裂縫，因此可以證明其預應力的損失不會超過50%。

某一橋梁上部構造（其鋼絲束是分次張拉的）的水准測量表明，其大梁上部構造下垂與預應力損失超過了設計允許的數值。

沿鋼絲束的裂縫

在調查中發現 7 座預應力鋼筋混凝土橋的大梁沿着鋼絲束有嚴重的裂縫。在各橋中有裂縫的大梁占 6~100%，总共 268 根大梁中有 108 根出現裂縫。

在多數的簡支梁上部構造中，僅在 T 形梁下弦的混凝土上有裂縫，這些裂縫通常分布在 T 形梁下弦旁側表面上，在底面上則較少見，而在下弦的斜面上更少出現裂縫（圖 8, a）。必須指出，T 形梁下弦底面裂縫絕大多數是沿着靠邊的鋼絲束出現的，沿着中心鋼絲束的縱向裂縫還未見過。

有很多大梁，在其上同時有沿着兩根靠邊（例如，沿下面或旁邊）鋼絲束的裂縫。

有腹板混凝土中很少發現有沿彎曲鋼絲束的裂縫。在這種情況下要是裂縫，那就是使腹板兩面都穿裂的裂縫。

懸臂上部構造不僅沿着下面的鋼絲束有裂縫，而且還沿着分布在腹板內的鋼絲束，或者是分布在橋面板內的鋼絲束也有裂縫（圖 8, b）。

裂縫寬度由毛細狀況到 2~2.5 公厘，在一根大梁中，其固定錨頭附近的裂縫寬達 3.5 公厘。

裂縫沿跨構分布的規律還未發現。在大梁的中部與大梁靠近墩台的部分，同樣常見到裂縫（圖 9）。裂縫的長度由 50~60 公分到几公尺。有這樣的情況，裂縫沿鋼絲束斷斷續續地延伸于全部大梁上。最常見的裂縫開始于灌漿用的鐵皮支管處，而此處的裂縫通常也最大。在有兩個“串聯”結構的大梁中，32 個塊件，15 個有縱向裂縫。與其他橋梁不同的地方是所有裂縫都分布在 T 形梁的下弦，並開始于用灰漿填塞的塊件接縫處。這點可以證明，沿橋長用塊件聯結的大梁，其裂縫是在施工時形成的，施工人員也能記實這點。其

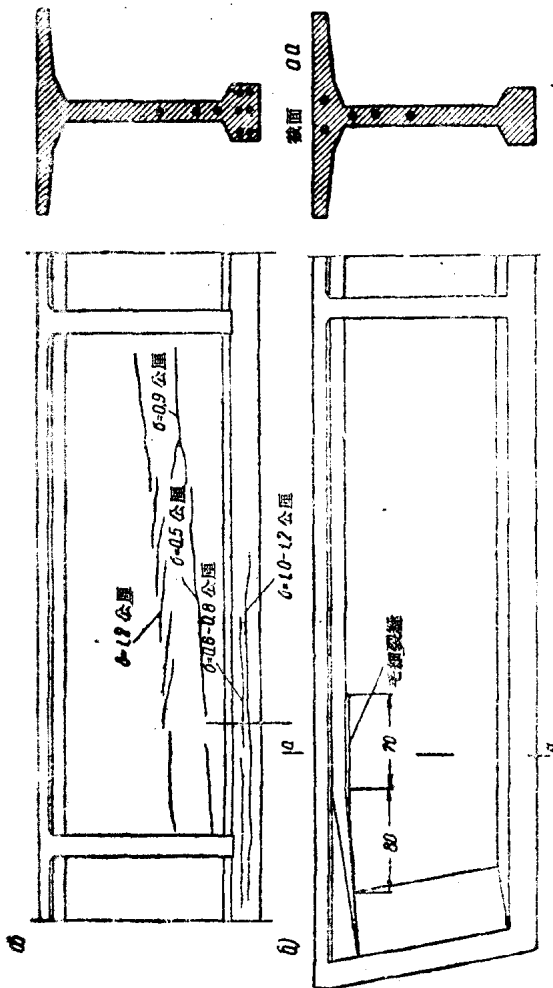


圖 8 沿鋼線束分布的裂縫

他上部構造裂縫的形成時間不知道，因為對已建成的橋梁的上部構造未經常進行觀察。有兩座橋是在建成后，經過 3~7 月的驗收檢查才發現裂縫的。另外兩座橋在第一次檢查時並未發現裂縫，在建

成后經過三年在第二次檢查时才发现有裂縫。还有兩座桥建成后未予驗收，經過三年在观察时发现有裂縫。

必須說明的是，沿着鋼絲束的裂縫，从外表上看不象扁豆形，而是断断續續分开的。这种裂縫与某一座桥由于鉄皮管內灌注的灰漿受冻而产生的裂縫不同，此处（灌漿受冻的地方）除裂縫外，混凝土还有蜂窝。在沿鋼絲束有裂縫的大梁上，沒有任何蜂窝，裂縫的端点很尖，对于这种裂縫就使混凝土发生断裂。在一些有裂縫的大梁腹板上，力的作用对裂縫表現得很清楚。正如图8, a所示，裂縫并不是簡單地沿着鋼絲束进行，而是毗連着受切应力的影响而形成相互交叉的裂縫系統，这种裂縫由鋼絲束轉向主拉应力的方向进行。

拆开大量鋼絲束加以檢驗后的結果表明，鋼絲束的鉄皮管不論是灌滿灰漿的或是不灌灰漿的或是只灌了部分灰漿的沿着它都有裂縫。

由于缺乏关于更多桥梁方面必要而切实的文件，所以不能說明裂縫与使用材料及施工方法之間有何种关系。只可以說，形成裂縫的原因与裂縫的多少，明显地与用来制造大梁的混凝土所用的水泥数量有关。例如在全苏道路科学研究院監督下修建的奥尔霍瓦特卡河桥，沒有沿鋼絲束的

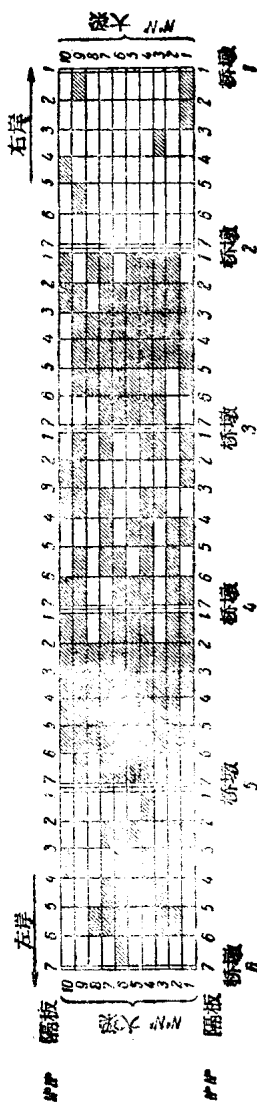


圖9 巴拉克列依加河桥的上部構造縱向裂縫分布圖，用筆畫過的節間有裂縫