

鋼梁裂紋檢查分析及加固

沈陽鐵路科學技術研究所

1 开展桥梁鋼梁裂紋检查工作情况

前 言

沈陽局管内桥梁之鋼梁运用年限一般的已达20—50年左右。

由于鋼梁鋼料之化学成份不純，在制造上与構造上欠佳，加之以往使用不良，保养不周，同时遭受战争破坏，又經過过無数次載荷冲击，因此，出現了鋼梁杆件裂紋。如第二松花江甲桥第3、4孔鋼梁之上下弧杆件及节点鉸裂紋，渾河大桥上行綫第15孔鋼梁斜杆裂断；辽陽太子河桥上行綫第3、4、5、6、10孔鋼梁活动端端橫梁連結鉸裂紋等。因而严重地危及行車安全，特別是第二松花江桥第三、四孔鋼梁裂紋情况严重，更应加倍的在思想上提高了警惕随时掌握鋼梁裂紋的病害保証安全运输。因此自57年八月份起开展了全面的鋼梁裂紋检查工作。

一、工作的开展情况：在一个較短的时间內摸清一千余座鋼桥的鋼梁裂紋情况是有困难的。我們在党的领导下，發动了广大群众，依靠了全体桥梁工，巡守員及全体养桥工作者开展了声势浩大的人人檢查鋼梁裂紋运动。維修到那一座桥就檢查那一座的鋼梁裂紋，工長、領工員日常工作檢查到那座桥就把工作重点放在那座桥的鋼梁裂紋檢查上。

对鋼梁裂紋进行檢查，我們尚無系統的完整方法，主要是學習了哈爾濱局鋼梁裂紋檢查經驗和結合第二松花江桥鋼梁監視小組鋼梁裂紋檢查方法，来进行这项工作的。

二、鋼梁裂紋檢查的重点：鋼梁裂紋檢查是全面而又細致的工作，考慮到鋼梁各部結構不一，因而對於各種類型不同鋼梁，檢查重点也就不同。

工字鋼梁：工字鋼組合聯結板處；

上承板梁：上下翼緣蓋板拼接處，角鋼拼接處，腹板拼接處；

下承板梁：上下翼緣蓋板拼接處，角鋼拼接處，腹板拼接處；縱梁與橫梁聯結處，橫梁與主梁連系處；

上承桁梁：上弦、下弦、腹杆、杆件之拼接處，節點板處；

下承桁梁：上弦、下弦、腹杆、杆件之拼接處，節點板處；

橋門架連結處，縱梁與橫梁連接處，橫梁與主梁聯結處；

對上述各種類型梁的這類地方，是着重而且較細致的觀看，檢查時主要是看鋼梁表部特別是鉚釘地方，有無銹痕油漆有無變化。若有異狀，立即用偏刀鏟除油漆用放大鏡仔細的觀察。經過了一個時期的鋼梁裂紋檢查工作，初步摸索到一點檢查經驗。僅按裂紋狀態的不同分為四類：

1. 油漆表面生銹呈現紅褐色或在其附近有銹水痕跡，由於裂紋所處部位不同，有三種情形。

① 油漆已剝落受空氣潮濕而氧化，裂紋呈現鋸齒形。

② 裂紋處由於存水氧化後流銹積多形成銹皮，多出現在蓋板側面。

③ 一條銹綫，油漆開裂而未剝落，這種裂紋多出現在

鉚釘周圍及鋼板的邊緣。

2. 油漆開裂，鋼板呈現淺白色開口，沒有銹蝕的為新紋，多出現在受拉力部分。

3. 油漆表面龜裂，并有的在細小裂紋處生有小銹泡，這類裂紋不易發現。

4. 鋼梁裂紋被油漆遮盖，仅在油漆表面呈現綫狀痕迹。

三、开展鋼梁裂紋檢查工作的收效：57年春季鋼梁裂紋為113孔，自57年8月份展开鋼梁裂紋檢查后，57年秋季發現鋼梁裂紋數達185孔。58年春季鋼梁裂紋為220孔，58年秋季鋼梁裂紋為241孔。从这些数字看来說明鋼梁裂紋是在逐漸增多，总的來說这是好的情况，如不及早發現將會給运输事業帶來極大的威脅。通过檢查，使我們掌握了鋼梁裂紋病害，并摸索出一点点規律，即在下列几种梁的不同部位容易發生裂紋：

