

テンション構造用鋼棒及び接合部の構造性能

FATIGUE AND ULTIMATE STRENGTH OF TENSION RODS AND THEIR CONNECTIONS

小野 徹郎*, 竹内 徹**, 岩田 衛***, 石田 和人****

Teturo ONO, Toru TAKEUCHI, Mamoru IWATA

and Kazuto ISHIDA

Although cables are the most popular structural material for tension structures, high-strength steel rods are also used as tensile members. However, because of the fact that these rods were originally developed as pre-stress members and temporary members, performances against high-stress cyclic loads have not been cleared yet. Also for the typical pin-block connections, ultimate or fatigue strength including eccentric pin are yet to be clarified. In this paper, above characteristics are confirmed by tests and analyses, followed by discussion on the performance of the overall system.

Keywords : Tension structure, Steel rod, Connection, Design Strength, Fatigue

テンション構造, 鋼棒, 接合部, 設計耐力, 疲労

1. 序

ケーブルやロッド(鋼棒)を用いたテンション構造の設計は現在まで幾何非線形問題を含め静的許容応力度設計によることが一般的であったが、その動的性能についての議論も近年徐々に行われるようになってきている^{1)~11)}。これらの構造は不静定次数の低さ、使用鋼材の高強度化、接合部の回転変形の大きさなどの特性を有しており、動的性能を論じる前段階としてまず地震・強風等の外乱を想定した構成要素の終局耐力および疲労性能の把握が必要である。

テンション材の内、ケーブル材については、吊橋を中心とする多くの研究成果により、その終局・疲労性状に関する豊富な知見が得られている³⁾。しかしながら近年テンション材として多用されるようになった高張力鋼棒については、これらの部材が本来コンクリートのプレストレス用や土止め構造物用に開発されてきたものであるため⁶⁾、端部のディティールを含め確認されている性能が建築のテンション構造で要求される条件と必ずしも一致したものになっていない。図1に示したようなピンを用いた汎用的な接合部形式を想定し、以下に現在得られている知見を整理するとともに、設計上の問題点を示す。

1) 鋼棒及び定着ネジ部の性能

プレストレス材や締結ボルトとして使用される高張力鋼棒は、疲

労限度以下の低応力レベルに対し設計するため、現在得られている疲労性能の変動応力振幅は高くとも100~150MPaの範囲となっている⁷⁾⁸⁾。一方、長期許容応力度分の初期張力を有し、短期許容応力度限界から圧縮に転じるまでの範囲で設計されるテンション材においては最大振幅応力は400~700MPaに達する可能性があり、これら高応力振幅下における疲労性能の知見は十分でない。またこれらの鋼棒のネジ定着部には形状・製法も数種類のものが混用されており、これら定着ネジの形状・製法が切欠き部として疲労性能・終局耐力に与える影響も明らかになっていない。

2) ピンブロック・ピンの性能

定着部を構造体に接続する接合部材には、図1に示すようなピンブロック形式が汎用的に設計・使用されるようになっている。この中にはピンをブロック外径に対し偏心させ、性能向上を図ったものも含まれる。本接合部の弾性応力評価法については古くから幾つかの文献が見られる^{9)~12)}。また限定された偏心形状の終局耐力が文献^{13)~14)}に、偏心の無い形状においてピン穴/ブロック径比と終局強度の関係を論じた研究が森田ら¹⁵⁾により発表されている。しかしその一方で実際の設計においてはリベット・ボルト接合の縁端部の設計式が流用されているなど¹⁶⁾、ピンの偏心効果を含む形状に応じた耐力評価式・設計式は整理されていないのが現状である。従ってこれ

* 名古屋工業大学 教授・工博
** 新日本製鐵㈱ 部長代理・工修
*** 神奈川大学 教授・工博
**** 愛知工業大学 教授・工博

Prof., Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.
Senior Manager, Nippon Steel Corp., M. Eng.
Prof., Kanagawa Univ., Dr. Eng.
Prof., Aichi Institute of Technology, Dr. Eng.

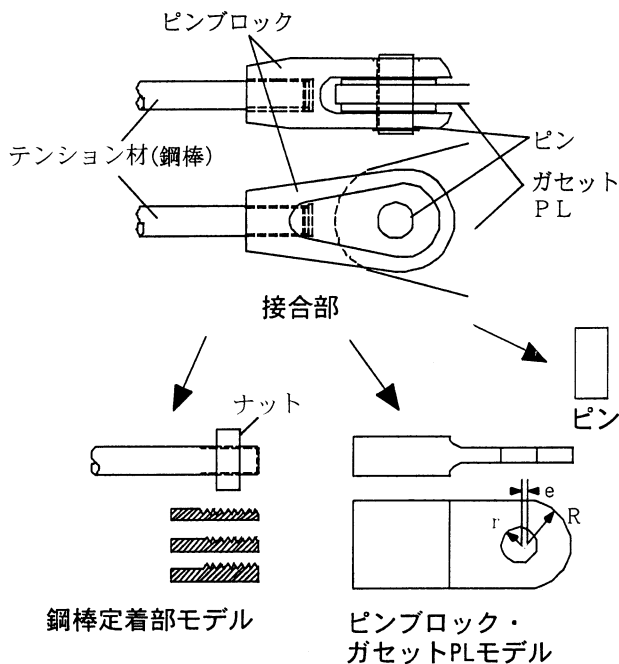


図1 鋼棒によるテンション構造の接合部構成

らを前提とする接合部自身の疲労性能も評価できる段階に至っておらず、鋼棒の性能とのバランスも不明である。

これより、本論ではテンション構造用接合部を分解し、まず多用される3種類の鋼棒および3種類のネジ定着部の製法において、設計上想定される高応力振幅下における疲労性能及び終局耐力を実験的に検証し、素材およびネジ定着部の製法がこれらの性能に与える影響を把握する。次にピンブロック形式の接合部においてピン径・ピンブロック径の比、ピンの偏心率を変化させた試験体を製作し、実験的にその耐力を確認すると共に現在使用されている各設計式の評価を行う。最後に以上の知見を総合し接合部全体の耐力・疲労試験を行い接合部システム全体の動的入力下における性能およびバランスについて考察する。

