

中国土木工程学会1962年年会

論文選集

—建筑結構部分—

(內部資料)

中国土木工程学会編

一九六二年十二月

前 言

本选集共收集了二十三篇論文。这些論文是本会第三届代表大会的重点交流資料。其中有几篇已在土木工程学报等刊物上发表了，但为了交流經驗，便于同志們了解中国土木工程学会第三届代表大会及1962年年会的主要論文的全貌和便于檢閱，所以仍編在本选集中。北京市土木建筑学会編写的《单层工业厂房屋盖系統經驗資料》，因已印发单行本，所以未列入。

本选集的大部分論文，在会后又由作者重新作了必要的补充和修改，这样，論文的质量虽然又有所提高，但仍可能有不妥之处，希讀者批評指正。

中国土木工程学会 1962年12月

目 录

1. 钢筋混凝土结构在重复荷载下的工作性能
.....冶金工业部建筑研究院 (1)
2. 普通钢筋混凝土构件的抗热性能.....冶金工业部建筑研究院 (60)
3. 集中荷载作用下剪跨与配筋率对抗剪承载能力的影响
.....冶金工业部建筑研究院 (84)
4. 对单层工业厂房屋盖系统的改进意见
.....建筑工程部北京工业建筑设计院 陶逸鍾 (126)
5. 非预应力钢筋混凝土多边形屋架次应力分析及加固研究
.....陕西省建筑科学研究所 (135)
6. 上海市预应力钢筋混凝土调查研究报告.....同济大学 朱伯龙 (165)
7. 电张折线形预应力钢筋补强钢筋混凝土梯形屋架
.....第一机械工业部第一设计院 朱育才、陈尔鑫 (179)
.....河北省建工厅设计院 譚玉成、韓光霽
8. 上海地区装配式多层工业厂房结构设计总结
.....建筑工程部华东工业建筑设计院 (189)
9. 样板结构的试验研究及其应用
.....北京市建筑设计院、建筑工程部北京工业建筑设计院 (228)
.....建筑工程部建筑科学研究所、清华大学
10. 振动墙板房屋的結構試驗研究和試点工程设计总结.....北京市建筑设计院 (251)
11. 装配——正体式钢筋混凝土圆柱形薄壳的设计和試驗
.....紡織工业部基本建設设计院 張欽杖、陈維儉 (274)
12. 钢筋混凝土薄壳結構极限平衡理論的概述.....西安冶金学院 陈儒惠等 (284)
13. 钢筋混凝土連續梁內力重分布的特性和計算.....建筑工程部建筑科学研究所 (298)
14. 迭代法計算多层剛架收斂性的改进.....內蒙古工学院 李炳威 (311)
15. 考虑空間工作时单层厂房动力及靜力的合理計算理論
.....哈尔滨建筑工程学院 王光远 (318)
16. 钢筋混凝土梁在撓矩和剪力作用下的强度計算
.....清华大学 吳柳生、施嵐青 (344)
17. 磚石結構房屋的空間工作.....同济大学 朱伯龙 (357)
18. 磚薄壳調查总结报告 (广东省部分)广东省建工局等 (369)
19. 60M直徑圓形薄壳屋盖金工車間.....新疆建工一师设计院 賴熾金等 (392)
20. 湖南地区磚木結構調查报告.....湖南省基本建設局设计院 (403)
21. 昆明地区磚牆高厚比問題的調查、分析.....云南省建工厅设计院 (416)
22. 冷却水塔筒壁附着式操作架施工.....水利电力部电力建設研究所 吳革非 (432)
23. 国外建筑結構技术的进展.....建筑工程部技术情报局 喻天璽 (439)

鋼筋混凝土結構在重复荷載 下的工作性能

冶金工業部建築研究院工程結構室*

隨着混凝土在工程界的廣泛應用，很多承受多次重复荷載的結構物，例如，路面，飛機跑道，公路鐵路橋梁，鐵路軌枕，以及工業建築中各種工作制的吊車梁與支承動荷設備的框架式基礎等等，都採用了鋼筋混凝土或預應力鋼筋混凝土結構。這些在重复荷載作用下的結構的性能，肯定不同於一般靜荷下的性能，因此引起了研究者的日益重視。但由於重复荷載試驗研究很費時間，至今資料累積尚不夠多，不能得到較系統的結論，同時各研究者在某些觀點上亦尚有不同。我們自57年起，圍繞工業建築中鋼筋混凝土吊車梁在重复荷載下的工作性能，對素混凝土、鋼筋、鋼筋焊接接頭、普通鋼筋混凝土及預應力鋼筋混凝土梁進行較系統的試驗研究，本文所介紹即5年來這些試驗研究的一些成果。為了更好的說明問題，文中并較系統的介紹了已收集到的國內外其他研究者的資料，進行比較。

由於研究工作尚處於初始階段，本文僅系中間報告的簡介，很多未解決的問題，有待繼續進行。

(一) 某些通用符號術語的定義與說明

各種材料及構件在重复荷載下，均具有某些共同的特性。在開始介紹之前，首先對這些特性及採用來表達這些特性的符號術語，加以說明，今後在文內即直接引用不另解釋。

使結構產生疲勞現象的重复荷載常有二種：第一種荷載其數值往往是常數，而由於結構本身轉動，因此產生疲勞現象，如機械中的轉軸，這種荷載稱之為迴轉重复荷載；

* 本文系由冶金建築研究院的6篇試驗研究報告摘錄組成，原報告為：

- (1) 冶金建築研究院焊接組、廠房組：鋼筋疲勞性能研究
- (2) 冶金建築研究院焊接組、廠房組：重复荷載下鋼筋焊接疲勞性能
- (3) 陳三行：素混凝土疲勞性能研究
- (4) 張慎余、陳三行、張樹平：普通鋼筋混凝土受彎構件在重复荷載下的工作性能
- (5) 朱君道：鋼絲束預應力混凝土薄殼吊車梁研究
- (6) 陳三行：后張法粗鋼筋預應力吊車梁的試驗研究

本文執筆者：張慎余 陳三行

第二种结构本身不动，而沿某一方向作用的荷载值为重复变数，如一般工程结构吊车梁等所承受的，这种荷载称之为直接重复荷载。本文所讨论范畴仅限直接重复荷载。

材料及结构在重复荷载作用下其破坏时强度将大大低于静荷强度，其破坏时强度与静荷强度相比较即称之为疲劳强度折减系数 $k_y(\gamma_a)$ ，此时，以 R'_a 、 R'_u 、 R'_p ……等来代表材料的疲劳强度。

材料在重复荷载作用下往往产生二部分变形，第一部分变形为卸荷后即可恢复者称之为弹性变形 ϵ_y ，第二部分变形为卸荷后不可恢复者称之为残余变形 ϵ_{ocr} 。混凝土的残余变形特别显著，故在某一重复应力 σ_B 下，常取其变形模量 $E'_B = \frac{\sigma_B}{\epsilon_y + \epsilon_{ocr}}$ 来表达其应力应变关系。