1. 工字鋼梁的每一片主梁若由三片工字鋼組合成，由于承載不均，形变不同在每片工字鋼連結鉤處發生裂紋。

2. 上承板梁的斷面連接系与主梁內側加勁鉤連結處加勁鉤最下鉚釘附近由于形变不均容易拉裂。

3. 下承桁梁的端橫梁与主梁連接處，由于端橫梁与支座板間有縫隙不密貼造成連結鉤裂斷。

4. 魚腹板梁中間节点斜杆由于承受局部应力及承受不平衡的反复应力造成裂开。

5. 上承板梁电焊加强板处焊缝裂开系电焊时局部应力及与鉚釘共同受力不一所造成的。

四、对鋼梁裂紋的处理：对所檢查出来的裂紋根据發現

的时间，位置，状态、长度等编成顺号详细的記入登記簿內，并繪圖标明，同时在裂紋的尖端鑽眼防止扩大。除对严重的鋼梁裂紋危及行車安全时，工务段立即行进行加固工作：以保証运输的安全。自8月份开展鋼梁裂紋檢查以来，先后采取了以下各项措施：

1. 对裂紋的鋼梁进行鉴定确定运用条件，工务段將發現鋼梁裂紋繪有詳圖报工务处。桥梁檢定队根据各段的鋼梁裂紋报告，到現地进行复查，并認真观察演变的情况；然后在技术上进行分析与研究，找出鋼梁裂紋的原因，和消灭的对策。并对今后鋼梁养护与运用技术給予指导。十月份以前檢定队对哈大綫上151孔鋼梁进行复查与檢定，將“鋼梁裂紋檢查分析書”分發給各工务段，以便进行加固与今后的养护工作。

2. 运用維修能力进行加固：为了对發現的鋼梁裂紋进行加固与改善，各工务段加强了鉚工組，一般工作量不大的技术不复杂的整治鋼梁裂紋的工作，工务段根据檢定队“鋼梁裂紋檢查分析書”中的改善及加固施工办法进行工作。

3. 超过維修能力而技术較复杂的鋼梁裂紋由大修来施工加固，如渾河大桥上行綫第十五鋼梁斜杆断裂。

4. 鋼梁之裂紋属于鋼質發脆而造成的，进行了整孔新鋼梁更換，如第二松花江甲桥第三、四孔鋼梁。

5. 为了更好地把桥梁养护好，保証“1、5、1”运输任务胜利完成，和适应今后运输要求，在今年冬季繼續更深入的展开鋼梁裂紋檢查工作，全面的細致的掌握鋼梁裂紋病害及时的消灭，确保行車安全。

II 鋼梁裂紋原因分析及加固方法

在分析鋼梁裂紋产生根源时，除从杆件受力及構造上的缺陷进行分析外，应对鋼料的物理与化学性能进行試驗研究，判明鋼料質量。并要調查修建当时制作条件及以往破坏修复历史資料；根据裂紋所在部位及裂紋現象，結合上述資料进行綜合分析。鋼梁裂紋与受力及列車冲击作用是有着一定关系。一般來說在找鋼梁裂紋發生根源是不能單純按受力因素来分析的。鋼料的化学与物理性能也是一个很重要的因素。茲將鋼梁几类裂紋原因及加固方法介紹如下：

一、第二松花江甲桥3.4孔鋼梁裂紋分析及加固。(如图1)

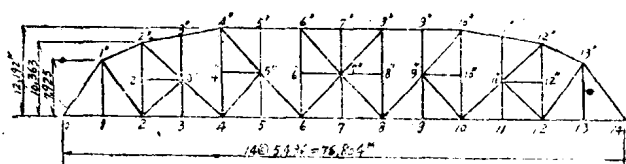


图1. 跨度76.80m下承曲弦构梁

第二松花江甲桥3.4孔鋼梁裂紋分析及加固 (如图1)