2. 高張力鋼棒および定着部の耐力および疲労性能

鋼棒を用いたテンション材の接合部においてピンブロックとガセットPLの構成を同一と考えると、構造性能を評価するための要素は図1に示す以下の要素に分解できる。

- 鋼棒およびネジ定着部
- ピンブロックまたはガセットPL
- ピン

まず、a)のネジ定着部付き鋼棒について考える。テンション構造

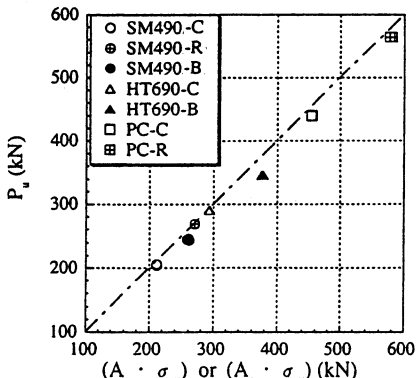


図3 定着部引張試験・素材試験関係

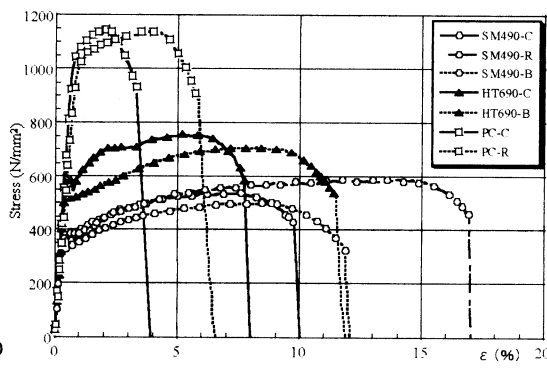


図4 荷重-ナット間歪度関係

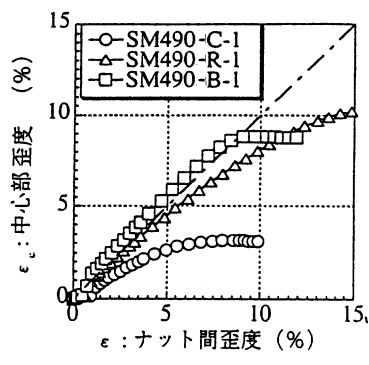


図5 中心部歪度-ナット間歪度関係

表1 鋼棒素材の機械的性質

試験体	降伏応力 σ_s (N/mm ²)	最大応力 σ_b (N/mm ²)	降伏比 σ_s/σ_b	ヤング率 E (N/mm ²)	伸び率 (%)
SM490-C	304	553	0.549	2.19E+05	42.2
SM490-R	304	554	0.549	2.17E+05	41.2
SM490-B-C	311	537	0.579	2.14E+05	45.3
SM490-B-S	315	538	0.585	2.14E+05	45.9
HT690-C	555	780	0.712	2.15E+05	37.1
HT690-B-C	554	787	0.704	2.21E+05	36.7
HT690-B-S	532	764	0.696	2.18E+05	37.8
PC	1073	1191	0.901	2.15E+05	25.8

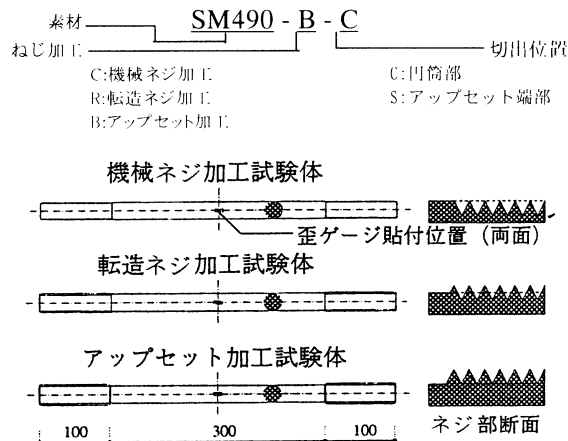


図2 鋼棒試験体および定着部仕様

表2 定着部ネジ仕様および引張り試験破断位置

試験体	円筒部外径	ネジ外径	ネジピッチ	ネジ谷	破断位置
SM490-C	φ25	M24	P2.0	r0.20	2
SM490-R	φ26	M27	P2.0	r0.26	2
SM490-B	φ25	M30	P3.5	r0.35	5
HT690-C	φ25	M24	P2.0	r0.20	2
HT690-B	φ25	M30	P3.5	r0.35	5
PC-C	φ26	M24	P2.0	r0.20	2
PC-R	φ26	M27	P2.0	r0.26	2

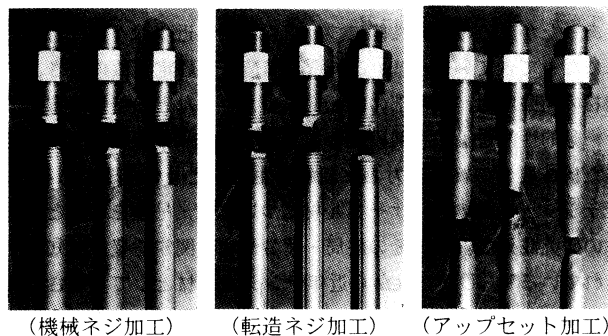
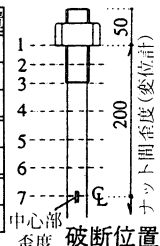


写真1 鋼棒引張り試験破断状況 (SM490)

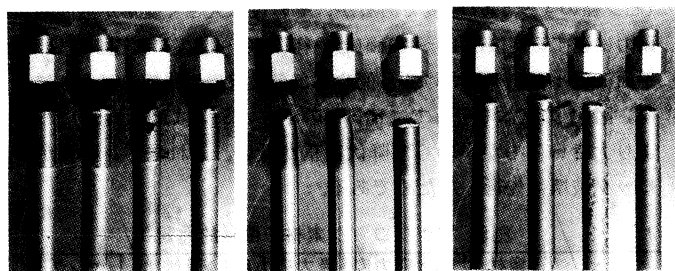
用鋼棒としてSM490、HT690(タイロッド)、PC 鋼棒(B 種)を考えると、現在定着部に使用されているネジ加工方法としては以下の3種が上げられる。

- 1) 鋼棒をそのまま切削し機械ネジ加工する
- 2) 鋼棒を切削せず転造によりネジ加工する
- 3) 鋼棒を一旦アップセットし径を増大させた後機械ネジ加工する

ネジ部は鋼棒素材にとっては切欠き応力集中部となる。そこで定着部を持つ各素材の引張り試験および疲労試験を行い、素材およびネジ定着部の違いが耐力および疲労特性に与える影響を解明する。