在重复荷载作用下的结构性能，往往随荷载特征的影响而变化，荷载特征一般指下列三种：

重复荷载变化幅度，由最大荷载 P_{max} 与最小荷载 P_{min} 来规定。此时在结构中相应产生的最大应力为 σ_{max} ，最小应力为 σ_{min} 。常用二种型式来表达：第一种用应力循环特征

$$\rho = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}; \text{第二种用平均应力 } \sigma_{cp} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \text{ 及应力幅度 } \sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

(如图1所示)。 ρ 值变化幅度自-1至+1。

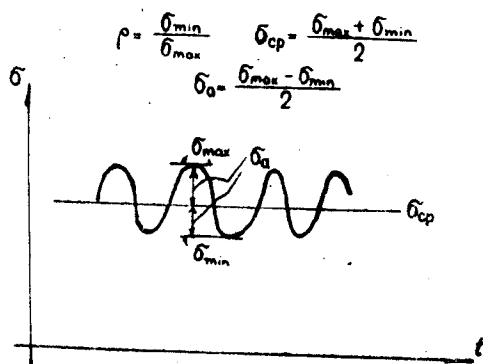


图1 荷载—时间图

重复荷载频率 θ 次/分钟或赫芝(赫芝为次/秒)。

重复荷载作用次数为 N 。某些材料(如钢材)随着 N 的增加，其疲劳强度逐渐降低，但降低到一定程度后即趋于稳定，此时 N 再增大强度就不再下降。某些材料(如混凝土)其强度随 N 增加而降低，但没有稳定值，此时只能取工程结构中重复荷载可能发生的实际次数来求得其相应的性能，称之为在此重复基数下的相对疲劳性能。例如：铁道桥梁以200万次为基数，重级制吊车梁根据我们调查则以400万次为基数⁽¹³⁾。

(二) 钢筋在重复荷载下的性能

1. 国内外研究资料介绍

研究金属在重复荷载下的性能，至今已有近二百年的历史。但大部分试验研究均为解决机械零件、钢结构等问题，钢筋的疲劳以及钢筋埋入混凝土中的工作性能，研究尚未详尽。且各国钢筋的材质外型都不一致，其研究结论很难直接引用。

德国、瑞士等国在1930年左右开始陆续进行过钢筋的试验。试件均采用自由钢筋*，

* 指不埋入混凝土的直钢筋。

荷载为受拉重复荷载,所试钢筋为欧洲国家常用品种: St37, St52, Tor40, Tor60, 钢筋均用原来外型,不另加工,试验基数为100~200万次。兹例举三个较典型的试验结果:

(1) 洛斯(R&S)的结果⁽¹⁾,用古特曼图表示如图2。

(2) 葛立夫(O.Grof)⁽¹⁾的试验结果如表1。

(3) 葛立夫⁽¹⁾曾做过冷强对钢筋疲劳强度的影响如表2。

他由上表得出结论:适当的冷强可增加钢筋的抗疲劳强度绝对值,但冷强不宜过度,否则会导致抗疲劳强度绝对值的降低。

苏联И.П.柯尔钦斯基⁽²⁾总结了5个研究者的资料,绘出了流限为22~26kg/mm²的软钢(相当于钢3)疲劳极限图如图3(图中并列入了斯特列律斯基的资料)。

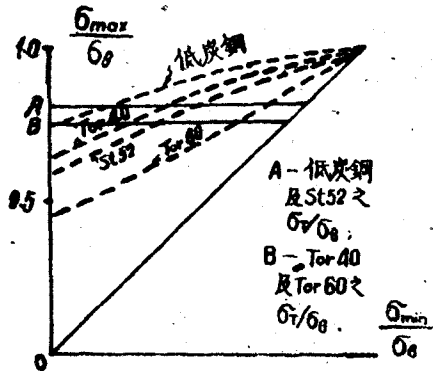


图2 洛斯试验结果之古特曼图

钢筋疲劳试验结果⁽¹⁾

表1

编号	类型	$\sigma_T(kg/cm^2)$	$\sigma_0(kg/cm^2)$	$\rho=0, n=10^6$ $\sigma_{max}(kg/cm^2)$	σ_{max}/σ_0	σ_{max}/σ_T
1	St37	2,740	4,150	2,880	0.695	1.05
2		2,320	3,520	2,180	0.620	0.94
3		3,800	6,330	3,380	0.534	0.89
4	St60	3,800	6,120	3,310	0.540	0.87
5		3,520	5,500	3,380	0.615	0.96
6		3,940	5,560	3,800	0.684	0.97

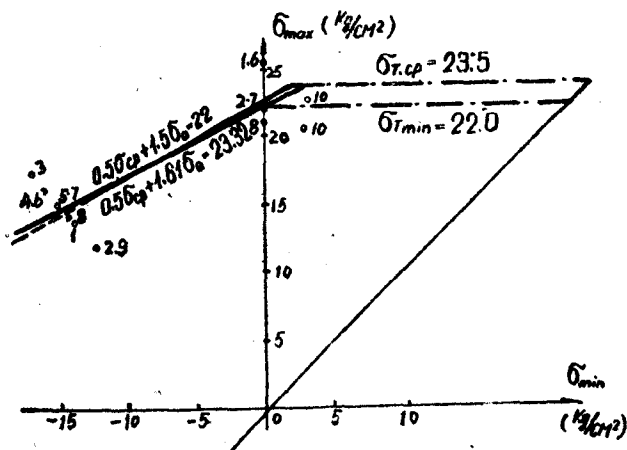
冷强对钢筋疲劳性能影响的试验资料⁽¹⁾

表2

钢材	冷加工情况	$\sigma_T(kg/cm^2)$	$\sigma_0(kg/cm^2)$	$\rho=0$ $\sigma_{max}(kg/cm^2)$	σ_{max}/σ_0	σ_{max}/σ_T
St37 $n=10^6$	未冷加工	2,320	3,600	1,970	0.55	0.85
	冷拉8%,时效8天	4,000	4,370	2,960	0.68	0.74
	冷拉8%,时效3月	4,300	4,860	3,170	0.65	0.74
	冷拉8%,时效1年	4,100	4,650	3,100	0.67	0.76
扭耳钢筋 $n=2 \times 10^6$	未经冷强	2,610	4,160	2,400	0.58	0.92
	扭距 12.9d	4,300	5,210	2,820	0.54	0.65
	扭距 9.4d	4,800	5,780	2,820	0.49	0.58
	扭距 4.6d	5,850	6,550	2,320	0.35	0.40
	扭距 3.3d	6,480	7,100	2,120	0.30	0.32
	扭距 2.6d	6,760	7,050	1,830	0.26	0.27

图3所示均系采用加工后的钢材试件试验结果,故与前述德国资料中所介绍的类似钢材St34~37相比较,结果一般偏高。苏联“标准轨距铁路桥涵设计技术标准(ТУПМ-56)”中采用光面钢3钢筋的疲劳计算强度低于此值,但尚未见其原始试验资料。

