

構造物の繰返し応答性状・疲労性状に関する研究

(1, 油圧サーボ式構造物疲労・応用試験装置の概要)

山本 英一*, 辻岡 静雄*, 伊豆蔵 庫喜*

STUDY ON CYCLIC BEHAVIOR AND FATIGUE PROPERTIES OF STRUCTURE

Eiichi YAMAMOTO, Shizuo Tsujioka and Kouki IZUKURA

This paper tries to clarify the cyclic and/or fatigue properties of structure to cyclic loads. In the first part of this paper is a description of the 50tf electro-hydraulic fatigue machines and the property of Fukui University of Technology. The second part of this paper describes the fatigue tests of bolt joints of system trusses conducted on actual connection models and presents S-N diagram for practical applications.

1. はじめに

建築造物の限界状態には終局限界状態（構造物の構造安全性に関連する限界状態）と使用限界状態（構造物の使用性、居住性に関連する限界状態）がある。これに関連して多くの研究がなされ、今日の設計規程が導かれている。しかし、建築構造物の大型化・複合化に伴い、高性能材料（例えば、超高強度コンクリート、耐火鋼材、TMCP鋼）、高機能部材（例えば、ハイブリッド部材、鋼管コンクリート部材）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の破壊形式が生じる可能性が高くなって来ている。さらに、異種構造からなる混合構造（例えば、上部構造が鉄骨造、下部構造がRC構造の構造物）ではそれらの接点の施工や力学性状が構造物の応答性状に大きく影響し、このような接点では材料特性の適合性が接合部剛性や耐力に大きく影響することが知られている。このような種々の大スパン建築や超高層建築が乱立する現状から、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の要求が従来に増して強くなっている[1]。これは限界状態の一つである繰返し、疲労特性が必ずしも明らかになっていないことによる。これらを総合的に検討するためには、種々の環境下や多軸応力下での実験が必要である。また、大スパン建築では鉛直荷重が大きな支配要素であるため梁部材としての外力下での力学性状を検討することも必要である。

本研究では、以上の観点から、地震力や風圧力などの動的な外力を受ける大スパン建築物や大規模建築物を対象として、それらの応答性状や疲労特性を解明し、安全工学、信頼性工学、構造工学の各観点から総合的に研究する。とくに、本報は、福井工業大学大学院工学研

*建設工学科 建築学専攻

究科に設置された油圧サーボ式構造物疲労・応用試験装置の概要を述べ、適用範囲を示すと共に、構造物などの疲労実験の一例を報告する。

2. 油圧サーボ式構造物疲労・応用試験装置の概要

この度、材料および構造物の応答特性・疲労特性を研究するために導入された構造物疲労試験装置は、荷重の発生機構がサーボラム式の引張圧縮疲労試験機で、電気油圧サーボ弁を利用した脈動油圧によって加振装置のピストン型アクチュエータを振動させて試験体に動荷重を負荷するものである。荷重やラムの変位の制御は荷重検出器、変位検出器や試験体に取り付けた伸び検出器の信号と、あらかじめ設定した各種の発信器（正弦波、三角波、周波数、振幅、繰返し数、あるいはそれらのプログラム設定など）の信号とを比較し、その偏差をもってサーボバルブの制御を電氣的に速やかに行うものである。また、適切なアタッチメントを用いれば曲げや組み合わせ応力の疲労試験も行うことが出来る。