表1に試験体に用いた鋼棒の場所別の機械的性質、図2に試験体図を示す。ロッド素材はSM490、HT690、PC 鋼棒の3種、ネジ定着部は機械ネジ加工、転造ネジ加工、アップセット後機械ネジ加工の3種とし、これらを組み合わせて7種類の試験体を作成する。表1の素材試験結果を見ると、同一素材で定着部仕様および切出し位置による降伏応力度、最大応力度および伸び率に優位な差は認められない。

最初にこれらの試験体各3体について単純引張り試験を行う。表2に定着部を含む試験体の一覧、定着部仕様および引張り試験における破断位置を示す。写真1に示すように破断は素材に関わらず機械ネジ加工・転造ネジ加工ではネジ部2、アップセットネジ加工では母材部5で破断した。図3に定着部試験と素材試験の比較を示す。縦軸は定着部試験引張り強度、横軸は素材試験から得られた最



(機械ネジ加工) (転造ネジ加工) (アップセット加工)

写真2 疲労試験体破断状況

表3 定着部疲労試験結果

試験体	A_0 (mm ²)	A_e (mm ²)	P_{max} (kN)	破断位置	破断回数(回)
SM490-C-4	493	382	105.25	1	70359
SM490-C-5	488	381	136.91	1	18946
SM490-C-6	488	381	82.03	1	343114
SM490-C-7	490	380	163.56	1	11947
SM490-R-4	524	487	132.30	1	1500243
SM490-R-5	524	487	175.62	1	47372
SM490-R-6	524	488	215.01	1	15824
SM490-B-4	484	550	137.49	1	49475
SM490-B-5	485	549	190.71	1	18555
SM490-B-6	483	546	93.69	1	1007095
SM490-B-7	479	548	160.43	1	25420
HT690-C-4	493	375	187.08	3	12547
HT690-C-5	491	375	239.32	3	3607
HT690-C-6	490	375	145.53	1	27968
HT690-C-7	489	375	103.59	1	101634
HT690-B-4	481	548	241.77	1	14258
HT690-B-5	482	549	191.10	1	23008
HT690-B-6	480	545	288.91	1	4532
HT690-B-7	481	547	125.34	1	162919
PC-C-4	510	382	341.63	1	2798
PC-C-5	510	382	281.86	1	4804
PC-C-6	510	382	202.86	1	9579
PC-C-7	510	381	132.30	1	66965
PC-R-4	511	486	464.91	1	3930
PC-R-5	510	484	358.97	1	22546
PC-R-6	510	484	259.50	1	554573

P_{max} : 最大振動、 A_e : 有効断面積($= (d-0.938p)^2 \times 4$ (d: 2並列径、p: ピッチ))

大応力 σ_u と破断場所断面(ネジ部有効断面積 A_e または母材断面積 A_0)との積をとっている。実験値と素材強度からの計算値は良い対応を示していることから、素材試験から定着部の耐力を予測することができる。図4に荷重-ナット間歪度、図5に中心部歪度-ナット間歪度の関係を示す。図4の縦軸は反力を A_e または A_0 で除した値とし、横軸は変位測定長さ(400mm)で伸びを除した歪度を用いている。この図より同素材であってもネジ定着部の製造仕様の違いにより、最大応力や伸び率に差が見られ、共通して転造ネジ、アップセット、機械ネジ加工の順に破断伸び率が向上している。図5はSM490において縦軸に材中央の歪ゲージによる値、横に図4と同じ歪度を取り定着部の差をまとめたものである。鎖線は鋼材が均一に伸びた場合を示しているが、機械ネジ加工は早期よりネジ部に応力集中を生じてナット間歪度のみが上昇し、転造ネジおよびアップセット後ネジ加工では破断までのあいだ中央部が歪度8%程度まで均一に伸びていることが解る。

次にこれらの試験体に対し疲労試験を行う。初期張力を含むテンション材を想定し、入力引張り側の片振り試験とし、単純引張り試験の結果を参考に0からナット間歪度0.1%、0.2%、0.4%に対応する最大荷重を持つ正弦波として入力する。写真2に破断状況、

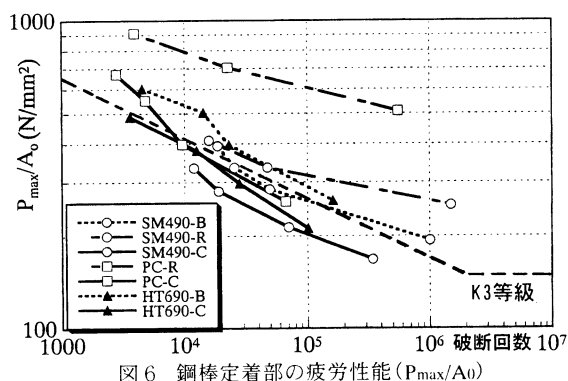


図6 鋼棒定着部の疲労性能 (P_{max}/A_0)

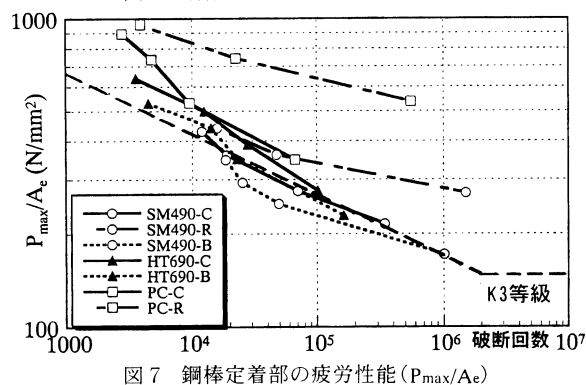


図7 鋼棒定着部の疲労性能 (P_{max}/A_e)

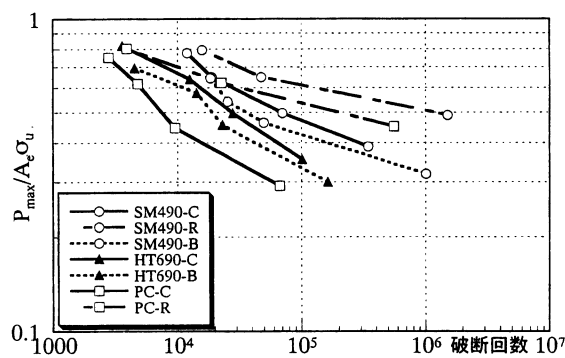


図8 鋼棒定着部の疲労性能 ($P_{max}/A_e\sigma_u$)

