システムトラス球継手の疲労強度改善に関する研究

IMPROVED FATIGUE PROPERTIES OF JOINT SYSTEM WITH THREADED SPHERICAL NODES

辻岡 静雄^{*1}, 木下 陵二^{*2}, 古川 忠稔^{*3}, 今井 克彦^{*4}
Shizuo TSUJIOKA, Ryouji KINOSHITA, Tadatoshi FURUKAWA
and Katsuhiko IMAI

This system truss has the mechanism to induce the high bolt clamping force. Thus, the initial clamping force reduces the stress range in the bolt under applied cyclic loads and so improves the fatigue life. Moreover, to improve the fatigue properties of space trusses, this paper describes the fatigue tests of the single-bolt joints of system trusses conducted on actual connection models. The test variables are the size (M30, M42), the manufacturing process (rolling and machining) and the stress ratio of the joining bolt. And, for practical applications, the results are presented the S-N diagrams described by the stress range and the fatigue limit diagram. As a result of the tests, the bolt produced by thread rolling after the heat treatment has the better safety against fatigue than that produced by thread rolling before the heat treatment, thread machining and so on. There is remarkable difference in the fatigue limit by the stress ratio of the joining bolt produced by thread rolling after the heat treatment. And the fatigue design formula can be led from the lower bound by which the 95% confidence level was shown.

Keywords : Space truss, Spherical node, Thread rolling bolt, Screw threaded joint, Fatigue strength

立体トラス, 球節点, 転造ボルト, ねじ接合, 疲労強度

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・高性能接合部が多用されるなど新たな動きが認められる。また、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あり、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、設計の自由度が高かつ高精度の構造であるシステムトラス¹⁾は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。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、この特殊ボルトの静的耐力ばかりでなく疲労強度に配慮することが必要である。特に、接合用特殊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である。

既に、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、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、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などを得て、95%信頼幅を表す疲労設計式を導いている²⁾。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が、熱処理後ねじ転造のボルトは疲労強度が上昇して疲労限度が大きく向上することなど^{3)~7)}が知られているので、太径をねじ転造で製作することにより接合部の疲労強度が改善できると考えられる。

本報では、M30, M42特殊ボルトを用いた球継手の疲労実験によりシステムトラス接合部の疲労強度の改善に関する設計資料および設計式を提示する。実験時期によりシリーズI～IIIがあり、シリーズIでは転造ボルトの疲労特性を、シリーズII, IIIではボルトの各製造方法や転造ボルトの径による疲労特性の変動を検討・考察した。

2. 試験体と実験方法

システムトラスの接合形式として、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^{2), 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、現在のシステムトラスにおける使用材料の機械的性質の規格値を表1に示す。

、注) 本論文は参考文献8)～9)で発表したものに加筆して取りまとめたものである。

^{*1} 福井工業大学工学部建設工学科 教授・工博

^{*2} 川鉄シビル㈱ 部長補・工修

^{*3} 大阪大学大学院地球総合工学専攻 学内講師・工博

^{*4} 大阪大学大学院地球総合工学専攻 教授・工博

Prof., Faculty of Eng., Fukui Institute of Technology, Dr. Eng.

Manager, Kawatetsu Civil Co. Ltd., M. Eng.

Assist. Prof., Dept. of Global Arch., Graduate School of Eng., Osaka Univ., Dr. Eng.

Prof., Dept. of Global Arch., Graduate School of Eng., Osaka Univ., Dr. Eng.

