

システムトラス接合部の疲労特性

(I. 接合用ボルトの製造方法の影響)

辻 岡 静 雄*

Fatigue Strength of Member-Node Joints for System Truss

(Part I. Effect of Types of Joining Bolt)

Shizuo TSUJIOKA

To improve the fatigue properties of space trusses to cyclic loads, this paper describes the fatigue tests conducted on actual member-node joints in which joining M30 bolts are produced by thread rolling and presents S-N diagrams for practical applications. It is found that the fatigue strength of bolt produced by thread rolling after heat treatment is higher than that of high-strength bolt.

1. はじめに

建築構造物の大型化・複合化に伴い、高性能材料、高機能部材や高品質・高性能接合部(例えば、超高力ボルト摩擦接合)が開発されるなど新たな動きが認められる。しかし、スケール効果により従来無視されてきた疲労破壊や脆性破壊などが生じる可能性が高く、種々の大スパン建築や超高層建築では、地震力や風圧力を受ける構造物の繰返し応答や疲労などの特性に関する性能把握が要求されている。

ところで、大スパン建築に用いられることが多いシステムトラス¹⁾は設計の自由度が高くかつ高精度の構造であるが、1本ボルトによる接合機構を有するため、そのボルトの破断は構造全体の安全性に大きな影響を及ぼす。一般には、この特殊ボルトの製造方法と静的引張耐力が問題となるが、風圧力や機械振動などの動的な外力を受ける部分に用いられる場合、ボルトは形状上ねじ部に切り欠きを持ち疲労に敏感であるため疲労強度が低く、ボルトを1サイズを大きくするなどの疲労設計方法が便宜的に採用されている。しかし、接合用ボルトに大きな軸力が導入できれば、引張接合としての力学特性を利用した疲労設計が可能となり、軽やかな構造を組み上げることが出来ると考えられる。

本研究では、システムトラスの接合部の疲労設計のための基礎資料を充実することを目的として、すでに、M20～M48特殊ボルトを用いた球継手が片振り引張繰返しを受ける場合の疲労実験を報告した²⁻⁵⁾。ボルトの公称径および応力比によって疲労特性に大きな差異はないが、高力ボルトより200万回疲労強度は小さいことが得られ、95%信頼幅を表す疲労設計式を導いている⁵⁾。これらの特殊ボルトの製造に関して、太径の特殊ボルトはねじ切削後熱処理で製作されている。従来より、ねじ切削のボルトでは疲労限度は平均応力に無関係であること、熱処理後ねじ転造のボルトは疲労強度が上昇し、疲労限度が大きく向上することなど⁶⁻⁹⁾が知られているので、太径のものもねじ転造で製作することによりシステムトラス接合部の疲労強度の改善を計画した。

よって、本報は、M30特殊ボルトを用いた球継手の疲労実験を報告すると共に、ボルトの製造方法による疲労特性の変動を検討・考察し、疲労強度の改善に関する設計資料を提示するものである。

*建設工学科 建築学専攻

2. 試験体と実験方法

システムトラスには種々の接合形式があるが、本研究では図1に示す形式を対象とした。この立体トラス接合部³⁾ではボルトに大きなトルクの導入、すなわち、高い軸力の導入が可能な機構を有する。疲労設計時にはこの特殊ボルトに長期許容引張耐力に相当する張力が導入される。現システムでは使用ボルトはM56までで、太径ボルトに対しては導入トルクおよび有効断面積の点から細目ねじを用い、熱処理の点についても配慮している。なお、接合部の使用材料の機械的性質の規格値を表1に示す。

試験体はノード、特殊ボルト、アンカーナット、スリーブナット、スリーブと厚板(スタブコーンのモデル化)からなるトラス節点の単純モデルで、実験変数は、特殊ボルトの製造方法、応力比 R (=ボルト軸力の下限值と上限値との比)で、ボルト初期導入軸力は零とした。ここに、両端部にM30x3の細目ねじを、中間部にトルク伝達用の六角部を持つ特殊ボルトは、SCM435材を転造後熱処理(以後M30Aと略す)あるいは熱処理後転造(以後M30Qと略す)の製造方法で製作された高強度ボルトである。なお、従来の切削後熱処理(以後M30Bと略す)によるボルトの実験結果^{3,4)}も比較の対象とした。使用ボルトの形状寸法とその熱処理条件を図2に示す。また、特殊ボルトの完成品引張試験結果を表2に掲げる。ここに、数値はいずれも平均値で、降伏荷重はボルトの荷重-伸び関係に於て接線剛性が初期剛性の1/3になる荷重レベルとして、応力度はボルトの有効断面積を用いて求めた。