表3に試験結果の一覧を示す。同表中の破断位置の定義は表2と同様である。引張り試験と異なり、疲労载荷時の破断はすべてネジ部で生じている。図6～8に疲労曲線を示す。図6はネジの仕様に関わらず母材部の断面積 A_0 で標準化した見かけの疲労曲線で、疲労性能は各素材毎におおむね転造ネジ、アップセット、機械加工の順となっている。同図中の破線はK3等級⁸⁾の疲労曲線である。図7は破断位置であるネジ部断面積 A_e で標準化したもので、アップセットは機械加工より単位断面積あたりの疲労性能は低下することがわかる。図8はさらに単純引張り試験の最大応力度 σ_u で除したもので、図6、7よりばらつきは減少するが、一致していないのは定着部の特性によるものと考えられる。これらより同素材、同ネジ形状に対しては疲労性能は転造ネジ、機械加工、アップセットの順となるが、アップセットのネジ部断面積が他に比べて大きいいため、見かけ上の性能は機械加工より高い。

以上の性能を一般的なテンション構造の設計クライテリアと比較すると、タイロッドおよびPC鋼棒の許容応力度がそれぞれ440MPa、660MPa程度であり、台風通過時の最大風荷重の繰返し回数が $10^3 \sim 10^4$ 程度に達する可能性があることから、これらの定着部仕様が構造安全性に影響を与え、設計応力の繰返し入力に対する疲労性能の照査が必要なレベルにあると考えられる。

3. ピンブロック・ガセットプレートの耐力

ピンブロック、ガセットPLの降伏・終局耐力について図9に示すようなモデルを考え、外径/ピン径比 R/r およびピン孔偏心/ピン径比 e/r をパラメータとした引張り試験による検証を行う。試験体の一覧を表4に示す。まず図10に示す様に $R/r=2, 2.5, 3.0, 3.5, e/r=-0.8, 0, 0.4, 0.8$ の計15ケースの単純化した平面試験体について引張り耐力実験を行う。これらの平面試験体においてはピンの耐力に十分な余裕を与え、破壊がピンブロックで決定されるようにする。図11に加力治具を示す。一方、ピンブロックとピンとの耐力が拮抗する立体モデルを作成し、同様に引張り実験を行う。立体モデルでは R/r をほぼ2.5とし、ピン径30mmで偏心のあるものと無いもの、ピン径を小さくしたものの3種を製作する。立

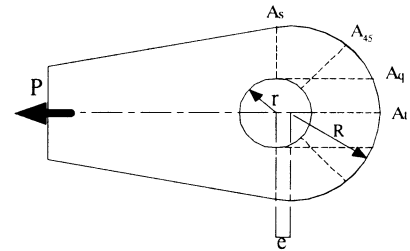


図9 ピンブロック・ガセットPL破壊線モデル

体モデルの試験体図を図12に示す。载荷にはサーボ高精度試験機を用い、ブロック・ガセットPL間の変位を変位計で、ピン周囲のブロック応力を3軸歪ゲージにて放射状に測定した。ピンと孔とのクリアランスは片側0.25mmとした。平面モデルの载荷状況を写真3に示す。

実験の結果得られた各試験体の荷重変形関係を外径毎に図13～図17に示す。また、得られた荷重変形関係より勾配が初期剛性の $1/6$ になった点からの接線と初期剛性との交点の荷重を降伏強度とし最大強度と共に表6にまとめる。平面試験体の荷重変形関係図13～16を見ると、外径比 R/r が大きいほど、ピン偏心量 e/r が大きいほど降伏強度・最大耐力・伸び共に増大しているが、共通して最大耐力の50%程度の荷重から塑性化による剛性低下が顕著となり見かけの降伏が生じている。降伏荷重に達した時の変形は1～2mm（ピン径の3～6%）程度であるが、その後は大きく変形が進み最大耐力に達する変位は10～20mm（ピン径の30～60%）に達している。平面モデルR37.5における各偏心率毎の最終変形状態を写真4に示す。図17の立体モデルではピン径の小さいS-3は R/r がS-1、S-2より大きいにもかかわらず降伏荷重が低い。これはピン破壊がブロック破壊に先行したためである。

表5 ピンブロック素材の機械的性質

	鋼材	降伏応力度 σ_y (N/mm ²)	最大応力度 σ_u (N/mm ²)	降伏比 σ_y/σ_u	ヤング率 E(N/mm ²)
試験体	SM490	320	682	0.469	2.10E+05
ピン(平面)	PC-B	881	1252	0.704	2.13E+05
ピン(立体)	S53CH	490	780	0.628	2.10E+05

表4 ピンブロック試験パラメータおよび各評価式による耐力値

Model No.	ピン半径 r (mm)	外径 R (mm)	孔偏心 e (mm)	厚 t (mm)	R/r	e/r	側断面 A _s (mm ²)	頂断面 A _t (mm ²)	せん断面 A _q (mm ²)	45断面 A ₄₅ (mm ²)	降伏点 σ _y (N/mm ²)	引張・せん断(kN)				支圧(kN)		
												慣例式 (1)(2)式	BS5950 (4)式	文献15) (6)式	提案式 (9)式	Hertz (5)式	慣例式 (3)式	文献15) (7)式
平面モデル																		
P-1	15	30.0	0	15	2.0	0.00	450	225	779	450	320	144	72	107	102	38	196	207
P-2	15	30.0	6	15	2.0	0.40	450	315	959	568	320	144	101	107	129	38	196	207
P-3	15	30.0	12	15	2.0	0.80	450	405	1139	668	320	144	108	107	151	38	196	207
P-4	15	37.5	-12	15	2.5	-0.80	675	158	671	391	320	124	50	151	89	38	196	233
P-5	15	37.5	0	15	2.5	0.00	675	338	1031	675	320	190	108	151	153	38	196	233
P-6	15	37.5	6	15	2.5	0.40	675	428	1211	795	320	216	137	151	180	38	196	233
P-7	15	37.5	12	15	2.5	0.80	675	518	1391	900	320	216	162	151	204	38	196	233
P-8	15	45.0	-12	15	3.0	-0.80	900	270	913	621	320	169	86	193	141	38	196	251
P-9	15	45.0	0	15	3.0	0.00	900	450	1273	900	320	235	144	193	204	38	196	251
P-10	15	45.0	6	15	3.0	0.40	900	540	1453	1021	320	268	173	193	231	38	196	251
P-11	15	45.0	12	15	3.0	0.80	900	630	1633	1130	320	288	202	193	256	38	196	251
P-12	15	52.5	-12	15	3.5	-0.80	1125	383	1149	850	320	212	122	232	192	38	196	264
P-13	15	52.5	0	15	3.5	0.00	1125	563	1509	1125	320	279	180	232	255	38	196	264
P-14	15	52.5	6	15	3.5	0.40	1125	653	1689	1247	320	312	209	232	282	38	196	264
P-15	15	52.5	12	15	3.5	0.80	1125	743	1869	1359	320	345	238	232	308	38	196	264
立体モデル																		
S-1	15	38.0	6	30	2.5	0.40	1380	870	2455	1620	320	442	278	308	367	76	393	468
S-2	15	38.0	0	30	2.5	0.00	1380	690	2095	1380	320	387	221	308	312	76	393	468
S-3	12.5	38.0	6	30	3.0	0.48	1530	945	2513	1770	320	464	302	326	401	53	327	420