第二松花江甲桥第3.4孔鋼梁为跨度76.80m下承曲弦构梁，系1901年中东路制造，鋼料为比利时产。該梁原在賓洲綫嫩江旧桥上，于1950年由嫩江現場拆解后运来松花江桥鉚拼。在运行中鋼梁下弦主要节点钣于1953年开始發現裂紋，到1956年1月共發現裂紋214处。56年7月至9月对主要节点钣进行了加固。57年1月組織鋼梁監視小組，檢查鋼梁裂紋及撓度、拱度变化情况：自監視以来，發現鋼梁裂紋繼

續增加，到57年8月21日止；下弦杆蓋板（鋼板邊緣及鉚釘處）發現裂紋200處。上弦杆豎板（鉚釘處）發現裂紋615處等共計裂紋976處，其中新裂紋103處，裂紋長度在40公厘以上者有27處。

第3.4孔鋼梁杆件的断面是够大的， σ 巧1型双机牽引杆件受力仅达 $1100\text{Kg}/\text{Cm}^2$ 若鋼梁料的化学与物理性能都很正常，單从受力来分析是不应该有裂紋的。为什么現在檢查出来900多处裂紋呢？我們从多次鋼料試驗数据及裂紋分布情况来看，裂紋集中在鋼板上大部份在釘孔边，部份在鋼板邊緣。裂紋主要原因是鋼板質量不好，很脆。（鋼料含磷0.10%以上，并含氧化鉄杂质，抗冲击韌性仅 $1.05 \sim 1.98 \text{Kg-M}/\text{Cm}^2$ ）。加上修建当时施工作业粗陋（鉚釘孔一次冲成未扩孔，鋼板冷切未修建）等缺陷造成。1930年苏联交通部調查局对该桥进行試驗，用显微鏡檢視鋼板邊緣及釘孔曾發現很多細紋。这些細小裂紋随着列車高速度运行的劇烈振動，加上裂紋細尖的局部应力集中，因而裂紋繼續扩大，伸出釘头外面。如第3孔10节点板及第4孔2节点板裂紋發展到貫通节点板全高。

关于鋼梁繼續使用及加固措施；像这样脆性鋼料的鋼梁，已無加固价值，應該予以更換，为了临时維持低速通車可作局部补修及严格監視。

（1）降低速度为 $15\text{KM}/\text{小时}$ 运行，尽量减少列車的冲击影响。

（2）裂紋長度超过20公厘，在裂紋尾端鑽孔 $\phi 12$ 公厘，以免裂紋繼續扩大。裂紋長度超过40公厘，在裂紋尾端鑽孔 $\phi 12$ 公厘后，以拼接板补修。

(3) 补强鋼梁下弦主要节点鉚24塊。

(4) 考虑到杆件的角鋼部份質量較好在加固計算时，把杆件去掉鋼鉚（仅起綴鉚作用）按角鋼截面計算，补上所需截面。根据口亏，型機車單机牽行列車运行速度15公里/小时計算結果，需对下弦杆件 4—10节点間增設 鋼鉚 1—II 360×12或角鋼 2—II 120×80×12。（如图2）

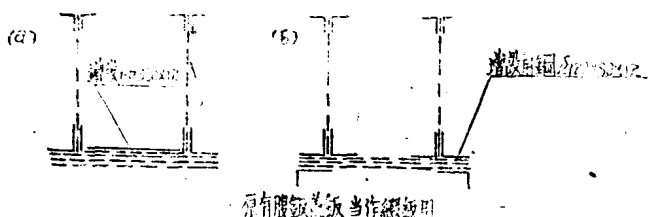


图2 下弦杆件加固示意图

(5) 組織鋼梁監視小組进行經常性細致檢查及补修，發現裂紋及时在裂紋尾端鑽孔 $\phi 12$ 公厘，并以接鉚补强。若裂紋長度所占截面超过杆件全面的 $\frac{1}{3}$ 时。（指鋼梁杆件原等級仅等于列車等級而言）就应临时封鎖，立即补强。（如图3）