試験体はノード、特殊ボルト、スリーブと厚板(スタブコーンに相当)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(ねじ加工法、熱処理順序)、応力比 R (=ボルト軸力の下限值と上限値との比)、ボルト径で、ボルト初期導入軸力は零とした。ここに、特殊ボルトはM30x3、M42x3とし、SCM435材をねじ転造後熱処理(以後RHと略す)、熱処理後ねじ転造(以後HRと略す)、ねじ切削後熱処理(以後MHと略す)および熱処理後ねじ切削(以後HMと略す)の各方法で製造するものとし、各シリーズにおいて同径のボルトは同一ロットの棒鋼より切り出すように計画した。なお、従来の特殊ボルト(ねじ切削後熱処理ボルト)の実験結果³⁾も比較の対象とした。各シリーズの使用ボルトの形状寸法を図2に、各特殊ボルトの完成品引張試験結果も表2に示す。ここに、応力度はボルトの有効断面積を用いて求めた。なお、ボルト記号はボルトの呼び径、製造方法の順に表されている。

今回の実験では引張繰返し荷重を対象として、50 t 油圧サーボ式構造物疲労試験装置を用いて周波数2~6 Hzの正弦波の定常波試験を行った(図3)。なお、シリーズII、IIIでは上下のボルト径を同一とした。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)を標準とし、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式を表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 S (=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、シリーズIのM30特殊ボルト(M30MH)については既往の実験結果³⁾も合わせて考察することとした。

疲労破壊はノードではなく特殊ボルトねじ部で生じ、シリーズIでは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。シリーズII、IIIではノード端面位置でのボルトねじ部の破壊が6~7割となり、ねじ長さの変更の影響が認められる。これは、アンカーナット第1ねじ部がアンカーナット側の不完全ねじ部から離れるからである。なお、シリーズIの熱処理後ねじ転造ボルト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。

表2 ボルトの完成品引張試験結果

Series	Bolt	Tensile Strength σ_B (MPa)
I	M30MH	1020
	M30RH	1029
	M30HR	1076
II	M30MH	1141
	M30HM	1074
	M30RH	1014
	M30HR	1016
III	M30RH	989
	M30HR	1111
	M42RH	977
	M42HR	997

図3 実験装置概要(シリーズI)

図1 立体トラス節点

表1 材料の機械的性質(規格値)

Material, Grade		Tensile Strength (MPa)	Yield Stress (MPa)	Elong. %	Hardness HRC
Bolt M12-M36 M42-M56	SCM435	≥ 1000	≥ 900	≥ 15	29 ~ 33
		≥ 950	≥ 850	≥ 15	29 ~ 33
Anchor Nut	SCM435	≥ 900	≥ 800	≥ 15	29 ~ 36
Node	SCM435	≥ 900	≥ 800	≥ 15	27 ~ 36
Sleeve Nut	SCM435	≥ 700	≥ 500	≥ 17	25 ~ 30
Hexagonal Sleeve	S45C	≥ 700	≥ 500	≥ 17	25 ~ 30
Stub Cone	SS400	≥ 410	≥ 240	≥ 23	-

注) 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, 徐冷

図2 特殊ボルト

ところで、図4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、シリーズIでは、ねじ切削後熱処理の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、ねじ転造後熱処理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る。また、熱処理後ねじ転造では、その特性はねじ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、ねじ転造後熱処理の2倍程度となる。これは、転造ボルトの補正係数が1.7~2.0であること⁴⁾と合致すると言える。さらに、応力比が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。一方、シリーズII, IIIでは熱処理後ねじ転造以外は同程度の疲労強度であり、応力比の影響も小さくなった。次に、ボルト呼び径の影響については、熱処理後ねじ転造・ねじ転造後熱処理共、M30特殊ボルトに比べM42特殊ボルトの疲労強度、疲労限度は低下する傾向にある。

本実験では、転造に伴う表面圧縮残留応力・加工硬化・表面の平滑化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、ねじ切削による表面きずによる疲労強度の低下の諸効果が疲労強度に影響を与えていると考えられるが、特に、ねじ転造による残留応力などや平均応力の疲労限度への影響をM30特殊ボルトにおいて検討する。

表3-a 実験結果(シリーズI)