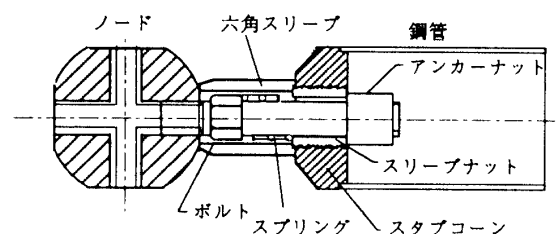
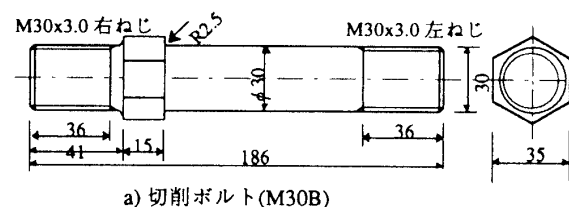
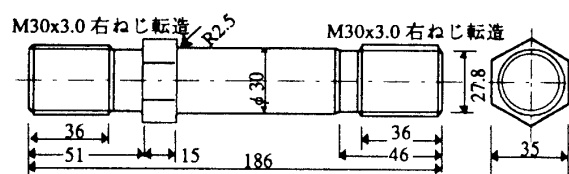


図1 立体トラス節点



a) 切削ボルト(M30B)



b) 転造ボルト(M30A, M30Q)

熱処理条件

- ・焼き入れ：870℃、2時間保持、油冷
- ・焼き戻し：620℃、4時間保持、急冷

図2 特殊ボルト

表1 材料の機械的性質(規格値)

鋼材種別		引張り強さ kg/mm ²	降伏点 kg/mm ²	伸び %	硬さ HRC
ボルトM12-M36	SCM435	≥100	≥90	≥15	29-33
M42-M56		≥95	≥85	≥15	29-33
アンカーナット	SCM435	≥90	≥80	≥15	29-36
ノード	SCM435	≥90	≥80	≥15	27-36
スリーブナット	SCM435	≥70	≥50	≥17	25-30
六角スリーブ	S45C	≥70	≥50	≥17	25-30
スタブコーン	SS400, S17C, S20C	≥41	≥24(22)	≥23	-

表2 完成品引張試験結果

Specimen	Yield load (t)	Failure load (t)	σ_y (t/cm ²)	σ_B (t/cm ²)
M30B	53.40	60.30	9.21	10.40
M30A	53.50	60.85	9.22	10.49
M30Q	55.15	63.65	9.51	10.97

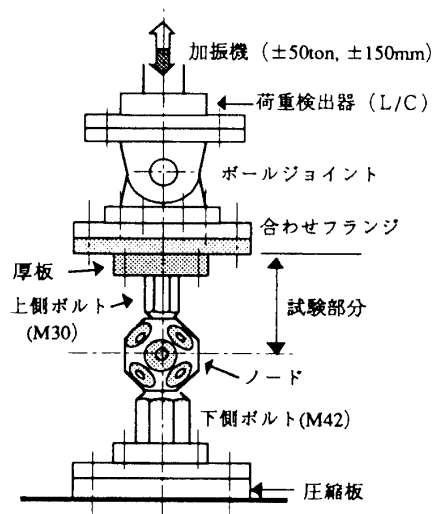


図3 実験装置概要

今回の実験で対象としたのは引張繰返し荷重であり、50 t 油圧サーボ式構造物疲労試験装置を用いて周波数2~6Hzの正弦波の定常波試験を行った(図3)。疲労試験では、応力比0 (0-to-tension)の片振り加力(下限荷重を0.5 t)を標準とするが、締付け力導入の場合のボルト軸力変動幅を再現するため、応力比7/10、8/10も設定した。