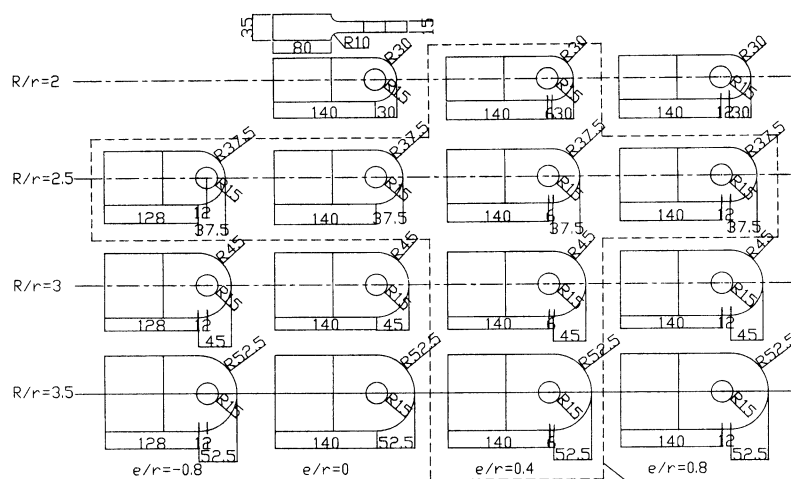


図10 ピンブロック平面モデル試験体図

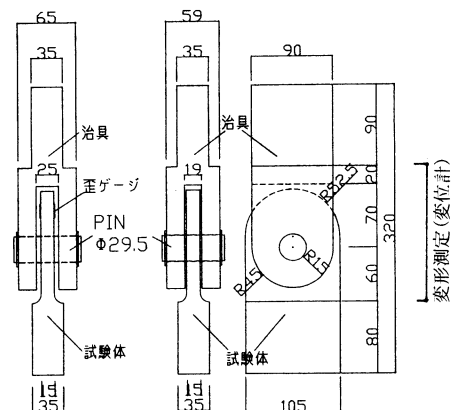


図11 平面モデル加力治具

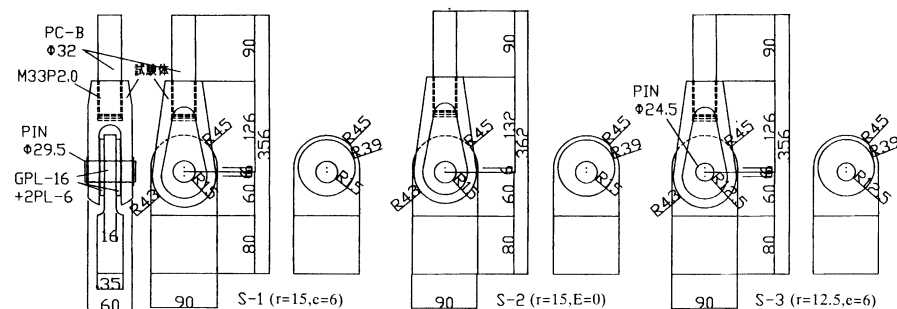


図12 ピンブロック立体モデル試験体図

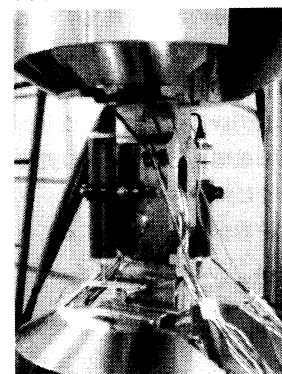


写真3 ピンブロック加力状況

表6 ピンブロック耐力試験結果

Model No.	R/r	e/r	降伏強度 (kN)	最大強度 (kN)	破壊形式
平面モデル					
P-1	2.0	0	118	219	PB破断
P-2	2.0	6	137	243	PB破断
P-3	2.0	12	157	247	PB破断
P-4	2.5	-12	99	178	PB破断
P-5	2.5	0	142	302	PB破断
P-6	2.5	6	174	341	PB破断
P-7	2.5	12	199	356	PB破断
P-8	3.0	-12	143	262	PB破断
P-9	3.0	0	194	374	PB破断
P-10	3.0	6	227	427	PB破断
P-11	3.0	12	247	458	PB破断
P-12	3.5	-12	179	341	PB破断
P-13	3.5	0	244	445	PB破断
P-14	3.5	6	250	498	PB破断
P-15	3.5	12	254	561	PB破断
立体モデル					
S-1	2.5	6	281	569	ピン破壊
S-2	2.5	0	250	541	PB破断
S-3	3.0	6	235	407	ピン破壊