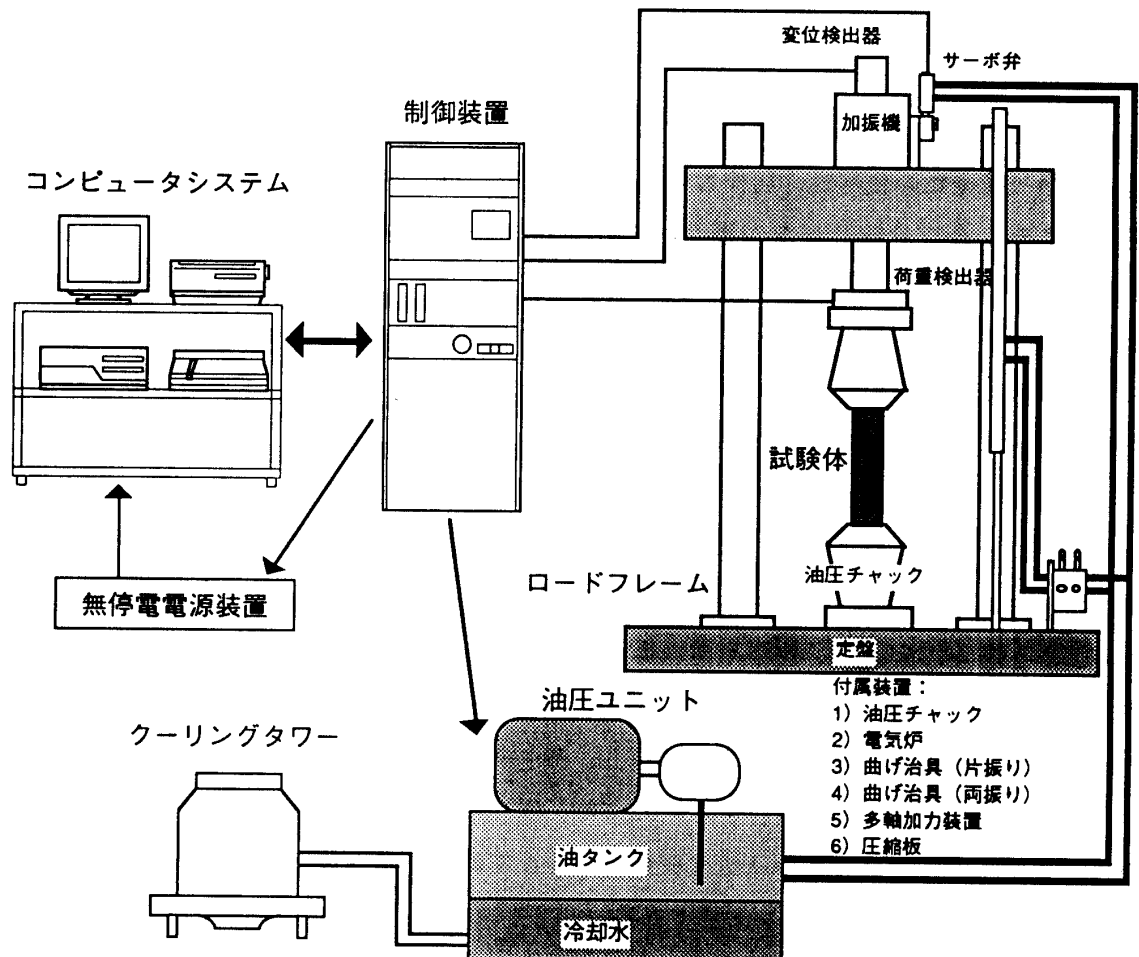


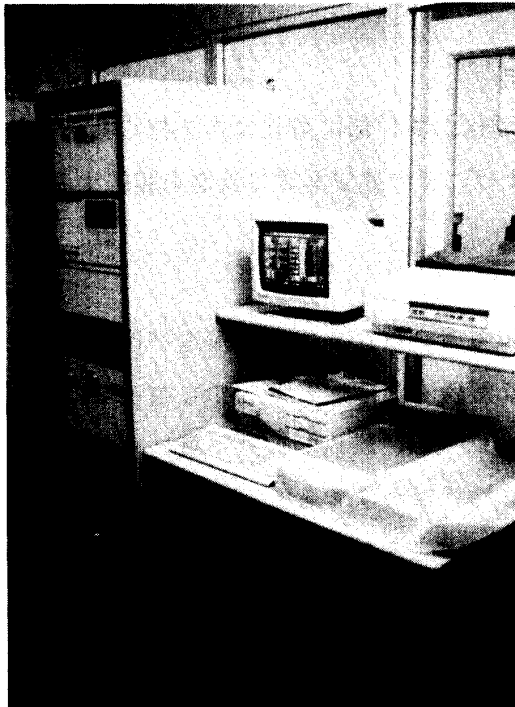
図1 システムブロック図

本試験装置の基本システムは試験機本体（加振装置）、デジタルサーボコントローラ（制御装置）、油圧ユニットおよびコンピュータシステムで構成され、その全容を図1に、加振装置の外観を写真1示す。また、治具および応用試験装置として油圧チャック、3(4)点片振り曲げ治具、3点両振り曲げ治具、多軸加力装置および高温試験装置（電気炉）も整備されている。ここに、多軸加力装置は部材に動的荷重と同時に静的一定圧縮荷重（容量30ton）を加力する装置である。これらの装置の諸性能を表1に掲げておく。