马泰洛夫(И.А.Матаров)⁽³⁾以直径为28mm的光面钢5钢筋以及用同样材料加工成



試驗資料來源: 1, 2—Mailander, 3—Lehr, 4—Ögünz;
6, 7, 8—Поганоев, 9—蘇聯機械試驗所, 10—Думичев

图 3 流限为22—26kg/mm²軟鋼疲勞極限古特曼圖

直徑为 22mm 螺絲外型的鋼筋進行試驗，其結果如图 4。

馬泰洛夫具有螺絲外型鋼筋的試驗值，較諸光面鋼筋試驗值降低很大，說明了由于应力集中的原因鋼筋外型对其疲勞强度影响很大。但其試驗未采用原鋼 5 熱軋螺紋型式，很难代表一般鋼 5 螺紋鋼筋的原始疲勞性能。

苏联全苏运输建筑研究院⁽⁵⁾对鋼 5 熱軋螺紋鋼筋的重复荷載試驗，因鋼筋大部分断在試驗机夹具以內，不能得出結論。对 25 錳硅熱軋鋼筋所作試驗，当 $P=0.15$ 时，其趋于稳定的疲勞

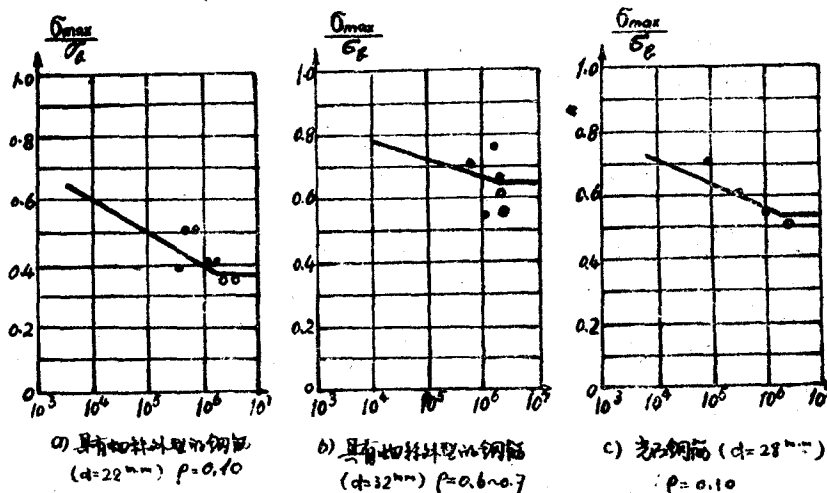


图 4 鋼 5 鋼筋疲勞曲綫

强度極限值約为靜荷極限强度的 0.36~0.4。

苏联柯勃令 (М.М.Кобрин)⁽⁶⁾在研究鋼筋重复荷載試驗的夹具型式时所得鋼 5 及 25 錳硅鋼筋疲勞曲綫，因未列出其与靜荷强度的对比值，不能下結論。但从其所得資料中对比可得以下看法：鋼筋直徑对其疲勞强度影响不大，当 $P=0.25$ ， $N=2 \times 10^6$ 时，对于具有相同外型的鋼 5 鋼筋試件，直徑 $d=14mm$ 者， $\sigma_{max}=2,010 kg/cm^2$ ，直徑 $d=20mm$ ， $\sigma_{max}=1,800 kg/cm^2$ ；直徑 $d=28mm$ ， $\sigma_{max}=2,200 kg/cm^2$ 。对 25 錳硅鋼筋直徑 $d=12mm$ 者， $\sigma_{max}=2,300 kg/cm^2$ ； $d=22mm$ 者， $\sigma_{max}=2,400 kg/cm^2$ 。但这方面意見尚存在若干分歧，某些研究者从“应力梯度”假設出发，认为直徑大小所形成的尺寸影响因素，在迴轉重复荷載試驗时較显著；直接拉压試驗时对光面圓試件影响很小，

直接拉压試驗时对外型不平整的試件，当缺口轉角与試件尺寸的比例在一定范围以內时，影响亦不大。

特米德列也夫 (С.А.Дмитриев) 与穆林 (И.М.Мулин) 对鋼5光面鋼筋及冷压規律变形鋼筋試驗結果⁽⁷⁾說明冷压規律变形鋼筋疲劳强度很差，当 $\rho=0.15$ 、 $N=2 \times 10^6$ 时，冷压鋼筋的疲劳强度只有光面鋼筋的76%。

国内建工部建筑研究院曾进行了冷拉5.5%的鋼5鋼筋重复荷載試驗⁽⁸⁾，但未得系統結論，且采用加工后的試件进行試驗的，其疲劳强度将大于实际螺紋鋼筋。該院并曾进行过二根配置冷軋鋼3鋼筋小梁試驗⁽⁹⁾，其結論认为冷軋鋼筋的抗疲劳性能不好。

近年来預应力鋼筋混凝土結構得到广泛应用，各国均对預应力用的高强鋼絲高、强鋼筋进行了疲劳試驗。德国列昂哈特 (Leonhardt) 的資料⁽¹⁰⁾列于表3。

德国高强鋼絲的疲劳强度⁽¹⁰⁾ $N=2 \times 10^6$ 表3

鋼 絲 类 型	σ_s (kg/mm ²)	ρ	σ_{max} (kg/mm ²)	σ_{min} (kg/mm ²)	σ_{max}/σ_s
St140/160冷拔鋼絲， $\phi 5$	160	0.74	113	84	0.71
St140/160冷拔鋼絲， $\phi 8$	160	0.75	120	90	0.75
St140/150冷拔鋼絲，經热处理 $\phi 5$	150	0.72	112	74	0.74
St145/160經热处理的鋼絲， $\phi 5.2$	160	0.76	119	90	0.74
St145/160橢圓帶肋变形鋼絲， $F_a=20mm^2$	160	0.78	116	90	0.73
St200刻痕冷拉鋼絲 $\phi 4$	200	0.78	128	100	0.64
St250刻痕冷拉鋼絲 $\phi 2$	250	0.70	173	125	0.71
7股鋼絞綫，由St160/180的 $\phi 3$ 鋼絲制成	180	0.78	115	70	0.71

英国倍脫 (S.C.C. Bate) ⁽⁴⁾进行了以高强鋼絲配筋的先張預应力小梁的試驗，其鋼絲疲劳强度的結果如表4所示。

英国高强鋼絲預应力梁的疲劳試驗結果⁽⁴⁾ ($N=1 \times 10^6$) 表4

鋼 絲 类 型	σ_s (kg/mm ²)	ρ	σ_{max} (kg/mm ²)	σ_{min} (kg/mm ²)	σ_{max}/σ_s
$\phi 5$ 光面无銹痕	162~173	0.67~0.69	120~145	81~99	0.67~0.69
$\phi 5$ 光面有輕微銹痕	159	0.72	119	86	0.72
$\phi 5$ 变形鋼絲	172	0.75	113	83	0.75
$\phi 5$ 变形鋼絲	175	0.79	115	88	0.77
$\phi 5$ 变形鋼絲	164	0.71	121	85	0.71
$\phi 5$ 变形鋼絲	164	0.75	116	86	0.75
$\phi 5$ 变形鋼絲	173	0.70	124	86	0.70