(A) 所需拼接鉚截面等于裂紋長度所占的截面。（加固时，裂紋尾端必須鑽孔，否則裂紋会因尾端的細尖产生局部应力过份集中而繼續扩大）

(B) 拼接鉚所需鉚釘数量計算

$$\text{裂紋長度範圍內有效截面 } \omega_o' = 20 \times 1.2 - 2 \times 2.5 \times 1.2 \\ = 18.0 \text{ cm}^2$$

$$\text{鉚釘直徑 } \phi 22 \text{ 公厘，單剪鉚釘系数 } m_o = \frac{1}{0.9 \times \frac{\pi d^2}{4}} = \\ = 0.292$$

半邊拼接板所需鉚釘數量 n

$$n = l \cdot w_0' \cdot m_0 = 1.1 \times 18.0 \times 0.392 = 5.8 \approx 6 \text{ 个}$$

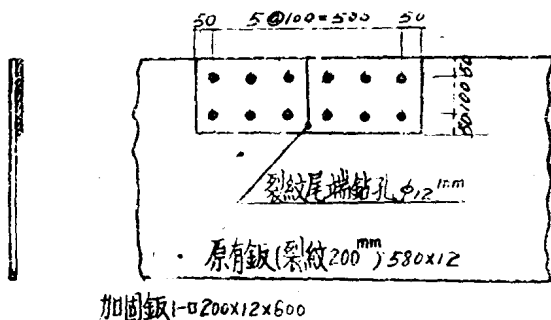


圖3 拼接板補強圖

二、縱橫梁連接角鋼裂紋分析及加固

沈局管內很多英制下承構梁縱橫梁連接都沒有魚型板，因此，縱梁受力后變形在梁端上部產生旋轉角度為 θ ，使連接角鋼上部產生拉力。由於連接角鋼厚度不足，受力超過撓曲容許應力，甚至於大於鋼料的屈服點強度，部份角鋼出現縱向裂紋。（如圖4）

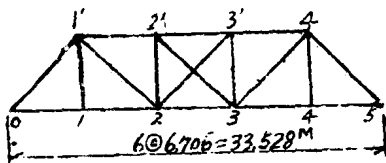


圖4a 跨度33.528m下承構梁

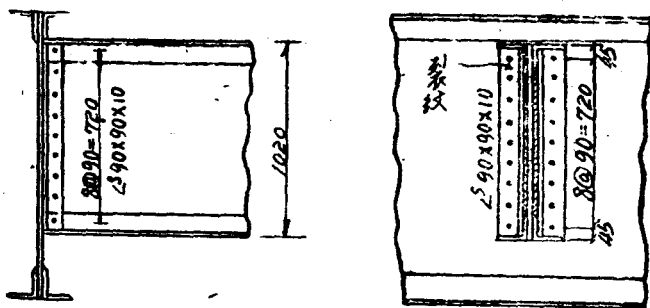


图 46 縱橫梁連接角鋼裂紋

(1) 連接角鋼应力分析

下構梁跨度 33.528^M

縱梁長度 $d = 6.706^M$

縱梁中心距 2.00^M

桥上运行列車 $\Pi 3_4$ 型貨車。

剪力: $\alpha = 0$ $\lambda = 6.706^M$, $\Omega = \frac{6.706}{2} \approx 3.35^M$

$$k_{n34} = \frac{30.6}{2} = 15.3^T/M. \quad p = \frac{1.2}{2} = 0.6^T/M.$$

$$Q = \Omega(k_{n34} + p) = 3.35 \times (15.3 + 0.6) = 53.2^T$$

$$\text{中点力矩: } \alpha = 0.5 \quad \lambda = 6.706^M \quad \Omega = \frac{6.706^2}{8} = 5.61^M^2$$

$$k_{n34} = \frac{25.0}{2} = 12.5^T/M. \quad p = 0.6^T/M.$$

$$M_{0.5} = \Omega(k_{n34} + p) = 5.61 \times (12.5 + 0.6) = 73.5^T-M$$

$$\text{端点負力矩 } M' = 0.1 M_{0.5} = 0.1 \times 73.5 = 7.35^T-M = 735^T-cm$$

接橫梁上鉚釘檢算

(a) 鉚釘拉斷应力 (如圖 5)