本装置を使用すれば、種々の環境下（地震力や風圧力などの動的な外力）での高強度・高性能鉄筋コンクリート構造、高張力鋼材などからなる部材や接合部および異種構造システムの接点の繰返し応答性状や疲労性状を検討することができ、大スパン建築物や大型構造物の設計指針あるいは破壊予測に関する基礎資料を得ることが可能である。

建築の構造分野での可能な実験は次の通りである。

- ・ 金属素材、コンクリートの疲労試験、超高力ボルトなどの疲労試験、高力ボルト接合部や溶接接合部の疲労試験、異種構造接合部の疲労試験。
- ・ トラス梁などの繰返し曲げ実験、高強度コンクリート部材の繰返し曲げ実験。
- ・ 火災などの熱履歴を受ける接合部の繰返し加力実験。
- ・ 鋼管分岐継手の疲労実験、立体トラス球継手の疲労実験、鉄骨柱脚の繰返し加力実験、高張力鋼材を用いた柱の繰返し加力実験



(a) コンピュータシステムと制御装置



(b) 試験機本体（多軸加力装置の使用例）

写真1 試験装置

表1 試験機性能

総合性能	動的最大荷重		±500kN
	静的最大荷重		±550kN
	最大変位		±150mm
	加振特性	最大速度	12.5cm/sec
		周波数範囲	0.01~20 Hz
試験機本体	構造		4本柱上アクチュエータ式
	支柱有効間隔		1000 x 500 mm
	クロスヘッド昇降、締結		油圧式
	標準テストピース間隔		750~1950mm
	寸法	(幅 x 奥行 x 高さ)	1500 x 5200 x 3835
油圧源	定格圧力		210kg/cm ²
	ポンプ吐出量		163.4 l/min
	電動機		37 x 2 KW
	オイルタンク容量		600 l
	冷却方法		水冷、200 l
	寸法	(幅 x 奥行 x 高さ)	1700 x 2020 x 1700
油圧チャック	丸棒		φ22~50
	平板	板厚	4~50 mm
		板幅	100 mm
3点曲げ(両振り)	容量		±300kN
	支持スパン		900~3000 mm
	板幅		最大300 mm
3(4)点曲げ(片振り)	容量		±500kN
	載荷スパン		250~1000 mm
	支持スパン		400~3000 mm
	板幅		最大400 mm
多軸加力装置	容量		±500kN
高温試験装置 (水冷ジャケット付丸形電気炉)	加熱寸法		φ180 x 300 H
	炉内温度		Max.1000℃
圧縮板	容量		30 tonf

3. 構造物の疲労特性に関する実験

ここでは、構造物や接合部の疲労の例として、形状上ネジ部に切り欠きを持ち疲労に敏感なボルト[2]で構成される立体トラス接合部を取り上げ、その疲労実験の概要を報告する。

3-1. 立体トラス接合部

立体トラスでは球状接合部中核に1本ボルトによる接合機構を用いた構造が適切とされるが、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と言っても過言ではない。対象とするシステムトラス[3]では、その適用範囲が拡大し、繰返し荷重や風による振動を受ける部分に用いられている。この場合、静的繰返し性状ばかりでなく疲労特性に対しても配慮が必要である[4]。一般に、接合用特殊高力ボルトに大きな軸力が導入できれば、引張型接合としての力学特性を利用して疲労設計も可能であるが、施工上の問題も多々残されている。また、太径ボルトとしての疲労特性も十分に解明されていない。よって、呼び径の大きい範囲まで含めてこのような特殊高力ボルトの疲労特性を実験的に確認することが必要である。実験では、高い締付け力の導入が可能な立体トラス接合部を対象とした(図2)。

引張接合ではボルトを締付けない場合、ボルトは外力をそのまま負担することになる。一方、ボルトを締付けた場合、ボルトに導入した張力と同等の力が接合材間に材間圧縮力として作用し、接合部に作用する引張外力のほとんどが材間圧縮力と釣り合いを保つので、ボルトに追加される引張内力は小さくなる（図3）。一般に、ボルトに追加される引張内力と接合部に作用する引張外力との比をボルト内力係数 ϕ といい[5]、このトラス接合部では $\phi = K_b / (K_b + K_c)$ で表される。ここに、 K_b 、 K_c は各々ボルト、スリーブのバネ定数である。