倍脫认为变形鋼絲疲劳强度較差，而光面鋼絲无銹痕者在破損时鋼絲滑动錨着不够，光面鋼絲有輕微銹痕者錨着好，在重复荷載下輕微銹痕时疲劳强度亦无显著影响。

苏联米哈依洛夫 (К.В.Михайлов) ⁽¹¹⁾得出高强鋼絲在 $N=200$ 万次时的疲劳折减系数 (見表5)。他的試驗同时表明，光面鋼絲試件在构件中的疲劳强度与单独自由試件相同，变形鋼絲試件在构件中的疲劳强度高于单独自由試件。变形鋼絲疲劳强度

苏联高强鋼絲疲勞試驗值^[11]

表 5

鋼絲类型	不同 ρ 值时的 $k_y = \frac{R_{BH}}{R_H}$, ($N = 2 \times 10^6$)			
	0.75	0.8	0.85	0.9
ГОСТ 7348-55 光面鋼絲	0.65	0.70	0.75	0.80
ГОСТ 8480-57 变形鋼絲	0.55	0.60	0.70	0.75

虽較光面鋼絲低一些，但考虑其握裹力好，建議优先采用。試驗証明在張拉的允許範圍內，提高張拉力能提高鋼絲疲勞强度。

綜合以上資料可得如下一些看法：

(1) 鋼筋在重复荷載下其极限强度降低很多，降低后的絕對值及其与靜荷极限强度的比值 γ_n ，取决于重复次数 N ，应力循环特征 ρ 。

(2) 鋼筋的外型对其疲勞强度有显著影响，如鋼材材质相同时螺紋外型的鋼筋的疲勞强度低于光面鋼筋者。

(3) 适当的冷強且不改变表面外型的应力集中因素者，可以提高鋼筋疲勞强度的絕對值，但过度冷強或与冷強同时增大外型的应力集中因素时，反将降低鋼筋的疲勞强度。

由国内外已有資料来看，类似于光面鋼 3 鋼筋的平試件試驗值比較多，按苏联铁路桥涵設計技术标准 (ТУПМ-56) 中規定值取用是偏于安全的。高强鋼絲我国尚无統一的产品标准，目前用量亦不大，疲勞强度可暫参考苏联米哈依洛夫資料取用。但对我国常用的鋼 5 及 25 热轧錳硅螺紋鋼筋，以及冷拉鋼 5 及 25 錳硅热轧螺紋鋼筋則尚缺乏資料，故我們的試驗即集中于这两类的鋼筋。

2. 冶金工业部建筑研究院对鋼 5 及 25 錳硅热轧螺紋鋼筋試驗的結果

我們所作試驗的試件在两夹具之間采用 5 號及 25 錳硅热轧螺紋鋼筋的原来外型，不另加工，以免鋼筋外型应力集中条件的改变影响其真实的疲勞性能；冷拉鋼筋亦如此。鋼 5 冷拉率为 5.5%，25 錳硅冷拉率为 3.5%。試驗用的鋼 5 及 25 錳硅其化学成分与力学性能均符合相应标准一級品的要求，詳見表 6。

試驗中采用的应力循环特征力求与实际吊車梁結構中相符合，所用 ρ 值如表 7。

試驗重复次数，考虑到一般碳素鋼及合金鋼在重复荷載下均具有一定疲勞极限值，故不采用任何重复基数，而以求得稳定的疲勞极限值为准，因此 N 最大曾达 1,000 万次以上。

試驗速度 θ 在一定範圍以外对鋼材疲勞强度将有影响。 θ 較大时疲勞强度将提高； θ 过大时又会使疲勞强度降低。但根据碳素鋼及合金鋼試驗資料^[12]，当采用迴轉疲勞試驗时，影响較显著，采用拉压疲勞試驗时，影响較小。一般认为速度在 10,000~7,000 次/分钟以內时影响不大。我們为了节约時間，利用瑞士 Amsler 高频脉冲疲勞試驗机， θ 取 10,000 次/分钟左右。限于高频試驗机最大拉力为 10 T，故試驗均用 $\phi 10 \sim \phi 16$ 小直徑鋼筋原型試件。

表 6a

試驗用鋼5及25錳硅熱軋螺紋鋼筋的化學成分及其規定標準(%)

鋼筋類型	C	Si	Mn	S	P
鋼5試件	0.29~0.31 (個別0.26)	0.17~0.24	0.58~0.69	0.007~0.009 (個別0.041)	0.037~0.042 (個別0.021)
冶金部部頒標準(重4-55)規定	0.28~0.37	0.17~0.35	0.50~0.80	≤0.055	≤0.05
25錳硅試件	0.24~0.29	0.63~0.73	1.63~1.72	0.047~0.048	0.019~0.027
ГОСТ7314-55規定	0.20~0.29	0.60~0.90	1.2~1.6	≤0.05	≤0.05

試驗用鋼5熱軋螺紋鋼筋靜力性能(平均值)及其規定標準

表 6b

	σ_T (kg/mm ²)	σ_B (kg/mm ²)	δ_{10} (%)	δ_5 (%)
鋼5試件(Φ16)	34.9 (-3~+3.5%)	54.1 (-2.5~+2.6%)	22.6	26.1
鋼5試件(Φ10)	35.41	58.68	24	26
冶金部部頒標準(重38-55)規定	≥28	≥50	≥14	—

試驗用25錳硅熱軋螺紋鋼筋靜力性能(平均值)及其規定標準

表 6c

	σ_T (kg/mm ²)	σ_B (kg/mm ²)	δ_{10} (%)	δ_5 (%)
試件	45.9 (-4~+4.4%)	68.8 (-2.6~+2.1%)	20.04	25.65
ГОСТ7314-55規定	≥40	≥60	—	≥14

鋼筋母材疲勞試件歸類

表 7

試件類型	直徑 (mm)	ρ	說明
鋼5鋼筋, 未經冷拉者	16	0.1	相等於普通鋼筋混凝土吊車梁工作條件
25錳硅鋼筋, 未經冷拉者	12	0.1	相等於普通鋼筋混凝土吊車梁工作條件
		0.8	相等於預應力鋼筋混凝土吊車梁工作條件
鋼5鋼筋, 冷拉5.5%者	10	0.7	相等於預應力鋼筋混凝土吊車梁工作條件
	10	0.1	校核冷強對疲勞影響
25錳硅鋼筋, 冷拉3.5%者	12	0.1	校核冷強對疲勞影響
	12	0.7; 0.8; 0.9	相等於預應力鋼筋混凝土吊車梁工作條件
	32	0.8	同上, 校核粗直徑影響
鋼5鋼筋, 未經冷拉者	16	0.1	校核頻率(ω)改變影響
25錳硅鋼筋, 未經冷拉者	12		