$$\frac{\pi}{4}(2.2)^2 = 3.8 \text{ cm}^2 \quad a' = \frac{3.8}{9} = 0.42 \text{ cm}$$

$$r = \sqrt{\frac{a'}{a}} = \sqrt{\frac{0.42}{9}} = 0.216$$

$$C = \frac{h}{1+r} = \frac{81}{1+0.216} = 66.5 \text{ cm}$$

$$rC = 0.216 \times 66.5 = 14.5 \text{ cm}$$

$$J = \frac{1}{3} \times 0.42 \times 66.5^3 + \frac{1}{3} \times 9 \times 14.5^3 = 41.2 \times$$

$$10^3 + 9.1 \times 10^3 = 50.3 \times 10^3.$$

最上一个鉚釘拉应力 $b = \frac{M'}{J} x = \frac{735/2 \times 62}{50.3 \times 10^3} =$

$$0.452 \text{ T/cm}^2 = 452 \text{ kg/cm}^2 < 0.7 \times 1700.$$

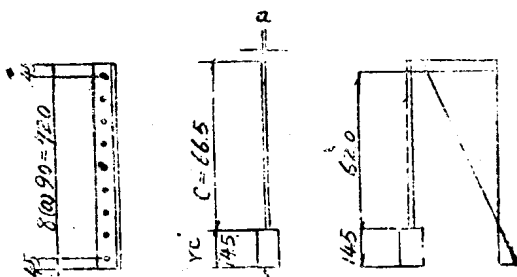


圖 5 連角鋼及鉚釘受力情形

(6) 鉚釘剪应力

$$\tau = \frac{Q}{n \cdot F} = \frac{53.2}{18 \times 3.8} = 0.75 \text{ T/cm}^2 < 0.9 \times$$

$$1.7 \text{ T/cm}^2.$$

按連接角鋼厚度檢算

(a) 剪应力 (如圖 6)

$$\tau = \frac{Q}{2 \times 0.667 \times b \times 8} = \frac{53.2}{2 \times 0.667 \times 81 \times 1.0} = 0.49 \text{ t/cm}^2 = 490 \text{ kg/cm}^2 < 0.75 \times 1700.$$

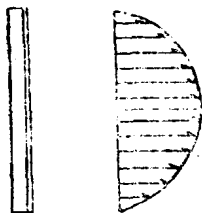


圖 6 連接角鋼剪应力圖

(6) 角鋼撓曲应力 (如圖 7)

$$p' = 452 \times 3.8 = 1715 \text{ kg}$$

$$M'' = 0.6 p' (g - t) = 0.6 \times 1715 \times (5 - 1) = 4120 \text{ kg-cm}$$

$$W = \frac{1}{6} \times 9 \times 1.0^2 = 1.5 \text{ cm}^3$$

$$b = \frac{M''}{W} = \frac{4120}{1.5} = 2740 \text{ kg/cm}^2 > 1700 \text{ kg/cm}^2 \text{ 并}$$

超过了鋼料屈服点强度，因此，部分連接角鋼上出現裂紋。

鉚釘所受拉断力 $T = P' + C$

$$\frac{2}{3} q e = \frac{1}{2} p' (g + t) \quad \therefore C = \frac{3}{4} p' \frac{(g - t)}{g}$$

$$p' = 1715 \text{ kg} \quad q = 40 \text{ cm} \quad g - t = 4.0 \text{ cm}$$

$$\therefore T = P' + C = P' \left(\frac{3}{4} \times \frac{(g-t)}{q} \right) = 1715 \times \left(\frac{3}{4} \times \frac{4.0}{4.0} \right) =$$

$$3000 \text{ kg}$$

$$\text{鉚釘拉斷应力 } b = \frac{3000}{3.8} = 790 \text{ kg/cm}^2 < 0.7 \times 1700$$

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

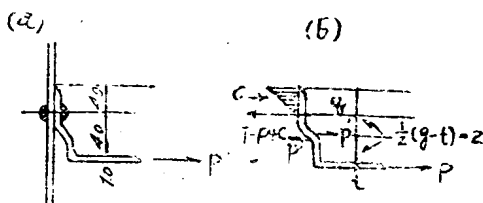


图7 角鋼撓曲与鉚釘拉斷受力图

(2) 加固方法:

(a) 更換較厚的角鋼

計算載重中22級

$$\alpha = 0.5 \quad \lambda = 6.706 \text{ M} \quad \Omega = \frac{6.706^2}{8} = 5.61 \text{ M}^2$$

$$K\phi_{22} = \frac{1}{2} \times 1.23 \times 22 = 13.5 \text{ T/M} \quad P = \frac{1.2}{2} = 0.6 \text{ T/M}$$

$$\text{中点力矩 } M_{0.5} = 5.61(13.5 + 0.6) = 79.0 \text{ T-M}$$

$$\text{端点負力矩 } M' = 0.1 M_{0.5} = 0.1 \times 79.0 = 7.9 \text{ T-M} = 790 \text{ T-cm}$$

$$\text{同前, } J = 50.3 \times 10^3$$

$$\text{最上鉚釘拉应力} = b \frac{395 \times 62}{50.3 \times 10^3} = 0.486 \text{ T/cm}^2 =$$

$$486 \text{ kg/cm}^2$$

連接角鋼所需厚度

$$P' = 486 \times 3.8 = 1850 \text{ kg}$$

$$M'' = 0.6 \times 1850 \times 4.0 = 4440 \text{ kg-cm}$$

$$W = \frac{1}{6} \times 9 \times t^2 = \frac{M''}{b} = \frac{4440}{1700} = 2.61 \text{ cm}^3$$

$$t = \sqrt{\frac{2.61}{1.5}} = 1.32 \text{ cm} \cong 1.3 \text{ cm}$$

採用 $\angle 90 \times 90 \times 13$ 角鋼將原連接角鋼更換。

(6) 在縱梁上加魚型鉚或 2 根圓鋼 $\phi 35$ 公厘。(如圖 8)

$\phi 35$ 圓鋼電焊或鉚接魚型鉚

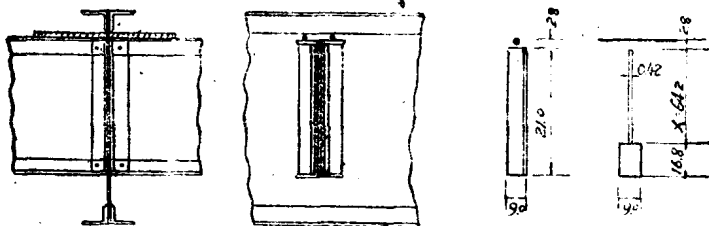


圖 8 縱橫梁連接增設魚型鉚加強

計算載重中 22 級，端點負力矩 $M' = 790 \text{ T-cm}$

$$a' = \frac{3.8}{9} = 0.42 \text{ cm}$$

$$9 \times \frac{1}{2} (81 - x)^2 = 0.42 \times \frac{x^2}{2} + 1 \times \frac{\pi \times 3.5^2}{4} (x + 2.8)$$

$$x = 64.2 \text{ cm}$$

$$J = \frac{1}{3} \times 9 \times 16.8^3 + \frac{1}{3} \times 0.42 \times 64.2^3 + \frac{\pi \times 3.5^2}{4}$$

$$(64.2 + 2.8)^2 = 14.2 \times 10^3 + 37.0 \times 10^3 + 28.5 \times 10^3 = 79.7 \times 10^3 (\text{cm}^4)$$

最上一个铆钉拉应力

$$b = \frac{395 \times 59.7}{79.7 \times 10^3} = 0.296 \text{ T/cm}^2 = 296 \text{ kg/cm}^2$$

连接角钢最大挠曲应力

$$P' = 296 \times 3.8 = 1120 \text{ kg}$$

$$M'' = 0.6 \times 1120 \times 4.0 = 2690 \text{ kg-cm}$$

$$W = \frac{9 \times 1.0^2}{6} = 1.5 \text{ cm}^3 \quad (\text{对 } 90 \times 90 \times 10)$$