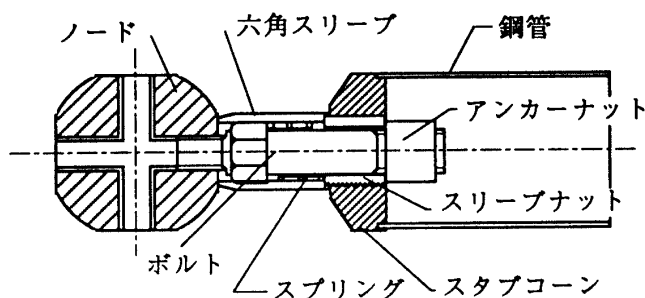


図2 立体トラス接合部（断面図）

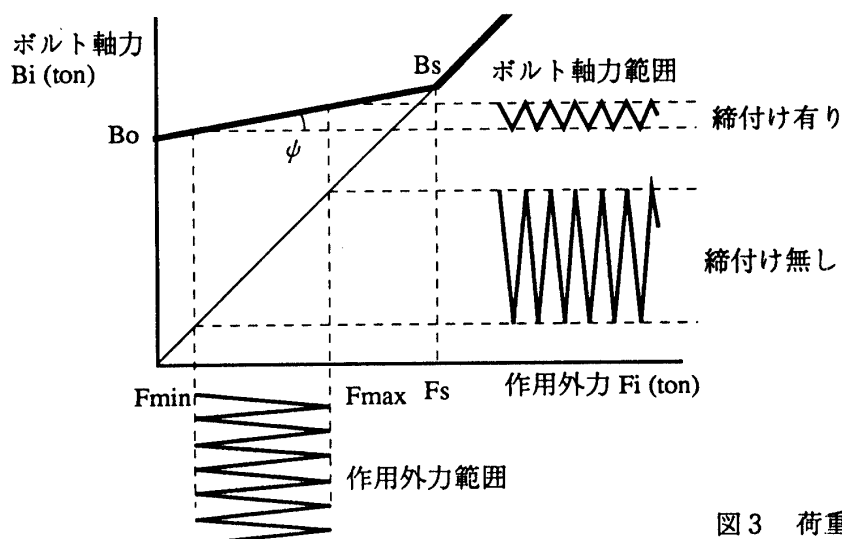


図3 荷重-ボルト軸力関係

表2 材料の機械的性質

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 M42-M56	SCM435	≥100	≥90	≥15	27-33
		≥95	≥85	≥15	27-33
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	-
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	-

3-2. 実験方法

試験体はノード、ボルト、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モデルで、使用材料の機械的性質の規格値を表2に示す。実験変数はボルト呼び径(M30x3とM36x3)、応力比(下限荷重と上限荷重との比=0、7/10)である。なお、使用ボルトの内力係数は約0.3程度である。

今回の実験で対象としたのは引張繰返し荷重であり、図4に示すような載荷治具を用いて立体トラス接合部に一定振幅繰返し荷重を載荷した(写真2)。本実験では、締付け力を導入しなかったが、締付け力を導入した場合と同様のボルト軸力変動幅を再現するため、内力係数を考慮して応力比0.7の載荷も行った。なお、載荷周波数は3-5Hzの範囲である。

3-3. 実験結果と考察

表3に破断回数Nと破断位置を示す。また、図5に両対数S-N図を示す。ここに、応力範囲Sはボルトの有効断面積を用いて求めた最大応力度と最小応力度の差である。

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第1ねじ部で生じた(写真3)。相対的に後者の破壊が多く観察された。

今回の実験において、ボルトの寸法効果や応力比による疲労強度の差異はとくに認められない。図5中の直線は最小2乗法によるS-N線図で、数式表示すれば、

$$\log S = -0.3412 \cdot \log N + 1.922 \quad (1)$$

となり、高力ボルトを用いて中ボルト接合とした場合の結果など[4,6]に比べ異なる傾向を示す。

ところで、疲労限を200万回の応力の繰返しに耐える最大応力範囲とすれば、この式より、疲労限は 0.592 t/cm^2 となる。これはボルトの長期許容応力度(M30, M36に対し 3.97 t/cm^2)の約15%とかなり小さい。