3. 実験結果と考察

破壊回数N、応力度と破断位置を表3に、疲労試験結果(両対数S-N線図)を図4、5に示す。また、破壊した実験点に対して最小二乗法を用いて求めた各回帰直線を表4に掲げる。ここに、応力範囲はボルトの最大応力度と最小応力度の差(=応力振幅の2倍)で、各応力度は特殊ボルトの有効断面積を用いて求めた値である。なお、図表中にはM30特殊ボルト(M30B)についての既往の実験結果^{3,4)} および各回帰直線も合わせて示してある。

図4の最大応力度で表した疲労強度は応力比が高い程高くなる。また、応力比0 (0-to-tension)の実験値について、疲労強度は各特殊ボルトによって異なり、切削後熱処理、転造後熱処理、熱処理後転造の順に高くなる。一方、図5の応力範囲で表した疲労強度は、製造方法や応力比に大きく影響され、1本のS-N線図で近似することは難しいと考えられる。即ち、応力比0に関して、切削後熱処理(M30B)では実験点は応力比にかかわらずほぼ1本の直線として表されるが、転造後熱処理(M30A)では切削に比べ疲労強度が若干上昇し、しかも、200万回の繰返しに耐える最大の応力範囲として定義した疲労限度が大きくなり、繰返し数が約10万回程度を境にして実験データの傾きが異なる傾向が見受けられる。また、熱処理後転造(M30Q)では、その特性は転造後熱処理と同様な傾向を示すが、疲労強度の大幅な改善が可能で、転造後熱処理の2倍程度となる。これは、転造ボルトの補正係数が1.7~

表3 実験結果

試験体 No. 記号	ボルト	破壊回数 (cycle)	最大応力度 (t/cm ²)	応力範囲 (t/cm ²)	破壊部位	応力比
1 A300523	M30A	16606	3.966	3.879	anchor	0.022
2 A300518		26276	3.103	3.017	anchor	0.028
3 A300512		220704	2.069	1.983	node	0.042
4 A300515		52821	2.586	2.500	anchor	0.033
5 A300511		176805	1.897	1.810	anchor	0.045
6 A300509		1422046	1.552	1.466	node	0.056
7 A300513		73948	2.241	2.155	anchor	0.038
8 A300510		157423	1.724	1.638	node	0.050
9 A300595		419001	1.638	1.552	anchor	0.053
10 A300530		7883	5.172	5.086	anchor	0.017
11 A300585		859672	1.466	1.379	node	0.059
12 A300512		150151	2.069	1.983	anchor	0.042
13 A300580		1807618	1.379	1.293	node	0.063
14 A302333		97687	5.690	1.724	anchor	0.697
15 A301826		279638	4.483	1.379	anchor	0.692
16 A301623	M30Q	325267	3.966	1.207	node	0.696
17 A301420		975560	3.448	1.034	anchor	0.700
18 A301218		2000000	3.103	0.931	-	0.700
19 A302329		818665	5.000	1.000	anchor	0.800
20 A302127		2000000	4.655	0.931	-	0.800
21 A302835		415753	6.034	1.207	anchor	0.800
22 Q300530		37362	5.172	5.086	anchor	0.017
23 Q300534		25415	5.948	5.862	anchor	0.014
24 Q300525		83875	4.310	4.224	anchor	0.020
25 Q300527		46920	4.741	4.655	anchor	0.018
26 Q300523		110530	3.966	3.879	anchor	0.022
27 Q300521		371463	3.621	3.534	anchor	0.024
28 Q300519		1248682	3.276	3.190	anchor	0.026
29 Q302434		586769	5.948	1.784	anchor	0.700
30 Q302232	M30B	1301679	5.517	1.655	anchor	0.700
31 Q302130		1177372	5.172	1.552	anchor	0.700
32 Q302638		524110	6.552	1.966	anchor*	0.700
33 Q302734		2000000	5.948	1.190	-	0.800
34 Q303038		1129827	6.552	1.310	anchor	0.800
35 Q301928		1699712	4.828	1.448	anchor*	0.700
36 B301924		800776	4.138	0.828	anchor	0.800
37 B301722		840137	3.793	0.759	anchor	0.800
38 B301620		1342050	3.448	0.690	anchor	0.800
39 M300518		21180	3.103	3.017	anchor	0.028
40 M300512		65049	2.069	1.983	node	0.042
41 M300506		278962	1.034	0.948	anchor	0.083
42 M300505		2000000	0.862	0.776	-	0.100
43 M300555		821626	0.948	0.862	node	0.091
44 M301420		678102	3.448	1.034	node	0.700
45 M302333	M30B (文献3)	86572	5.690	1.724	anchor	0.697
46 M301826		175680	4.483	1.345	anchor	0.700
47 M301623		268753	3.966	1.190	anchor	0.700
48 No.20		321540	1.207	1.121	anchor	0.071
49 No.21		705520	0.948	0.862	anchor	0.091
50 No.22		173820	1.552	1.466	anchor	0.056
51 No.23		54900	2.069	1.983	anchor	0.042
52 No.31		78700	1.724	1.638	anchor	0.050
53 No.32		10680	2.414	2.328	anchor	0.036
54 No.48		7470	3.448	3.362	anchor	0.025
55 No.33		2000000	0.776	0.690	-	0.111
56 No.47		2000000	0.862	0.776	-	0.100
57 No.34		636370	3.448	1.034	anchor	0.700
58 No.35		146710	4.310	1.293	anchor	0.700
59 No.36		153680	3.793	1.138	anchor	0.700
60 No.37	M30B (文献3)	87690	5.172	1.552	anchor	0.700
61 No.38		259140	3.621	1.086	anchor	0.700
62 No.39		314270	3.276	0.983	anchor	0.700
63 No.40		307630	3.103	0.931	anchor	0.700
64 No.45		496580	3.103	0.931	anchor	0.700
65 No.46		451010	2.931	0.879	anchor	0.700