Series	No	Bolt	Cycles to Failure N	Maximum Stress(MPa)	Stress Range S (MPa)	Stress Ratio R	Failure Mode
I	1	M30RH	16606	388.9	380.4	0.022	anchor
	2		26276	304.3	295.9	0.028	anchor
	3		220704	202.9	194.4	0.042	node
	4		52821	253.6	245.2	0.033	anchor
	5		176805	186.0	177.5	0.045	anchor
	6		1422046	152.2	143.7	0.056	node
	7		73948	219.8	211.3	0.038	anchor
	8		157423	169.1	160.6	0.050	node
	9		419001	160.6	152.2	0.053	anchor
	10		7883	507.2	498.8	0.017	anchor
	11		859672	143.7	135.3	0.059	node
	12		150151	202.9	194.4	0.042	anchor
	13		1807618	135.3	126.8	0.063	node
	14		97687	558.0	169.1	0.697	anchor
	15		279638	439.6	135.3	0.692	anchor
	16		325267	388.9	118.4	0.696	node
	17		975560	338.2	101.4	0.700	anchor
	18		2000000	304.3	91.3	0.700	-
	19		818665	490.3	98.1	0.800	anchor
	20		2000000	456.5	91.3	0.800	-
	21		415753	591.8	118.4	0.800	anchor
	22	M30HR	37362	507.2	498.8	0.017	anchor
	23		25415	583.3	574.9	0.014	anchor
	24		83875	422.7	414.2	0.020	anchor
	25		46920	465.0	456.5	0.018	anchor
	26		110530	388.9	380.4	0.022	anchor
	27		371463	355.1	346.6	0.024	anchor
	28		1248682	321.3	312.8	0.026	anchor
	29		586769	583.3	175.0	0.700	anchor
	30		1301679	541.1	162.3	0.700	anchor
	31		1177372	507.2	152.2	0.700	anchor
	32	M30MH	524110	642.5	192.8	0.700	anchor*
	33		2000000	583.3	116.7	0.800	-
	34		1129827	642.5	128.5	0.800	anchor
	35		1699712	473.4	142.0	0.700	anchor*
	36		800776	405.8	81.2	0.800	anchor
	37		840137	372.0	74.4	0.800	anchor
	38		1342050	338.2	67.6	0.800	anchor

Note: * anchorはアナ・ナット部の第一ねじ部破壊, nodeはノド端面位置でのねじ部破壊

* 印は軸部とねじ部の連成破壊

表3-b 実験結果(シリーズII, III)