写真2 載荷状況

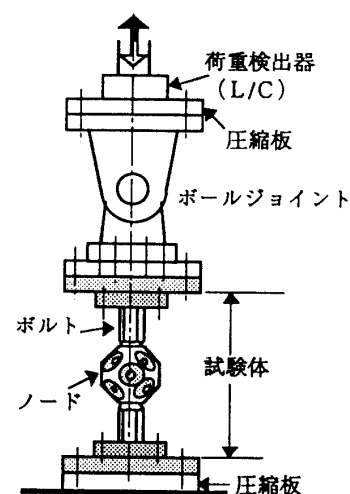


図4 実験概観

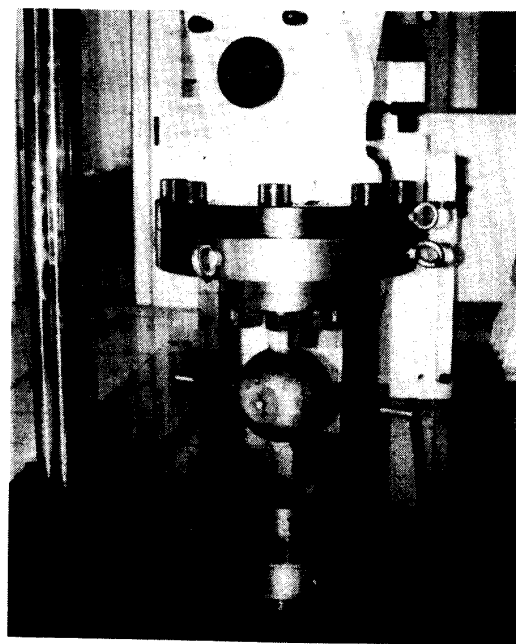


表3 疲労実験結果

記号	ボルト	破壊回数 (cycle)	応力範囲		平均応力		振幅 (ton)	破壊部位
			(ton)	(t/cm ²)	(ton)	(t/cm ²)		
1	M300518	21180	17.5	3.017	9.3	1.595	8.8	anchor
2	M300512	65049	11.5	1.983	6.3	1.078	5.8	node
3	M300506	278962	5.5	0.948	3.3	0.560	2.8	anchor
4	M300505	2000000	4.5	0.776	2.8	0.474	2.3	-
5	M3005055	821626	5.0	0.862	3.0	0.517	2.5	node
6	M301420	678102	6.0	1.034	17.0	2.931	3.0	node
7	M301233	86572	10.0	1.724	28.0	4.828	5.0	anchor
8	M301826	175680	7.8	1.345	22.1	3.810	3.9	anchor
9	M301623	268753	6.9	1.190	19.6	3.371	3.5	anchor
10	M360525	27690	24.5	2.832	12.8	2.198	12.3	anchor
11	M360517	66929	16.5	1.908	8.8	1.509	8.3	node
12	M360509	594406	8.5	0.983	4.8	0.819	4.3	node
13	M360508	663423	7.5	0.867	4.3	0.733	3.8	anchor
14	M360507	1481011	6.5	0.751	3.8	0.647	3.3	anchor
15	M3605105	304605	10.0	1.156	5.5	0.948	5.0	anchor
16	M3605065	717114	6.0	0.694	3.5	0.603	3.0	anchor
16'	M3605065	2000000	6.0	0.694	3.5	0.603	3.0	-
17	M362130	235744	9.0	1.040	25.5	4.397	4.5	anchor
18	M362434	193223	10.2	1.179	28.9	4.983	5.1	anchor
19	M362840	126685	12.0	1.387	34.0	5.862	6.0	anchor