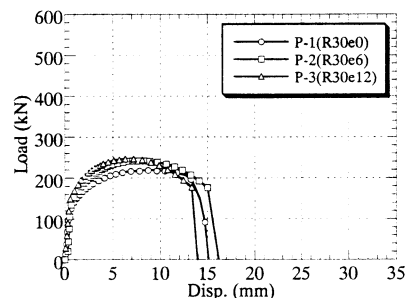


図13 平面モデル(R30) 荷重 - 変形関係

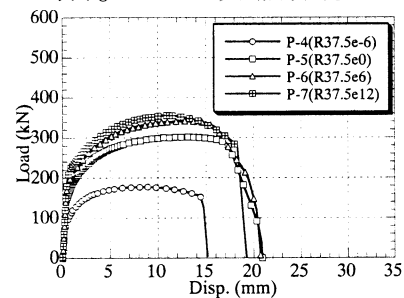


図14 平面モデル(R37.5) 荷重 - 変形関係

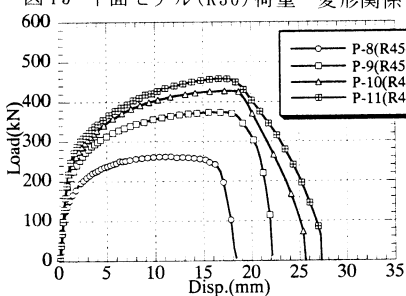


図15 平面モデル(R45) 荷重 - 変形関係

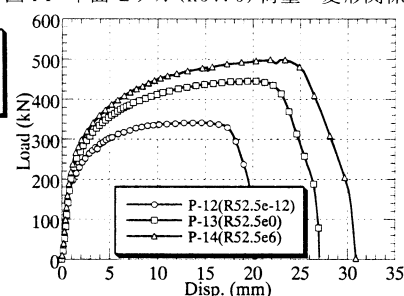


図16 平面モデル(R52.5) 荷重 - 変形関係

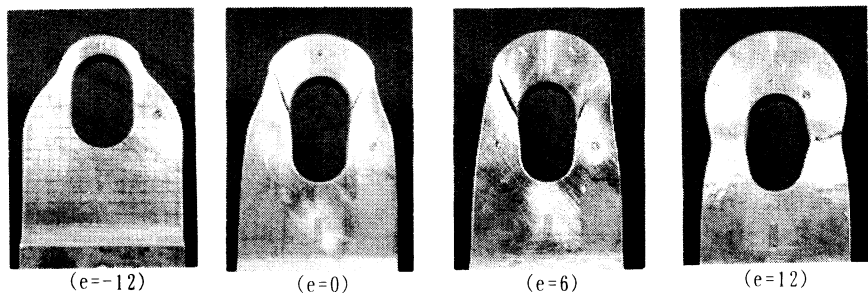


写真4 ピンブロック(平面モデル R37.5) 破壊性状

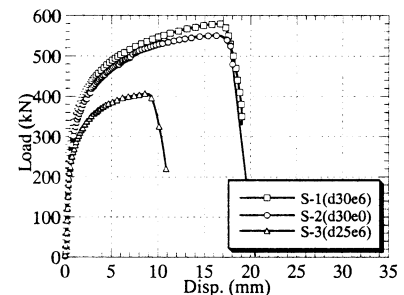


図17 立体モデル荷重 - 変形関係

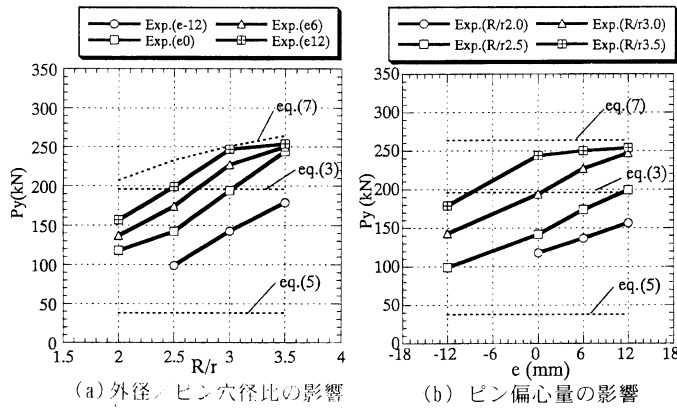


図18 ピンブロック(平面モデル) 降伏耐力

テンション構造の場合、接合部の塑性変形は初期張力の喪失や構造物の応力配分の変化を誘発するため、接合部設計は少なくとも荷重-変形関係が線形となる見かけの降伏点に対し行うべきである。そこで接合部の見かけの降伏耐力を基準に耐力評価式を検証する。

既往の耐力評価式では、ブロックの破壊性状をピン外周部の引張り・せん断破壊または支圧部の破壊に分類し、慣例的には図9のピンブロックに対しボルト・リベット用の縁端部設計式を流用し以下のような許容耐力式で検証することが多く行われている¹⁶⁾。

$$\text{引張り: } P_a = A_s \sigma_y \quad (1)$$

$$\text{せん断: } P_a = A_s \sigma_y / \sqrt{3} \quad (2)$$

$$\text{支圧: } P_a = 2rt\sigma_y \times 1.5/1.1 \quad (3)$$

一方英規標準(BS)ではピンブロックの耐力式として下式を与えている¹³⁾。

$$\text{引張り・せん断: } P_a = \min(A_s \sigma_y / 1.33, A_s \sigma_y) \quad (4)$$

また、多くの繰返し荷重を想定している土木・機械分野では、支圧部に Hertz の弾性限式を使用することが多い¹⁷⁾。

$$\text{支圧: } P_a = (\sigma_y / 0.591)^2 r_p t / (r - r_p) E \quad (5)$$

ここに、 r_p : ピン半径、 E : ヤング率である。また文献15)では、以下の式で許容耐力を与えている。

$$\text{引張り・せん断: } P_a = 0.94 \times 4rt\sigma_y [(R/r)^2 - 1] / \sqrt{[6 + 12(R/r)^2]} \quad (6)$$

$$\text{支圧: } P_a = 2.9 [\ln(R/r)]^{0.41} \times 2rt\sigma_y \sqrt{3} \quad (7)$$

実験を行った $R/r=2 \sim 3.5$ 、 $e/r=-0.8 \sim 0.8$ の範囲において各式の耐力式を比較した結果を表4に合わせた示す。各値は最大2倍以上のばらつきを持ち、現実の破壊状況に対応した評価が必要である。

そこで以下に各式における耐力値を得られた実験結果と比較し評価を試みる。まず平面モデルの降伏荷重を外径比 R/r 、偏心比 e/r により整理したものをそれぞれ図18(a)、(b)に示す。降伏荷重はおおむね R/r 、 e/r をパラメータに並んでいるが、250kNに達するあたりから頭打ちの傾向を示している。これはピンブロックの引張り・せん断破壊に対し支圧圧縮破壊が先行していることを示す。同図中に各支圧式(3)(5)(7)の評価値を点線で示す。弾性式(5)は降伏荷重よりはるかに低い値を示し、これはピンがピン孔縁に接する微小領域での降伏はかなり早い時機から生じているが、マクロな剛性変化として現われないことを示す。慣例支圧式(3)はやや安全側