Series	No	Bolt	Cycles to Failure N	Maximum Stress(MPa)	Stress Range S (MPa)	Stress Ratio R	Failure Mode
II	1	M30RH	1210544	118.4	109.9	0.071	node
	2		1161087	101.4	93.0	0.083	node
	3		242023	152.2	143.7	0.056	node
	4		77722	186.0	177.5	0.045	node
	5		74674	219.8	211.3	0.038	node
	6		44046	253.6	245.2	0.033	node
	7		27014	304.3	295.9	0.028	node
	8		15187	388.9	380.4	0.022	node
	9		1246251	93.0	84.5	0.091	node
	10		1525918	84.5	76.1	0.100	node
	11		110925	558.0	169.1	0.697	anchor
	12		294576	388.9	118.4	0.696	node
	13		667307	338.2	101.4	0.700	node
	14		1934716	287.4	84.5	0.706	node
	15	M30HR	22466	439.6	431.2	0.019	node
	16		48020	388.9	380.4	0.022	node
	17		91124	346.6	338.2	0.024	node
	18		255700	304.3	295.9	0.028	anchor
	19		401937	245.2	236.7	0.034	anchor
	20		977864	211.3	202.9	0.040	node
	21		2000000	186.0	177.5	0.045	-
	22		138212	642.5	192.8	0.700	anchor
	23		200077	642.5	192.8	0.700	anchor
	24		1034064	541.1	162.3	0.700	anchor
	25	M30MH	1440755	473.4	142.0	0.700	anchor
	26		1854748	642.5	128.5	0.800	anchor
	27		782512	583.3	116.7	0.800	anchor
	28		237945	152.2	143.7	0.056	node
	29		399343	118.4	109.9	0.071	node
	30		70693	219.8	211.3	0.038	node
	31		29231	304.3	295.9	0.028	node
	32		13270	388.9	380.4	0.022	node
	33		2000000	93.0	84.5	0.091	-
	34		344156	388.9	118.4	0.696	anchor
	35	M30HM	859500	338.2	101.4	0.700	node
	36		1545836	287.4	84.5	0.706	node
	37		119403	558.0	169.1	0.697	node
	38		1610190	253.6	76.1	0.700	node
	39		161828	152.2	143.7	0.056	node
	40		60177	219.8	211.3	0.038	node
	41		1402495	93.0	84.5	0.091	node
	42		329512	118.4	109.9	0.071	node
	43		25729	304.3	295.9	0.028	node
	44		18463	388.9	380.4	0.022	node
	45		385574	388.9	118.4	0.696	anchor
	46		1466731	338.2	101.4	0.700	anchor
	47		2000000	287.4	84.5	0.706	-
	48		117091	558.0	169.1	0.697	anchor
III	1	M30RH	1323586	109.9	101.4	0.077	node
	2		292399	131.0	122.6	0.065	node
	3		131972	152.2	143.7	0.056	anchor
	4		74854	202.9	194.4	0.042	node
	5		22410	304.3	295.9	0.028	node
	6		2000000	84.5	76.1	0.100	-
	7		129718	558.0	169.1	0.697	node
	8		366882	422.7	126.8	0.700	anchor
	9		687833	338.2	101.4	0.700	node
	10		1387994	287.4	86.2	0.700	node
	11	M30HR	193741	760.9	152.2	0.800	anchor
	12		296403	676.3	135.3	0.800	anchor
	13		828551	507.2	101.4	0.800	anchor
	14		2000000	422.7	84.5	0.800	-
	15		26378	448.1	439.6	0.019	anchor
	16		44360	397.3	388.9	0.021	anchor
	17		73045	346.6	338.2	0.024	node
	18		408499	304.3	295.9	0.028	anchor
	19		711317	253.6	245.2	0.033	anchor
	20		2000000	202.9	194.4	0.042	-
	21	M30MH	247597	642.5	192.8	0.700	anchor
	22		392344	574.9	172.5	0.700	anchor
	23		844278	439.6	131.9	0.700	node
	24		2000000	417.6	125.1	0.700	-
	25		718960	490.3	147.1	0.700	node
	26		753421	676.3	135.3	0.800	anchor
	27		2000000	642.5	128.5	0.800	-

表 3-c 実験結果 (シリーズIII)

Series	No	Bolt	Cycles to Failure N	Maximum Stress(MPa)	Stress Range S (MPa)	Stress Ratio R	Failure Mode
III	28	M42RH	157280	121.6	117.5	0.033	node
	29		53064	182.4	178.3	0.022	node
	30		251253	101.3	97.3	0.040	node
	31		811245	64.8	60.8	0.063	anchor
	32		2000000	52.7	48.6	0.077	-
	33		44046	253.6	245.2	0.033	node
	34		27014	304.3	295.9	0.028	node
	35		15187	388.9	380.4	0.022	node
	36		1246251	93.0	84.5	0.091	node
	37		1525918	84.5	76.1	0.100	node
	38		795530	243.1	72.9	0.700	node
	39		360593	269.9	81.0	0.700	anchor
	40		377099	297.4	89.2	0.700	node
	41		1031720	188.8	56.7	0.700	anchor
	42		2000000	162.1	48.6	0.700	-
	43	M42HR	82528	299.9	295.8	0.014	anchor
	44		197627	263.4	259.3	0.015	node
	45		392695	222.9	218.8	0.018	anchor
	46		814502	210.7	206.7	0.019	node
	47		2000000	198.6	194.5	0.020	-
	48		44046	253.6	245.2	0.033	node
	49		27014	304.3	295.9	0.028	node
	50		15187	388.9	380.4	0.022	node
	51		1246251	93.0	84.5	0.091	node
	52		1525918	84.5	76.1	0.100	node
	53		816481	364.7	109.4	0.700	anchor
	54		1350609	324.2	97.3	0.700	node
	55		2000000	291.8	87.5	0.700	-