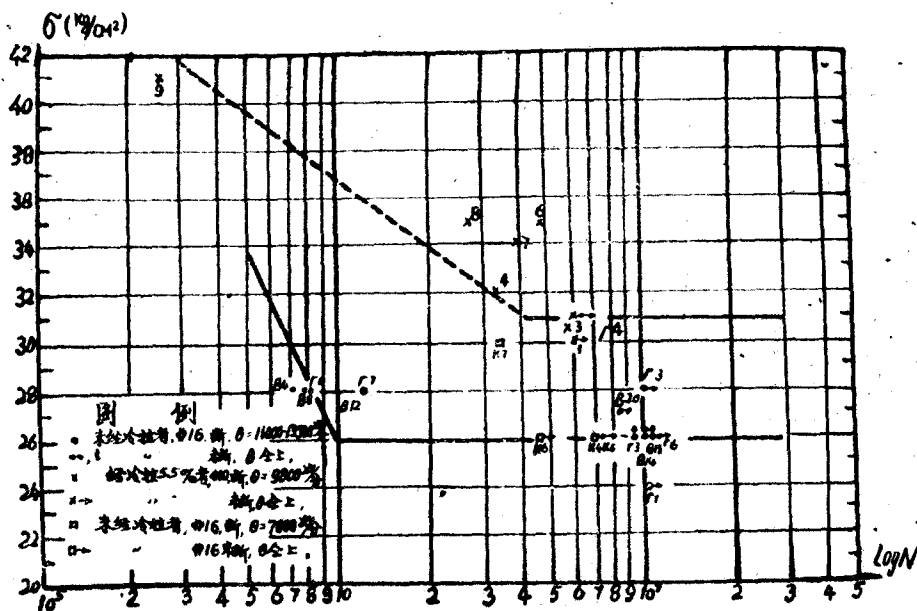
1) 鋼5熱軋螺紋鋼筋試驗結果

當 $\rho=0.1$ 時, $\Phi 16$ 鋼5熱軋螺紋鋼筋疲勞試驗數據詳見表8及圖5。

直徑 $\phi 16$ 未經冷拉的鋼5 熱軋螺紋鋼筋疲勞試驗結果 ($P=0.1$)

表 8

試件編號	疲 勞 試 驗				斷裂情況
	$\sigma_{max}(kg/mm^2)$	$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_b}$	重 复 次 数 ($N \times 10^4$ 次)	頻 率 (万次/分)	
Γ5	32	0.616	55.5	1.25	斷在正中間
Γ4	30	0.568	732.5	1.25	斷在中間偏下
Γ2	28	0.53	81.6	1.15	斷在中間偏下
Γ8	28	0.53	1054	1.3	未斷
Γ7	28	0.53	125.1	1.3	斷在中間
B4	28	0.522	71.5	1.25	斷在中間偏上
B8	28	0.522	81	1.25	斷在中間偏上
B20	27	0.504	833	1.35	未斷
B12	27	0.504	101.6	1.3	斷在中間
Γ3	26	0.492	956.5	1.1	未斷
Γ6	26	0.492	1112	1.1	未斷
B18	26	0.485	1087.7	1.3	未斷
B14	26	0.485	1021.5	1.3	未斷
Γ1	24	0.454	1041.9	1.15	未斷
201	24	0.438	1121.4	1.15	未斷

图 5 鋼5 熱軋螺紋鋼筋的疲勞曲綫图 ($P=0.1$)

經疲勞試驗未斷的某些試件，在重复荷載試驗后，再加工成标准試件以进行靜力試驗。靜力試驗結果試件完全呈塑性破坏，可知該鋼筋确实未到疲勞状态。标准試件的流限与极限强度有所提高，这是由重复荷載对鋼筋冷强的結果。試驗結果見表 9。

經疲勞試驗未坏的試件靜力試驗結果

表 9

試件 編 號	靜 力 力 學 性 能					重 復 荷 載 試 驗 后 試 件 的 加 工	重 復 荷 載 試 驗 后 靜 力 試 驗 結 果*					
	σ_s kg/mm ²	σ_T kg/mm ²	δ_{10} (%)	δ_5 (%)	ϵ_p (%)		σ_s kg/mm ²	σ_T kg/mm ²	δ_{10} (%)	δ_5 (%)	ϵ_p (%)	破坏情况
Γ-8	34.23	52.74	—	—	—	由Φ16加工 成圓柱體試件 Φ13.2	38.4 112.4	58.1 110	25.3	27.16	23.5	塑性破坏
B-18	34.13	53.61	25	28.75	21.25	由Φ16加工 成圓柱體試件 Φ11.8	37.05 108.6	55.72 106	15 60	—	—	塑性破坏
B-20	34.13	53.61	25	28.75	21.25	由Φ16加工 成圓柱體試件 Φ12.4	37 108.6	55.4 103.4	23.75 95	28.7 97.5	18.8 88.5	塑性破坏

* 分母表示与同組試件靜力力學性能的比值 (%)。

所有动載下断裂的試件，其破坏开裂均始于鋼筋螺紋或纵向肋条轉角的根部，說明鋼筋螺紋外形造成了鋼筋的应力集中，致使該处首先产生裂縫；而在荷載不断重复时使裂縫扩展。破坏后截面显示在螺紋根部形成明显的疲劳核心。

由图 5 可得当 $P=0.1$ 时鋼 5 螺紋鋼筋的疲劳强度极限可取 26 kg/mm^2 ，故其折减系数 γ_a 为 0.49。考虑到重复荷載試驗数据的离散性，螺紋鋼筋直徑的可能影响等等，建議采用 $\gamma_a=0.4$ 。

2) 25 錳硅热轧螺紋鋼筋試驗結果。

当 $P=0.1$ 时，25 錳硅热轧螺紋鋼筋的疲劳試驗数据如表 10，其疲劳曲綫如图 6 所示。

直徑Φ12的25錳硅螺紋鋼筋疲劳性能試驗結果 ($P=0.1$)

表 10

試 件 編 號	疲 勞 試 驗				断 裂 情 况
	σ_{max} kg/mm ²	$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_s}$	重复次数 $N \times 10^4$ (次)	頻 率 (万次/分)	
A7	41	0.585	16.7	1.05	断在正中，偏上
A1	35	0.5	33.7	1.05	断在正中，偏上
A11	34	0.485	231.9	1.05	断在正中，偏上
A3	33	0.471	475.8	1.05	断在正中間
Y5	32	0.46	82.4	1.07	断在正中間
Y7	32	0.46	131.3	1	断在正中間
Y9	32	0.46	60	1	断在正中間
A13	32	0.456	1008.1	1.05	未断
A15	32	0.456	501.5	1.05	断在中間
A16	31.5	0.45	277.6	1.05	断在中間
Y1	31	0.446	892.3	1.3	未断
Y3	31	0.446	1000	1	未断
A5	31	0.442	1000	1.05	未断
A3	30	0.428	905.8	1.05	未断
3	27	0.414	1003	1	未断