Note: ・ anchorはアンカー部の第一ねじ部破壊、nodeはノード端面位置でのねじ部破壊

* 印は軸部とねじ部の連成破断

2.0であること⁶⁾と合致すると言える。さらに、応力比が7/10の実験点は応力比0の実験点と異なる傾向を示す。即ち、応力範囲で表す場合、応力比7/10の疲労強度は下限を示し、疲労限度も低下する傾向が認められる。

これらの差異は鋼種、熱処理、表面処理、ねじ形状、ねじ製作条件(転造ねじ、切削ねじ)、加力位置(アンカーナット位置やノード側のはめあい長さ)などに起因すると考えられる。しかし、特殊ボルトの製造方法によって不完全ねじ部の形状は異なるものの完全ねじ部のねじ形状が同じで、引張強さに大きな差異はないことから、転造に伴う表面圧縮残留応力・加工硬化・表面の平滑さによる疲労強度の上昇、平均応力の存在による疲労限度の変動、ねじ底での局所的な塑性化による切欠き効果の低減、切削

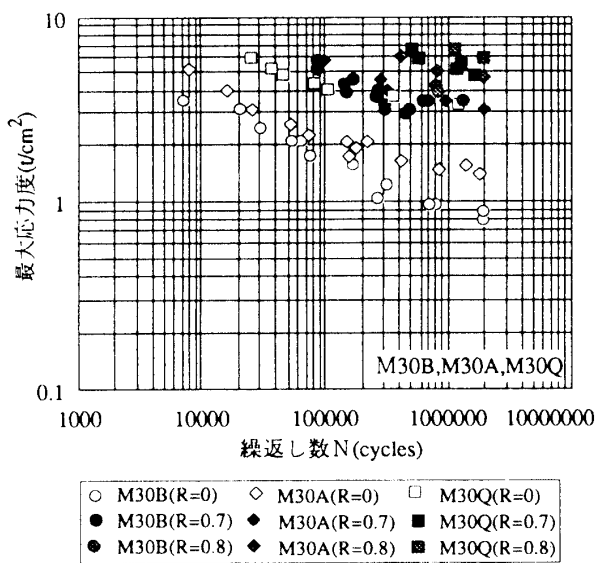


図4 S-N線図 (最大応力度、M30B,M30A,M30Q)

表4 回帰直線式

Bolt	Loading type	$\sigma_{max} - \sigma_{min}$
M30A	0-to-tension	$\log S = -0.38137 \log N + 2.1890$
	7/10-to-tension	$\log S = -0.13827 \log N + 0.98595$
M30B	0-to-tension	$\log S = -0.32079 \log N + 1.8107$
	7/10-to-tension	$\log S = -0.25493 \log N + 1.4353$
M30Q	0-to-tension	$\log S = -0.37520 \log N + 2.4211$
	7/10-to-tension	$\log S = -0.095604 \log N + 1.0837$
		$\log S = -0.21539 \log N + 1.5113$