表 4 回帰直線式

Series	Bolt	Loading type	$\sigma \max - \sigma \min$
I	M30MH	0-to-tension	$\log S = -0.3208 \log N + 3.803$
		7/10-to-tension	$\log S = -0.2549 \log N + 3.426$
	M30RH	0-to-tension	$\log S = -0.2349 \log N + 3.526$
		7/10-to-tension	$\log S = -0.2245 \log N + 3.340$
	M30HR	0-to-tension	$\log S = -0.1447 \log N + 3.350$
		7/10-to-tension	$\log S = -0.2154 \log N + 3.503$
II	M30MH	0-to-tension	$\log S = -0.3581 \log N + 4.064$
		7/10-to-tension	$\log S = -0.2793 \log N + 3.640$
	M30HM	0-to-tension	$\log S = -0.3488 \log N + 5.014$
		7/10-to-tension	$\log S = -0.2200 \log N + 3.330$
	M30RH	0-to-tension	$\log S = -0.3078 \log N + 3.825$
		7/10-to-tension	$\log S = -0.2374 \log N + 3.402$
III	M30HR	0-to-tension	$\log S = -0.2008 \log N + 3.520$
		7/10-to-tension	$\log S = -0.1215 \log N + 2.920$
	M30RH	0-to-tension	$\log S = -0.2646 \log N + 3.575$
		7/10-to-tension	$\log S = -0.2895 \log N + 3.708$
	M30HR	0-to-tension	$\log S = -0.1552 \log N + 3.313$
		7/10-to-tension	$\log S = -0.2184 \log N + 3.451$
	M42RH	0-to-tension	$\log S = -0.3950 \log N + 4.120$
		7/10-to-tension	$\log S = -0.3335 \log N + 3.790$
	M42HR	0-to-tension	$\log S = -0.1648 \log N + 3.280$
		7/10-to-tension	$\log S = -0.2340 \log N + 3.423$

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

図 4 S-N線図

図4 S-N線図(続き)

図5 疲労限度線図(平均応力 σ_m - 応力振幅 σ_a 線図)

図5に表2の引張強さ σ_B で規格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。細実線は平滑材に対する疲労と降伏の安全領域として規定した疲労限度である。中太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⁶⁾に従う推定式で、切欠き係数 β_k をM30細目ねじの値⁶⁾ 4.63として算出した。熱処理後ねじ転造ボルトに対しては、吉本の仮説に従う推定式を正方向に平行移動させて応力比0の実験値を通る様にする事で疲労限度の線図を得ている。点線は山本によって提案された計算式⁹⁾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、応力比0の実験値を通る様にした線図である。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1590N/mm²、鋼材の降伏点 σ_y 、引張強さ σ_B を各々941, 1040N/mm²、両振りの疲労限度 σ_w を451N/mm² とした。図より、修正Goodman線図は切削ボルトやねじ転造後熱処理ボルトでは疲労限度の実験値を評価可能であるが、熱処理後ねじ転造ボルトでは過大評価する場合があること、切削ボルトに対する実験値はほぼ一定で山本の方法により実験値を評価可能なことが得られた。また、転造ボルトでは、吉本の仮説に従う推定式や応力比0の実験値を通る疲労限度の線図が転造ボルトの各応力比の実験値の傾向を良く表している。すなわち、ねじ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、熱処理後ねじ転造したものの線図の平行移動量は約136~333N/mm²で、これに相当する圧縮残留応力などがねじ谷底近傍に存在すると推定される

ことなどが得られる。これらより、切削ボルトやねじ転造後熱処理ボルトでは平均応力に依存しない山本の方法で、熱処理後ねじ転造ボルトでは応力を応力比零の結果に基づく残留応力を考慮した吉本の仮説で疲労限度を評価できると言える。