經动載試驗 1,000 万次未断的 Y3 試件，加工成 $\Phi 8$ 的标准型試件，再以靜力試驗测定其性能的变化，其結果如表 11 所示。

由表 11 也可看出重复动載对鋼筋的冷强作用，因此强度（特别是流限）提高，塑流

减少，故表中包括縮頸在內的拉断时的 δ_{10} 大大降低；由于强度极限也有提高，故相对均匀变形也稍有提高。

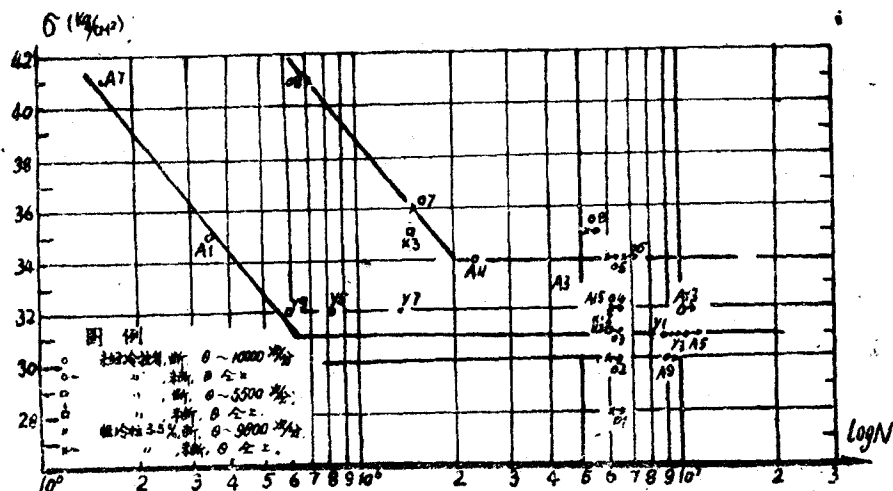


图 6 直径为12mm的25錳硅螺紋鋼筋的疲劳曲线 ($P=0.1$)

Ⅲ試件动載試驗后靜力拉断与一次靜力試驗結果的比較

表 11

項	試 驗 名 稱	σ_r (kg/mm ²)	σ_s (kg/mm ²)	δ_{10} (%)	δ_b (%)	ϵ_p (%)
1	一次靜力試驗	47	69.5	21.5	25	18
2	动載試驗后的靜力試驗	56.47	75.4	15.6	22.5	8.7
3	动載試驗后的靜力試驗为一次靜力試驗的百分比(%)	112	108.5	72.5	90	48.3

由图 6 得出 $\phi 12$ 的 25 錳硅热轧螺紋鋼筋当 $P=0.1$ 时其疲劳极限为 31 kg/mm^2 ；則其疲劳折减系数 γ_a 为 0.44。建議取 $\gamma_a=0.35$ 。

25 錳硅鋼筋也有可能利用到預应力混凝土中，故我們又以 $P=0.8$ 及 0.9 作了若干試驗，数据如表 12 所示。

从表 12 可知，当 $P=0.8$ 时，以 $\sigma_{max}=36.6 \text{ kg/mm}^2=0.53\sigma_s$ 的重复荷载經 400 万次沒有达到疲劳状态，其靜力极限强度与表 6 相比基本上沒有变化，流限因冷强而稍有提高。Ⅶ-1 試件靜力拉断后表面有多处龟裂，但在 520 万次重复荷载作用后仍保持着足够的拉断延伸率 ($\delta_{10}>12\%$)，可以保持构件中的应力重分配。当然， $\sigma_{max}=0.53\sigma_s$ 还不一定是最終的疲劳极限。

当 $P=0.9$ 、在 $\sigma_{max}=41\sim 45.6 \text{ kg/mm}^2=0.6\sim 0.67\sigma_s$ (相当于 $0.9\sim 1\sigma_r$) 的情况下，經過 600 万次以上的重复荷载作用以后再进行靜力拉断，試件純系塑性破坏。当初試驗时由于螺紋对夹具损伤很大，把鋼筋端部打光，但打光以后沒有进行滚压，由于該处断面减少，故断裂都在鋼筋端部。局部变形大，相对延伸率有所降低。但从其强度与塑性性能情况看并未达到疲劳状态。

未經冷拉的25螺紋鋼筋疲勞試驗及疲勞試驗后的靜載試驗

表 12

試件 編號	折算 直徑 mm	ρ	動 荷 試 驗			動荷試驗后的靜荷試驗結果					破 坏 特 征
			σ_{max} kg/mm ²	σ_{min} σ_a	$N \times 10^6$	構件試驗 后 情 况	σ_T kg/mm ²	σ_s kg/mm ²	δ_{10} %	ϵ_p %	
VII-1	11.30	0.8	$\begin{pmatrix} 25.0 \\ 27.5 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.365 \\ 0.402 \end{pmatrix}$	4.000+ 1.200	先以0.55 σ_T 振動400 万次,再以 0.6 σ_T 振動 200万次,未 斷	46.5	67.5	13.3	10	脆性破坏。在 斷裂面二边表 面多处龟裂, 裂縫都在螺紋 的根部及螺紋 与肋条相交之 处。
VII-2	11.10	0.8	27.5	0.402	4.000	未斷	47.00	68.40	20.8	16.7	有明显縮頸, 系塑性破坏, 斷在中間处。
VII-3	11.25	0.8	32.0	0.467	4.000	未斷	46.00	68.00	20	15	稍有縮頸,系 塑性破坏,斷 在近中間处。
VII-1	11.2	0.8	34.5	0.504	5.545	未斷	48.20	69.00	20.8	13.3	有明显縮頸, 系塑性破坏, 斷在近中間 处。
VII-2	11.3	0.8	36.6	0.533	4.000	未斷	44.90	67.80	21.6	15.8	有明显頸縮, 系塑性破坏, 斷在近中間 处。
XIII-1	11.1	0.9	41.0	0.599	6.296	未斷	45.10	68.20	13.3	8.3	斷在端部,系 塑性破坏。
XIII-2	11.1	0.9	41.0	0.599	0.097	未斷	不明显	70.20	12.5	8.3	斷在端部,系 塑性破坏。
XIII-3	11.1	0.9	45.6	0.666	7.925	未斷	不明显	68.10	11.7	6.7	斷在端部,系 塑性破坏。
XIII-4	11.1	0.9	45.6	0.666	6.076	未斷	49.60	70.20	12.5	8.3	斷在端部,系 塑性破坏。

根据以上所述,試驗沒有得出实际的疲劳极限。但偏于安全一些可取用以下值:

当 $\rho = 0.8$ 时, $\gamma_a = 0.5$; $\rho = 0.9$ 时, 已达流限故可不考虑疲劳折减。

3) 經冷拉5.5%强化鋼 5 热轧螺紋鋼筋当 $\rho \geq 0.7$ 时的疲劳性能

苏联在“預应力鋼筋混凝土結構設計規程 (CH10-57)” 中不建議采用冷拉强化的鋼筋用于受多次重复荷重的結構中; 当有适当技术根据时, 可降低强度取用, 此时冷拉率对鋼 5 不得大于5.5%, 对25錳硅不大于3.5%。