Note: $S = (\sigma_{max} - \sigma_{min})$ = Stress range, N = Cycles to failure

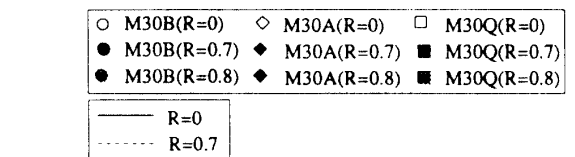
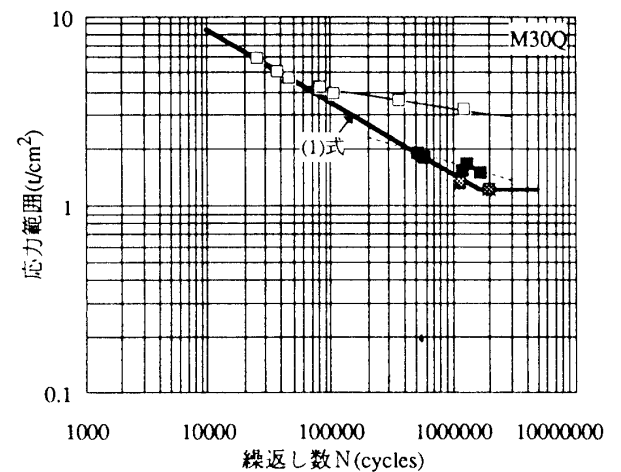
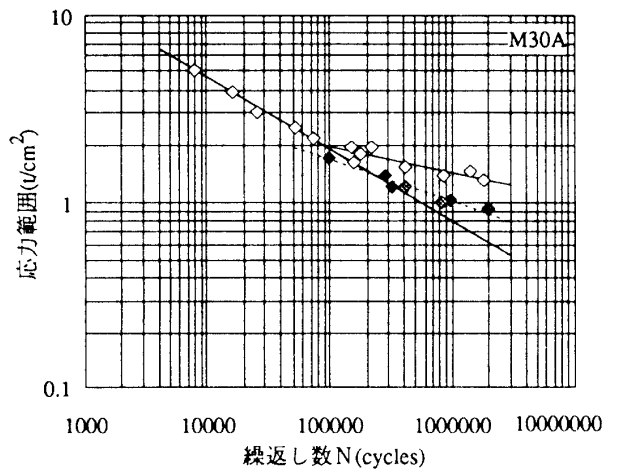
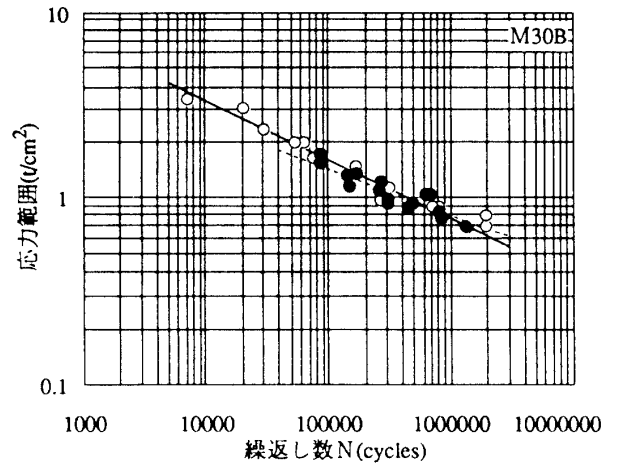


図5 S-N線図 (応力範囲、M30B,M30A,M30Q)