$$b = \frac{M''}{W} = \frac{2690}{1.5} = 1790 \text{ kg/cm}^2$$

三、端横梁与主梁连接角钢裂纹分析及加固。

沈局管内很多跨度33.122^m英制下承构梁桥端横梁与主梁连接角钢由于构造上的缺陷，使连接角钢担负过大应力，而产生裂纹。（如图9）

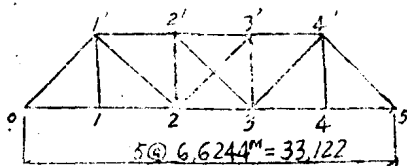


图9a 跨度33.122^m下承构梁

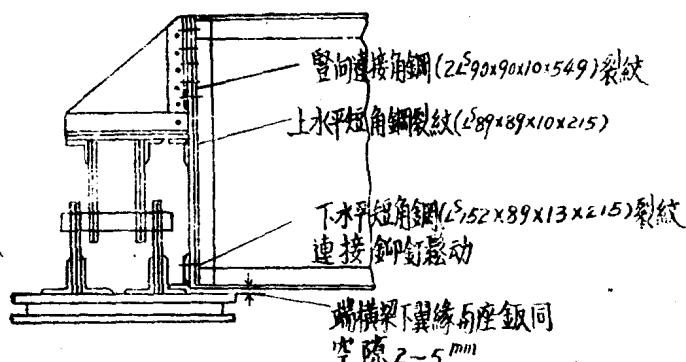


圖 9. 端橫梁與主梁連接角鋼裂紋

(1) 裂紋原因分析:

端橫梁下翼緣及豎系鉚與座鉚間有空隙 (2 ~ 4 公厘) 則下水平連接短角鋼承担大部支承反力, 由于角鋼断面不足 (原設計是不考虑这些角鋼来承受反力) 及連接鉚釘数量不够, 因而角鋼及鉚釘受力过大, 产生弯曲或裂紋和松动。下水平連接短角鋼弯曲或裂紋后, 上水平連接短角鋼及豎連接角鋼也因撓曲受力过大产生裂紋。

(a) 下水平連接短角鋼裂紋分析

在連接鉚釘受力达到容許应力情况下, 水平短角鋼承压面受力过大角鋼就开始撓曲产生裂紋。(如圖 10a)

鉚釘容許剪应力 $\tau = 0.9b = 0.9 \times 1700 = 1530 \text{ kg/cm}^2$

四个鉚釘受力 $P = 4 \times \frac{\pi \cdot 2.2^2}{4} \times 1530 = 23200 \text{ kg}$

• 角鋼水平肢承压应力

$$b' = \frac{P}{A} = \frac{23200}{2 \times 21.5 \times 8} = 67.5 \text{ kg/cm}^2$$

拐弯处挠曲应力

$$M' = 67.5 \times 21.5 \times \frac{8^2}{2} = 46500 \text{ kg-cm}$$

$$W = \frac{21.5 \times 1.3^2}{6} = 6.1 \text{ cm}^2$$

$$b = \frac{M'}{W} = \frac{46500}{6.1} = 7620 \text{ kg/cm}^2 > 1700 \text{ kg/cm}^2 \text{ (裂紋)}$$

铆钉拉断应力

$$P' \times 3.85 = \frac{M'}{4} \quad P' = \frac{M'}{4 \times 3.85} = \frac{46500}{4 \times 3.85} = 6050 \text{ kg}$$

$$b = \frac{P'}{A} = \frac{6050}{3.8} = 1600 \text{ kg/cm}^2 > 0.7 \times 1700 \text{ kg/cm}^2 \text{ (松动)}$$

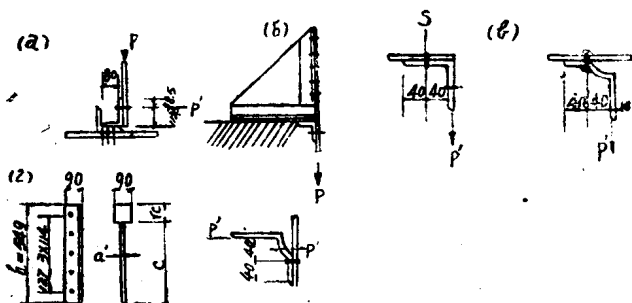


圖 10 連接角鋼受力情形

(6) 上水平連接短角鋼裂紋分析: (如圖 106, B)