本試驗即为檢驗其疲劳性能。

試件直徑取 $\Phi 10$ 。其未經冷拉的原材料之机械性能平均值如下: $\sigma_T = 35.4 \text{ kg/mm}^2$; $\sigma_s = 58.7 \text{ kg/mm}^2$, $\delta_{10} = 24\%$, $\delta_5 = 26\%$, $\epsilon_p = 22\%$, 合乎部頒标准。

試件冷拉5.5%, 冷拉率用引伸仪控制, 冷拉后进行人工时效。把同一根經冷拉并人工时效处理的鋼筋切成二段, 一段做靜力試驗, 另一段做疲劳試驗。疲劳試驗用的鋼筋端部沒有打光和冷压。試驗数据如表13。

当 $\sigma_{max} > 48.75 \text{ kg/mm}^2$ 时, 夹头打滑, 未得到数据, 故 $\sigma_{max} = 48.75 \text{ kg/mm}^2$ 尚不能代表疲劳极限值。疲劳試驗后的靜力試驗与一次靜力試驗相比較, 由于經过冷拉, σ_T 与 σ_s 間本来就相差很少, 因此疲劳試驗后流限就更加不明显; 极限强度由于冷强而提高 5~6.5%, 此提高值比經冷拉的 (見表9, 表11) 为少。破坏純系塑性, 故知鋼筋尚未达

到疲劳。如暫以 48.75kg/mm^2 为疲劳极限，則得 $\rho=0.7$ 时其 $\gamma_a=0.83$ 。

冷拉5.5%的鋼5 螺紋鋼筋当 $\rho=0.7$ 时的疲劳試驗

表 13

試 件 編 号	断面面积 mm^2	一 次 靜 力 試 驗						疲 勞 試 驗						疲劳試驗后的 靜力試驗		断裂情况
		σ_T kg/mm^2	σ_B kg/mm^2	δ_{10} (%)	δ_5 (%)	ϵ_p (%)	ρ	σ_{max} kg/mm^2	$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_B}$	$N \times 10^6$	頻率 (万次/分)	結果	加工 后的 直徑	σ_T	σ_B	
АГ2	72	57.6	60.6	16	20	12	0.7	48.75	0.805	10.02	1	未断	7.2	不明显	64.5	断在端部，延伸率不正确，故未列入，系塑性破坏
AB2	72	54.6	60.8	17	21	13	0.7	48.75	0.803	11.11	1	未断	7.3	不明显	64	断在端部，延伸率不正确，故未列入，系塑性破坏
AA2	72	—	—	—	—	—	0.7	48.75	0.83	10.92	1	未断	—	—	—	—
CB4	200	54.27	58.6	14.4	18.5	10.3	0.7	40	0.683	10.58	1.15	未断	—	—	—	—

4) 經冷拉3.5%强化的25錳硅热轧螺紋鋼筋当 $\rho \geq 0.7$ 时的疲劳性能

試件直徑为 12mm ，其靜力力学性能平均值如表14。疲劳試驗結果見表15。

直徑12mm、徑冷拉3.5%的25錳硅螺紋鋼筋靜力力学性能

表 14

σ_T (kg/mm^2)	σ_B (kg/mm^2)	δ_{10} (%)	δ_5 (%)
64.4	71.1	17.2	24.4
(-3~+4.1%)	(-1.6~+3.4%)		

表15中所有断裂的試件都断在夹头边，这不能反映鋼筋的实际抗疲劳性能，因为鋼筋在正常的工作条件下一般沒有象夹头边緣那样的应力集中現象。

当 $\rho=0.7$ 时， $\Theta\Gamma 1$ ， $\Theta\Gamma 2$ ， $\Theta B 2$ 和 $\Theta H 1$ 四根試件的 σ_{max} 相同，后三根在重复 $977.2 \sim 1019$ 万次均未断；而 $\Theta\Gamma 1$ 試件在重复仅 115.8 万次时就断在夹头边，而不是断在試件中部，显然不是鋼材的实际疲劳强度。同样情况也发生在第Ⅱ組試件及Ⅱ-3試件中。

疲劳試驗中未破坏的試件再做靜力試驗，其結果如表16。

由表15和表16可以看到， Θ 組、Ⅱ組、Ⅲ組的試件其强度都因重复荷載的冷强作用而有所提高，而相对延伸率有所下降，但还系塑性破坏，仍保持足够的 δ_{10} 。Ⅱ組試件完全沒有流限，靜力强度极限因夹头处鋼筋断面减少（有疲劳裂縫）而降低， $\delta_{10}=\epsilon_p$ （完全沒有縮頸），断头处有疲劳裂縫形成的光滑面，所有这些都是夹头边的鋼材已到达疲劳极限的标志，但如上述，夹头边鋼材疲劳并不能說明試件中間部分的疲劳。試件Ⅱ-1至Ⅱ-3破坏純系塑性，完全沒有达到疲劳状态，其强度之所以降低，是因为端部夹持处螺紋打光而致断面减少，但未予滚压强化，故当以原来鋼筋断面計算时其 σ_T 、 σ_B 值就低了。降低不是由于疲劳裂縫削弱断面、而是由于打光螺紋而减少断面面积，因此未达到疲劳极限。

直徑 $\phi 12$ 的經冷拉3.5%的25錳硅螺紋鋼筋疲勞試驗

表 15

試件編號	疲 勞 試 驗					斷 面 積 F (mm ²)	斷 裂 情 况
	ρ	$\sigma_{n,ax}$ (kg/mm ²)	$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_0}$	重 复 次 数 $N \times 10^4$ (次)	頻 率 (万次/分)		
ЭБ1	0.7	62.00	0.866	131.9	1.1	98	斷在夾頭邊
ЭГ1	0.7	62.00	0.866	68	1.5	98	斷在夾頭邊
ЭЕ2	0.7	62.00	0.866	80	1.1	98	斷在夾頭邊
ЭН2	0.7	62.00	0.866	115	1.1	98	斷在夾頭邊
ЭГ1	0.7	60.00	0.838	115.8	1.15	98	斷在夾頭邊
ЭГ2	0.7	60.00	0.838	977.2	1.2	98	未斷
ЭБ2	0.7	60.00	0.838	1007	1.1	98	未斷
ЭН1	0.7	60.00	0.838	1019	1.1	98	未斷
ХБ2	0.7	58.00	0.828	1296.5	1.1	100	未斷
ЭГ2	0.7	55.00	0.768	1018.7	1.1	98	未斷
ЭБ1	0.7	50.00	0.768	928.8	1.1	98	未斷
IX-1	0.8	46.15	0.644	400	1.1	93.1	未斷
IX-2	0.8	53.10	0.741	491.4	1.1	94.5	未斷
X-1	0.8	55.40	0.774	483.8	1.1	93.1	斷在夾頭邊
X-2	0.8	55.40	0.774	541.4	1.1	96.4	未斷
X-3	0.8	55.40	0.774	400	1.1	95.4	未斷
XI-1	0.8	65.15	0.91	727.3	1.1	94	未斷
XI-2	0.8	65.70	0.91	600.8	1.1	97.1	未斷
XI-3	0.8	65.60	0.916	563.5	1.1	95.8	在夾頭處斷
IX-3	0.8	65.10	0.908	373.1	1.1	93.1	在夾頭處斷
XII-1	0.9	58.10	0.811	648.8	1.1	97.1	未斷
XII-2	0.9	58.10	0.811	675.6	1.1	96	未斷
XII-3	0.9	58.10	0.911	583.2	1.1	95.5	未斷