による表面きずによる疲労強度の低下の諸効果の影響と考えられる。

次に、製造方法による残留応力や平均応力の影響を検討するために、図6に引張強さ σ_B で規準化した疲労限度線図を示す。図中には、各応力比の疲労限度の実験値を□、◇、○印で示すが、平滑材に対しては疲労と降伏の安全領域として疲労限度を規定し、実線は吉本によって提案されたねじ(ボルト・ナット結合体)の疲労限度に関する仮説⁸⁾に従う推定式である。二点鎖線は山本によって提案された計算式⁶⁾によって切欠き係数 β_k を算定し、疲労限度が平均応力に依存しないとしたものである。また、一点鎖線は修正Goodman線図である。計算に当たっては、SCM435材の材料特性や疲労限度の実験データ¹⁰⁾の平均値より、真破断力 σ_T は179Kg/mm²、鋼材の降伏点 σ_s 、引張強さ σ_B を各々90,100Kg/mm²、両振りの疲労限度 σ_w を53Kg/mm²とした。図より、修正Goodman線図はM30A,M30Bでは疲労限度の実験値を評価可能であるが、M30Qでは過大評価すること、切削ボルト(M30B)に対する実験値はほぼ一定で計算値は実験値を過大評価すること、転造ボルト(M30A,M30Q)では、吉本の仮説は実験値の傾向を良く表し、転造の影響で疲労限度は平均応力に依存するが、その程度は加工順序によること、熱処理後転造したものではねじ谷底近傍に約35.7Kg/mm²の圧縮残留応力が存在すると推定されることなどが得られる。これらより、熱処理後ねじ転造が最も疲労強度の改善に有効である。

さらに、高力ボルトとの比較を行う。表5、図7に一例として、M20x115(F10T、 $\sigma_B=111.6\text{Kg/mm}^2$)の片振り引張線返し荷重(周波数3~5Hz)に対する疲労試験結果を□、■印で示す。図中には前述の転造ボルトの各回帰直線、LSD規準¹¹⁾の設計式も合わせて掲げる。高力ボルトの疲労強度は設計式では表しうると言える。

表5 実験結果（高力ボルト、F10T,M20x115）

試験体 No	記号	破壊回数 (cycle)	最大応力度 (N/cm^2)	応力範囲 (N/cm^2)	破壊部位	応力比
1	F200555	2000000	2.247	2.042	-	0.091
2	F2005125	21837	5.106	4.902	ナット第1ねじ部	0.040
3	F2005105	34584	4.289	4.085	ナット第1ねじ部	0.048
4	F200595	59837	3.881	3.676	ナット第1ねじ部	0.053
5	F200575	86985	3.064	2.859	ナット第1ねじ部	0.067
6	F200585	76402	3.472	3.268	ナット第1ねじ部	0.059
7	F200565	260042	2.655	2.451	ナット第1ねじ部	0.077
8	F200575'	133722	3.064	2.859	ナット第1ねじ部	0.067
9	F200562	271446	2.533	2.328	ナット第1ねじ部	0.081
10	F200558	199861	2.369	2.165	ナット第1ねじ部	0.086
11	F200555'	524283	2.247	2.042	ナット第1ねじ部	0.091
12	F200550	314914	2.042	1.838	ナット第1ねじ部	0.100
13	F205145	11959	5.923	5.719	ナット第1ねじ部	0.034
14	F205165	8641	6.740	6.536	ナット第1ねじ部	0.030
15	F205185	4987	7.557	7.353	ナット第1ねじ部	0.027
16	F20055'	709045	2.042	1.838	ナット第1ねじ部	0.100
17	F200545	808959	1.838	1.634	ナット第1ねじ部	0.111
18	F201824	55347	9.804	2.451	ナット第1ねじ部	0.750
19	F201520	111071	8.170	2.042	ナット第1ねじ部	0.750
20	F2013518	139531	7.353	1.838	ナット第1ねじ部	0.750
21	F2016522	74792	8.987	2.247	ナット第1ねじ部	0.750
22	F201216	190889	6.536	1.634	ナット第1ねじ部	0.750
23	F20912	2000000	4.902	1.225	-	0.750
24	F201014	328619	5.719	1.430	ナット第1ねじ部	0.750

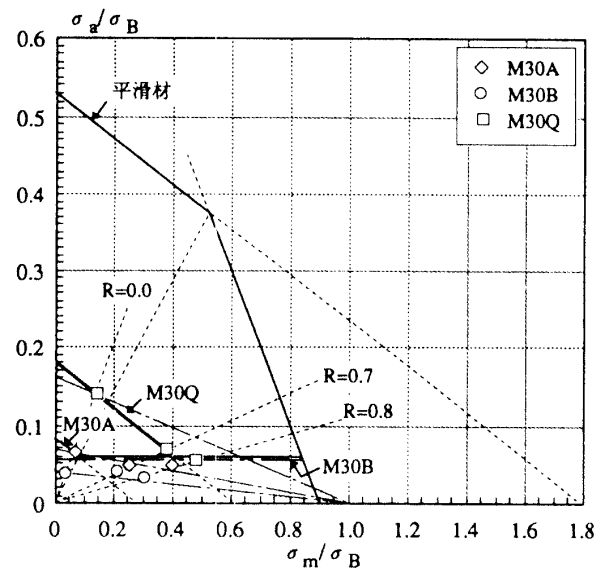


図6 疲労限度線図(平均応力 σ_m -応力振幅 σ_a 線図)