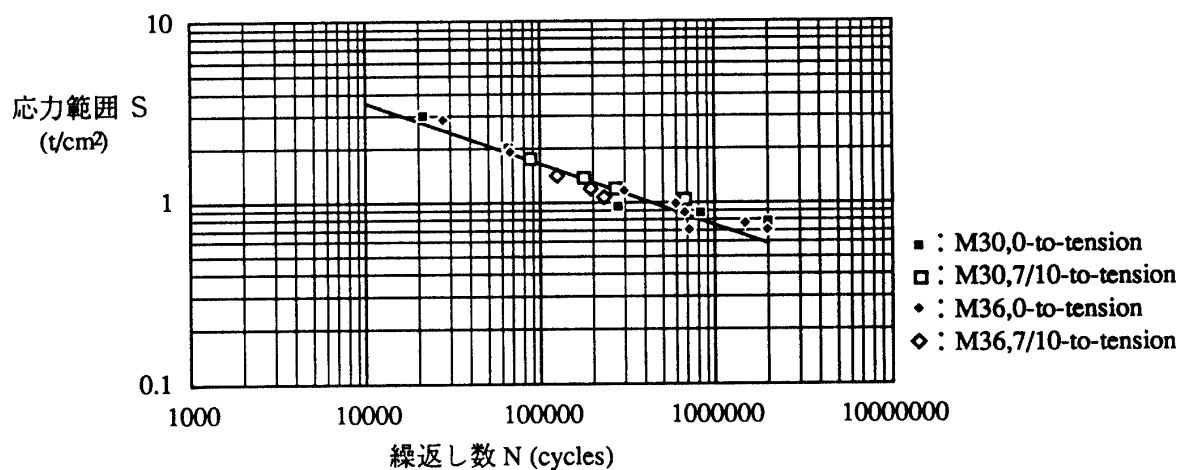


図5 両対数S-N図

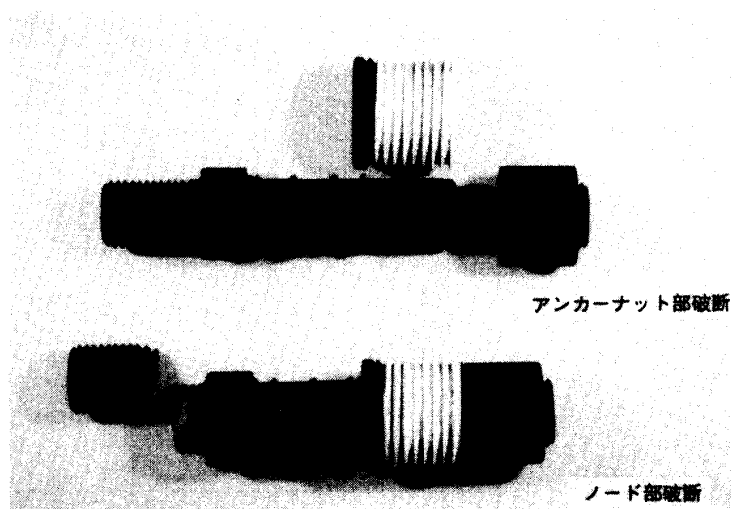


写真3 ボルトの疲労破壊例
(M36ボルト)

4. 纏め

本研究では、材料および構造物の応答特性・疲労特性を研究するための構造物疲労試験装置の概要を述べると共に、構造物などの疲労実験の一例として太径ボルトを用いた立体トラス接合部の疲労実験の一部を報告した。

今回の実験より、接合部の疲労破壊は特殊高力ボルトの疲労破壊で生じること、ボルトの呼び径および応力比によって疲労特性に大きな差異はないことなどを得ると共に、疲労設計に有益なS-N線図も得ることが出来た。

ところで、本実験は進行中であることを付け加えておく。また、繰返し荷重を受けたコンクリートの材料特性についての実験も行われたが、その結果については次の機会に報告する予定である。

なお、本装置の導入に当たり、平成3年度私立学校施設整備費の補助を受けたが、金井学園、福井工業大学の方々に多大なご支援を賜った。ここに、記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 大熊武司、中込忠男、丸川比佐夫：強風による鋼構造骨組の累積疲労損傷（その1、その2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.75-78、1988.10.
- 2) 日本建築学会：高力ボルト接合設計施工指針、1983.7
- 3) 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.
- 4) 岩田 衛、和田 章、白井貴志：太径ボルトを用いたシステムトラスの疲労実験、日本建築学会構造系論文報告集、第422号、pp.123-134、1991.4.
- 5) 山本晃：ねじ締結の理論と計算、養賢堂、1970.
- 6) 脇山広三、平井敬二：高力ボルトの疲労に関する研究、日本建築学会論文報告集、第288号、pp.21-27、1980.2.

(平成4年12月11日受理)