直徑 $\phi 12$ 的冷拉25錳硅熱軋螺紋鋼筋疲勞試驗後的靜力試驗

表 16

試件編號	ρ	σ_r kg/mm ²	σ_0 kg/mm ²	δ_{10} (%)	δ_5 (%)	ϵ_p (%)	斷 裂 情 况
ЭГ2	0.7	不明顯	76	14.4	19	9.8	塑性破壞
ЭБ2	0.7	73.20	79	13.5	20	7	塑性破壞
IX-1	0.8	66	73	13.3	未量	6.7	塑性破壞, 靠近夾頭處斷, 有明顯縮頸
IX-2	0.8	67.6	73.8	14.2	未量	8.3	塑性破壞, 靠近夾頭處斷, 有明顯縮頸
X-2	0.8	65.1	72.1	15.8	未量	11.7	塑性破壞, 斷在中間, 有明顯縮頸
X-3	0.8	65.6	72.8	16.7	未量	11.7	塑性破壞, 斷在近中間處, 稍有縮頸
XI-1	0.8	无	62.5	4.58	未量	4.58	脆性破壞, 斷在夾頭邊緣, 有一个光滑面
XI-2	0.8	无	65.9	2.09	未量	2.09	脆性破壞, 斷在夾頭邊緣, 有二个光滑面, 其中之一产生于鋼筋之銹迹處, 銹迹已浸入鋼筋內部
XII-1*	0.9	61.8	67	—**	—	—	塑性破壞, 斷在夾頭打光處
XII-2*	0.9	60.4	67.7	—**	—	—	塑性破壞, 斷在夾頭打光處
XII-3*	0.9	不明顯	68	—**	—	—	塑性破壞, 斷在夾頭打光處

* 为使螺紋不損傷夾具, 試件IX-1至XII-3的端部打光, 但未予預壓;

** 由于試件斷在夾頭打光處, 無法量得;

注: 疲勞試驗後作靜力試驗時, 除ЭГ2及ЭБ2二个試件分別加工成直徑為9毫米的標準型試件外, 其他試件都是原件。

表16中 $P=0.9$ 时 σ_{max} 所取值比 $P=0.7$ 及 0.8 时低, 事实上应该比较高; 但由以上分析, 当 $P=0.8$ 时其 σ_{max} 已到达流限, 大于流限值无实际意义, 因此可取流限为疲劳极限, 所以对冷拉25錳硅鋼筋当 $P \geq 0.8$ 时可不驗疲劳。

試驗所采用的試件直徑小, 为校核大直徑的尺寸影响, 在油压傳动的西德罗生豪森 (Losenhausen) 100 吨交替应力試驗机上, 进行三根 $\phi 32$ 冷拉 3.5% 并經人工时效处理的粗直徑25錳硅鋼筋的疲劳补充試驗。該疲劳試驗机頻率有333、500、666及1000次/分四种, 試驗取用500及666次/分, 試件用原件, P 取0.8。

由于夹头处应力集中, 所有試件都在夹头边缘处断, 粗-1試件由于位置不在正中, 有偏心, 因之断裂时重复次数特别短; 粗-2及粗-3試件安放得很仔細, 故大有好轉。为节约时间, 試件第一次在夹头处断了以后, 重新夹正后繼續进行試驗, 目的是要使其断在中間。粗-1 試件在夹头处断了二次以后, 由于剩下的部分过短, 故沒有再继续做下去。后二試件重复次数分別达到346万及551万次, 沒在試件中間断裂, 其中連續加荷的次数分別也有266万及346万次。試件在夹头边断了一次或二次, 剩下部分的长度不足10倍試件直徑长, 因之动荷后静力拉断时不能測出相对延伸率。試驗数据如表17所示。

直徑 $\phi 32$ 經冷拉3.5%的25錳硅螺紋鋼筋的动載試驗

表 17

試件 編 号	折算 直徑 (mm)	一次靜力試驗平均值			动 載 試 驗										
		σ_r (kg/ mm ²)	σ_s (kg/ mm ²)	δ_{10} %	P	σ_{max} (kg/ mm ²)	$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_s}$	重复次数N×10 ⁶			动載試驗后靜力試驗				
								第一次	第二次	共計	σ_r	动載 靜載 %	σ_s	动載 靜載 %	δ_{10}
粗-1	30.95	58.6	67.1	13.4		40.8	0.742	0.48 断 在 夹头边	0.5 断 在 夹头	0.98	58.5	100	66.4	99.2	試 件 过 短 未 量
粗-2	30.95	58.4	66.8	13.4	0.8	46.7	0.698	2.66 断 在 夹头边	0.8 断 在 夹头边	3.46	58.7	100.5	65.4	98	
粗-3	30.60	58.4	66.8	13.4		46.7	0.698	2.05 断 在 夹头边	3.46 断 在 夹头边	5.51	59.7	102	67.9	101.8	

断裂情况: 粗-1 动載試驗下二次均断在夹头边缘; 动載試驗后的静力拉断系塑性破坏, 有极明显縮頸。

粗-2 动載試驗下二次都断在夹头边缘; 动載后静力試驗系塑性破坏, 有极明显縮頸, 断在夹头边缘打光处。

粗-3 动載試驗第一次断在夹头边缘, 第二次未断; 动載后静力試驗系塑性破坏, 有极明显縮頸。

从动載試驗后的静力試驗来看, 試件本身并未达到疲劳极限, 疲劳极限还有可能提高。如照所得 $\sigma_{max}(46.7 \text{ kg/mm}^2)$ 取, 則由粗-2及粗-3試件可得 $P=0.8$ 时其疲劳折減系数 $\gamma_a > 0.7$

当 $P=0.7$ 时, 由小直徑取其 $\sigma_{max}=60 \text{ kg/mm}^2$, 得 $\gamma_a=0.84$ 。

考虑到粗直徑鋼筋的試驗資料尚待进一步补充, 故建議: 当 $0.8 > P \geq 0.7$ 时, 取 $\gamma_a=0.7$; 当 $0.9 > P \geq 0.8$ 时, $\gamma_a=0.8$; 当 $P \geq 0.9$ 时不驗算疲劳。

5. 冷拉对鋼 5 及 25 錳硅热轧螺紋鋼筋疲劳性能的影响