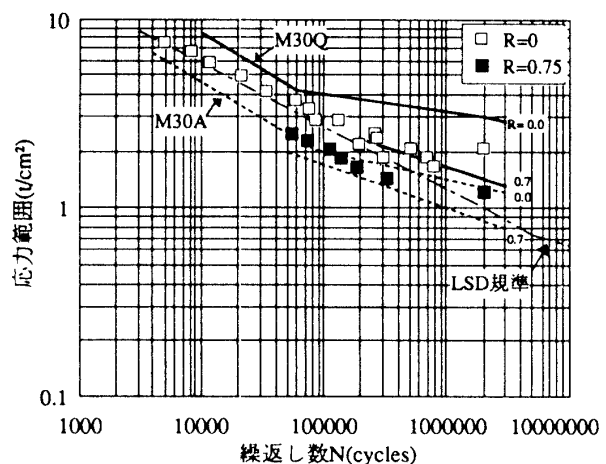


図7 S-N線図（高力ボルト）

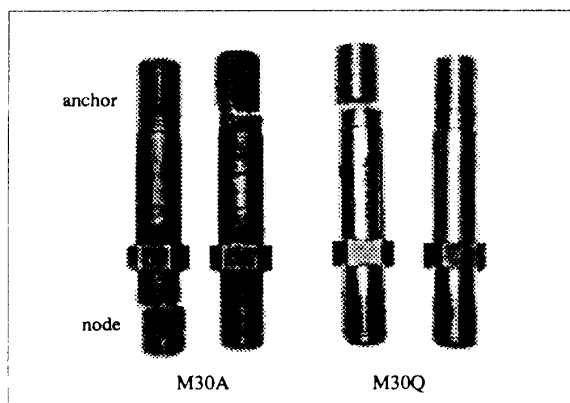


写真1 疲労破壊位置

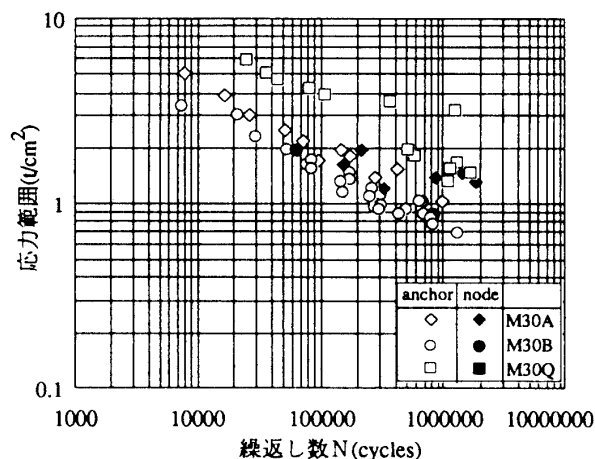


図8 S-N線図 (破壊位置)

また、高力ボルトの実験値は転造後熱処理(M30A)と熱処理後転造(M30Q)の間に位置し、熱処理後転造(M30Q)は高力ボルトと同等かそれ以上の疲労強度を有する。

ところで、破壊位置を写真1に、また、破壊位置別に表したものを図8に示す。接合部(球継手)の疲労破壊はノードではなく特殊ボルトねじ部で生じ、相対的にアンカーナット部の第1ねじ部の破壊が支配的である。ノード端面位置でのボルトねじ部の破壊は応力範囲の低応力域(2.0t/cm^2 以下)で観察された。なお、熱処理後転造ボルト(M30Q)の一部に軸部のコーンとの接触部分とアンカーナット側ねじ部との連成による破壊が認められた。