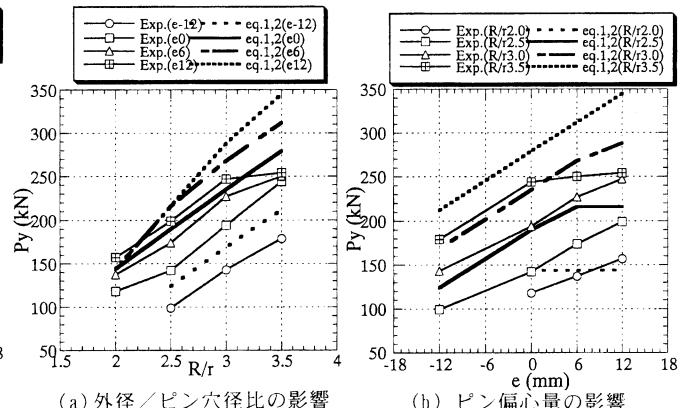


図19 慣例式(1)(2)の評価

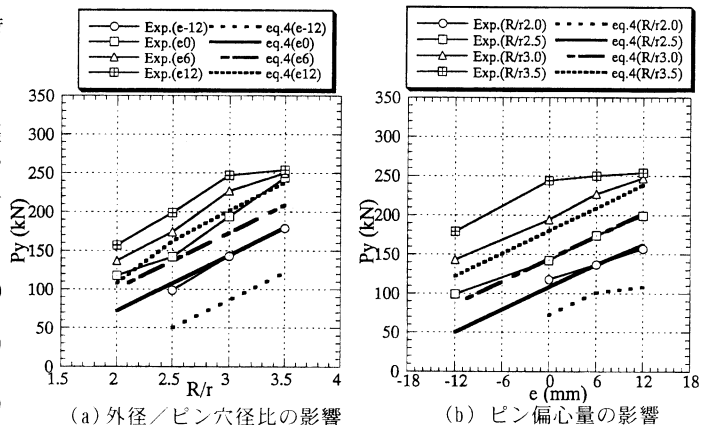


図20 BS式(4)の評価

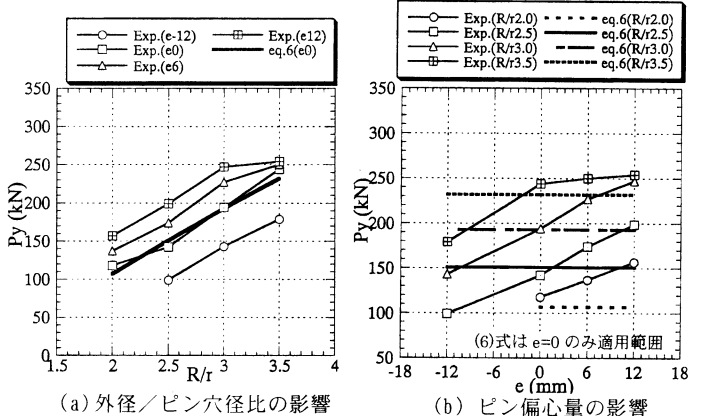


図21 文献15)式(6)の評価

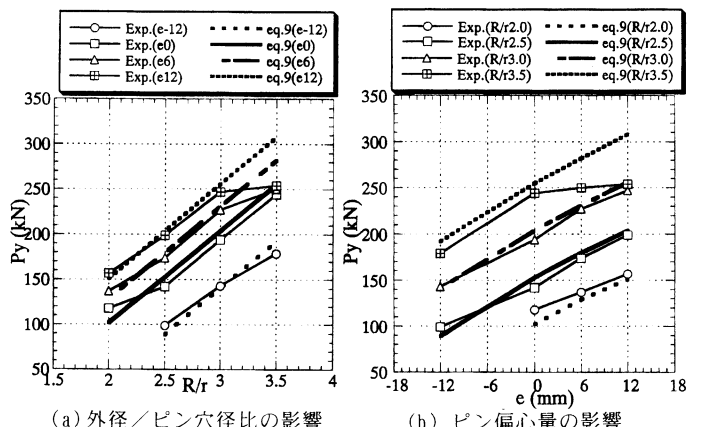


図22 提案式(9)の評価

表 8 接合部疲労試験結果

Model No.	PC 鋼棒径 (mm)	振幅 P_{max} (kN)	ピンブロック設計式	破壊回数 (回)	破壊形式
立体モデル(S-3)					
F-1	17.0	147	—	49823	鋼棒ねじ破断
F-2	23.0	270	BS式	27616	鋼棒ねじ破断・ブロック変形
F-3	29.0	430	慣例式	13940	ピン・ブロック破壊

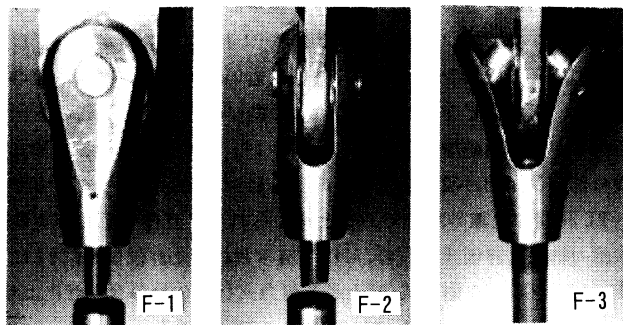


写真5 接合部疲労試験破壊性状

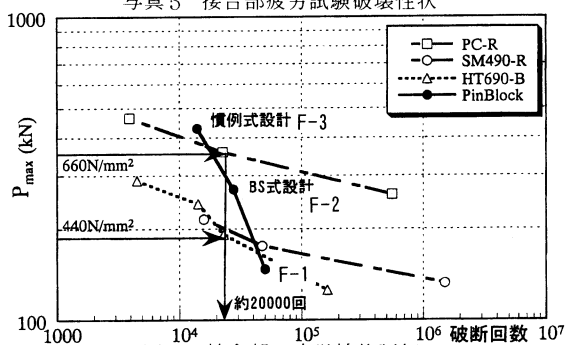


図27 接合部の疲労性能評価

- 1) ピンブロックが局部弾性限(5式)以下となるよう設計する(F-1)。
- 2) ピンブロック・ピンが見かけの降伏点程度(4, 7, 9, 11式)以下となるよう設計する(F-2)。
- 3) ピンブロックが見かけの降伏点を超えても最大耐力以下(1, 2, 3, 10式)であれば許容する(F-3)。