4. 疲労設計曲線

疲労設計を行うには、各応力比の回帰直線(S-N線図)の傾きと疲労限度が必要である。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中の作用外力の繰返し回数が数万~数十万回と疲労限度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、回帰直線を応力比とボルト径に無関係として熱処理後ねじ転造とそれ以外の製造法のボルトに区分して、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(図6)。

よって、熱処理後ねじ転造ボルトとそれ以外のボルトの破壊した実験点全てに対しての各回帰直線および95%信頼幅を図6に各々太線、細線で、その上下限式を(1)式に示す。熱処理後ねじ転造ボルトはそれ以外のボルトに比べ全般にわたって疲労強度は高いが、回帰直線の傾きはいずれもほぼ等しいといえる。

一方、同図には文献3で提案した当形式のシステムトラス接合部(M20~M48特殊ボルト)の疲労設計式を点線で示すが、その疲労設計式は切削ボルトや転造後熱処理ボルトの下限式にほぼ対応する。微小項を無視すれば、この下限式より実用的な疲労設計式として

＜回帰直線＞

$$\cdot \text{熱処理後ねじ転造ボルト} : \log S = 3.999 - 0.2979 \times \log N \pm 0.2279 \sqrt{1 + (\log N - 5.499)^2 / 14.17} \quad (1-a)$$

$$\cdot \text{それ以外のボルト} : \log S = 3.787 - 0.3080 \times \log N \pm 0.1575 \sqrt{1 + (\log N - 5.347)^2 / 35.56} \quad (1-b)$$

＜疲労設計式＞

$$\cdot \text{熱処理後ねじ転造ボルト} : S \times N^{0.2927} = 5901 \quad (S > 89.4) \quad (2-a)$$

$$\cdot \text{それ以外のボルト} : S \times N^{0.3080} = 4261 \quad (S > 48.8) \quad (2-b)$$

記号, S: 応力範囲(N/mm²), N: 応力の繰返し数

(2) 式が導かれ, 熱処理後ねじ転造とすることにより38.5%の疲労強度の改善が可能であると言える。

5. 纏め

本報では, 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, ボルト径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・考察した。それらを纏めれば以下の通りとなる。

- 1) 特殊ボルトの製造方法, 応力比により疲労特性に大きな差異が生じ, とくに, 切削およびねじ転造後熱処理ボルトは応力比にかかわらず同程度であるが, 熱処理後ねじ転造ボルトではそれ以外のボルトに比べ応力比0で疲労強度は高くなり, 応力比0.7では疲労強度が低下する。また, ボルト呼び径が大きくなれば疲労強度, 疲労限度は低下する傾向にある。
- 2) 疲労限度は切削ボルトでは平均応力に無関係で, 熱処理後ねじ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最大333N/mm²程度の圧縮残留応力など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ねじ部で観察された。
- 4) 熱処理後ねじ転造ボルトを使用することにより38.5%の疲労強度の改善が可能で, その実用的な疲労設計式は(2-a)式である。

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) 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.
- 3) 辻岡静雄, 山田義智, 安井信行, 今井克彦, 脇山広三: 立体トラス接合部の疲労特性に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第490号, pp.223-228, 1996.12.
- 4) 山本 晃: ねじ締結の理論と計算, 養賢堂, pp.102-122, 1992.
- 5) 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.
- 6) 吉本 勇編: ねじ締結設計のポイント, 日本規格協会, pp.136-151, 1992.3.
- 7) 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.
- 8) 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改善に関する実験的研究, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第35号・構造系, pp.89-92, 1995.7.
- 9) 辻岡静雄, 安井信行, 今井克彦: システムトラスの球継手の疲労強度改善に関する研究, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第38号・構造系, pp.389-392, 1998.7.
- 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.

図6 S-N線図(製造方法)

(2002年3月13日原稿受理, 2002年9月17日採用決定)