4. 転造ボルトを用いた接合部の疲労設計

システムトラスの接合部の疲労設計を行うには、各応力比の回帰直線(S-N線図)の傾きと疲労限度を推定することが必要である。前節によれば、各応力比の回帰直線(表4)で近似し、疲労限度を吉本による仮説(図6)に従うものとして設計することが可能である。

しかしながら、繰返し荷重下で応力比が実際には一定とは限らないので、疲労限度を応力比で規定することは危険側の場合があること、構造物によっては耐用期間の作用外力の繰返し回数が数万～数十万回と疲労限度として定義した200万回に比べかなり少ないこと、高い平均応力では疲労限度がほぼ一定であることを考慮すれば、安全側として疲労限度を一定値(下限値)に置き、応力比あるいは平均応力に無関係と単純化することが考えられる。また、回帰直線についても応力比0(0-to-tension)の高応力域での直線式が各応力比の実験点の下限と工学的に判断される。

よって、熱処理後ねじ転造ボルトを用いたシステムトラスの接合部(球継手)の実用的な疲労設計式は次式で与えられる。

$$SN^{0.375} = 263.7 \quad (S > 1.16) \quad (1-a)$$

$$N = \infty \quad (S \leq 1.16) \quad (1-b)$$

記号、S：応力範囲(t/cm^2)、N：応力の繰返し数

なお、図5に(1)式を太線で示しておく。

5. 纏め

本報では、M30特殊ボルトを用いた立体トラス(システムトラス)の接合部の疲労強度改善のために特殊ボルトの製造方法、応力比を実験変数として片振り繰返し実験を行い、その疲労特性を検討・考察し、熱処理後ねじ転造のボルトを用いた場合の実用疲労設計式を提案した。

それらを纏めれば以下の通りとなる。

- 1) 応力範囲で表せば、ボルトの製造方法、応力比により特殊ボルトの疲労特性に大きな差異が生じ、とくに、応力比0では切削後熱処理、転造後熱処理、熱処理後転造の順に疲労強度は高くなる。
- 2) 疲労限度は切削ボルトでは平均応力に無関係となり、転造ボルトでは平均応力に依存する。また、熱処理後転造したものではねじ谷底近傍に約35.7Kg/mm²の圧縮残留応力が存在すると推定される。
- 3) 接合部の疲労破壊はノード端面位置でのボルトねじ部あるいはアンカーナット部のボルト第1ねじ部で生じ、後者の破壊が大多数で、ノード端面位置での破壊は応力範囲が小さい領域(約2.0t/cm²以下)でのみ観察された。
- 4) 転造ボルト(熱処理後ねじ転造)を使用することにより高力ボルトと同等かそれ以上の疲労強度を得ることが可能である。

参考文献

- 1) 田中淳夫：評定からみたシステムトラス構造について、ビルディングレター、PP.1-7, 1988.4.
- 2) 脇山広三、今井克彦、山田義智：締付け力を導入した立体トラスのボルト接合部疲労強度に関する実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.933-934, 1988.10.
- 3) Katsuhiko Imai et al. : PROPOSING A NEW JOINT SYSTEM (KT-SYSTEM) OF SPACE FRAME WITH THREADED SPHERICAL NODES AND ITS FATIGUE CHARACTERISTICS, IASS Madrid, 1989.
- 4) 辻岡静雄、伊豆蔵庫喜、今井克彦、脇山広三：立体トラス接合部の疲労強度に関する実験的研究（その1）、日本建築学会北陸支部研究報告集、第36号、pp.43-46, 1993.7.
- 5) 辻岡静雄、安井信行、今井克彦：立体トラス接合部の疲労強度に関する実験的研究（その2）、日本建築学会北陸支部研究報告集、第38号、1995.7.
- 6) 山本 晃：ねじ締結の理論と計算、養賢堂、pp.102-122, 1992.
- 7) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説、技報堂、1993.4.
- 8) 吉本 勇編：ねじ締結体設計のポイント、日本規格協会、pp.136-1150, 1992.3.
- 9) 日本材料学会編：金属材料疲労設計便覧、第3版、養賢堂、pp.91-92, 1987.
- 10) 日本材料学会編：金属材料疲れ試験便覧、養賢堂、pp.42-43, 1968.
- 11) 日本建築学会：鋼構造限界状態設計規準（案）・同解説、1990.2.

(平成7年12月4日受理)