ピンブロックは2)においては局部的に、3)においては広範囲にわたり塑性化することになるため、これらの塑性化が疲労性能に与える影響を立体モデルを使用した疲労試験で検証する。図26に接合部疲労試験体を示す。ピンブロック試験体S-1($R/r=2.5$, $e/r=0.4$)にPC鋼棒17φ、23φ、29φを接続し、それぞれの公称断面積に対し最大耐力660MPa～0の片振り入力を行うことによって上記1)～3)の設計状況をモデル化し、それぞれF-1～3とする。なお、PC鋼棒のネジ定着部は転造ネジとする。

表8に接合部の疲労試験結果、写真5に各試験体の破壊性状を示す。1)の設計による接合部試験体F-1は約5万回で鋼棒ネジ破断した。2)の設計による試験体F-2は約2万8千回でブロック変形を伴いながら最終的には鋼棒ネジ部で破断した。3)の設計による試験体F-3は鋼棒および定着部が健全なまま1万4千回でピン・ブロックで破壊した。

これらの結果を2節の鋼棒の疲労性能と並べて図27に示す。鋼棒が許容応力度(PC鋼棒で660MPa、タイロッドで440MPa)一杯の片振り振動を受けた時の疲労性能は約2万回であり、これに耐え得る接合部を設計するためには、2)の方法で良いと考えられる。すなわち、設計荷重に対し、接合部が見かけの降伏点以下となるように設計すれば、接合部性能は鋼棒とほぼ同等以上の性能を有する。一方、それ以上の塑性変形を与えた接合部では、接合部自身の疲労性能が鋼棒を下回る危険性がある。

6. 結

鋼棒を用いたテンション構造用のピン接合部を鋼棒および定着部、ピンブロック、ピンの3要素に分解し、耐力・疲労試験を行いその性能を検証した結果、以下の知見が得られた。

- 1) 現在使用されている高張力鋼棒の終局性能および疲労性能はその定着ネジの仕様に依存する。変形能および鋼棒呼び径を規準とした見かけの疲労性能は転造ネジ、アップセット加工、機械加工の順に良く、機械加工ネジを除きK3等級程度の疲労性能を有する。アップセット後のネジ加工により、単純引張りが母材で決定される場合でも、繰返し荷重時の破断はネジ部で生じる可能性がある。
- 2) ピンブロックおよびガセットPLの最大耐力は見かけの降伏耐力に対し1.5～2.0倍あるが、最大耐力時の変形はピン径の30～60%に達し、見かけの降伏耐力に対し設計することが望ましい。これに対し慣例式(1)(2)は危険側、BS式(4)は安全側の評価を示す。
- 3) ピンブロックおよびガセットPLの見かけの降伏耐力は45°破壊式(9)および支圧式(7)によりほぼ評価できる。
- 4) ピンの耐力はせん断だけでなく曲げを考慮して評価する必要がある、見かけの降伏耐力は10)式で評価できる。
- 5) 接合部の疲労性能を鋼棒および定着部以上とするためには、鋼棒の許容応力に対し、接合部を見かけの降伏耐力以下に設計することでほぼ達成できる。一方、見かけの耐力を超える慣例式により接合部設計を行った場合、その疲労性能は鋼棒および定着部を下回る危険性がある。

謝辞

本研究・実験を行うにあたり、ご協力を戴きました名古屋工業大学学生・堀川達弥氏、神野貴之氏、今枝裕貴氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 川口徹: 空間構造の耐震・免震一経験と前進、京都大学防災研究所共同研究集会論文集, pp. 241-259, 1998
- 2) 加藤史郎、中澤祥二: 張弦梁構造の軸力による多段階軸力制御、半質量ダンパーによる張弦梁構造の制振、構造工学論文集, Vol. 41, A, pp. 123-132, 1995
- 3) 金田崇興、斎藤公男、岡田章: 補強ケーブルを持つスタジアム屋根架橋の構造特性に関する研究(その2: 地震時におけるケーブル及びばね機構の効果)、大会学術講演梗概集1999.9(中国), B-1, pp. 987-988
- 4) 竹内徹、岩田衛、大熊潔、黄一華、笠井和彦、和田章: ばね付き粘弾性体によるテンション構造の制振、日本建築学会構造系論文集, No. 527, pp. 117-124, 2000.1
- 5) 例えば、牧野文雄、小松定夫、田中義人、原田俊男: 太径ケーブルの疲労強度に関する研究、土木学会論文集No. 374/1-6, pp. 477-486, 1986.10
- 6) 竹内徹、岩田衛、和田章: 高張力ロッドを用いたテンション構造のシステム化に関する基礎研究、日本建築学会構造系論文集No. 517, pp. 85-92, 1999.3
- 7) 西田新一: 機械・構造物の破損解析と対策、金華堂, pp. 81-123, 1995.11
- 8) 鋼構造物の疲労設計指針・同解説、日本鋼構造協会編、技報堂, 1993
- 9) J.Beke: Beitrag Zur Berechnung der Spannungen in Augen Staben, Eisenbau, 1921(文献12) pp. 107にて引用)
- 10) Lehr: Spannungsverteilung in Konstruktionselementen, 1934
- 11) Sommer: Konstruktionsbucher, heft.6, 1942
- 12) (10), (11)は長野利平: 応力集中と形態強度概論、山海堂, 1980, pp. 26-27にて引用)
- 13) 日本鋼構造協会接合小委員会: 鋼構造接合資料集成-リベット接合・高力ボルト接合-, 技報堂, pp. 106-189, pp. 643-715, 1987.3
- 14) British Standards Institution: BS5950: Part 1, Structural use of Steelwork in Building, pp. 89-90, 1990
- 15) British Standards Institution: Eurocode 3: Design of Steel Structures Part 1.1, pp. 164-166, 1992
- 16) 森田時雄、木下陵二、梅津康義、今井克彦: クレビス型ピン接合部の引張・圧縮耐力に関する研究(その1-2)、大会学術講演梗概集, 1998.9(九州), pp. 981-984
- 17) Warren C. Young: Roark's Formulas for Stress & Strain, 6th ed. McGraw-Hill, pp. 651, 1989
- 18) 神野貴之、小野徹郎、竹内徹、岩田衛、堀川達弥: テンション構造用鋼棒の疲労特性、大会学術講演梗概集, 1999.9(中国), C-1, pp. 387-388
- 19) 今枝裕貴、小野徹郎、竹内徹、堀川達弥: テンション構造用ピンエンド接合部の耐力に関する実験的研究、東海支部構造系論文集, 2000.2, pp. 237-240

(2000年2月10日原稿受理, 2000年6月20日採用決定)