Architectural Institute of Japan

日本建築学会構造系論文集　第500号，123-130，1997年10月
J. Struct. Constr. Eng., AIJ, No. 500, 123-130, Oct., 1997

システムトラスにおける設計・施工情報の統計的分析

ANALYSIS OF DESIGN AND CONSTRUCTION INFORMATION FOR SYSTEM TRUSS

藤田正則*，岩田　衛**，和田　章***
Masanori FUJITA, Mamoru IWATA and Akira WADA

The System Truss Design Standards which offer a selection of standardized component are utilized for the design of a system truss. However, individual judgement is also required in the economic and construction aspects. For example, the economic aspects, structural properties and the construction method become even clearer by a quantitative comparative study of the performance data based on actual projects of a system truss. This paper statistically analyzes the design and construction information which stipulates the capacity of a system truss, and provides basic data in order to appropriately evaluate the design conditions and to determine the rationality of construction of a system truss.

Keywords : *system truss, information, design , construction, component*
システムトラス，情報　，設計　，　施工　，　部品

1．はじめに

球形の節点に鋼管部材を接合するシステムトラスは、スポーツ施設やハンガー等の大規模建築物に使用され、既に多くの実績を残している。通常、意匠性のある屋根を構成する構造体として使用されることが多い。システムトラスが普及するに至った理由は、主に、システムトラスが意匠性に優れていること、現場において熟練労働者を必要としないこと、現場溶接や多本数の高力ボルトを用いた接合法に比較して１本ボルトのため作業性が良いこと、現場での組み立ての際の品質管理及び製造管理が容易であることによるものである[1) 2) 3)]。システムトラスの構造設計は、各種の基・規準等に照らし合わせて、このシステムのために作った設計規準[4)]を用いて行われる。しかし、この設計規準はシステムトラスの部品選択を規定したものであり、実際の構造物の設計を進めるためには、経済性や施工性の面において設計者の判断や決断が個々に要求される。たとえば、部分円筒の形状をした屋根構造の設計を行う場合、曲率半径の大小は曲げ応力と膜応力の発生割合を支配するので、スパンが大きくなるにつれて曲率半径を小さくし、膜応力状態を強めることにより合理的な設計が可能となる[5) 6) 7) 8)]。このような力学的特性と経済性の関連は、部材サイズや応力性状等を実績データにより定量的に比較検討することでよりいっそう明らかになる。また、施工法の種類によって境界条件、応力性状が異なる場合もあり、実際の施工例を分析することで、各種の施工法の持つ特徴、合理性の違いを明らかにすることができる。

本論では、システムトラスの実施例において構造物の性能を規定する設計・加工・施工情報[9)]のうち、設計・施工情報の統計的分析を行い、システムトラスに関する設計条件の適切な評価や合理的な構造物の性能を把握するための基礎データを提供するものである。なお、これらのデータは一般には公開されることがないため、著者らが手がけたものにとどまっているが、さらに広くデータを蓄積することができれば、システムトラスに限らずスペースフレームの設計・研究に役立つものと考える。

2．設計・施工情報の概要

2．1　設計・施工情報

ここで取り上げるシステムトラスとは、図１に示すような、鋼管部材（弦材及び斜材）、接合部中核（ノード）、接合機構（1本ボルト・ワッシャ等）からなる構成部品を立体的に組み、任意の屋根形状を形成するものである。このシステムトラスの合理的な構造設計及び施工を行うためには下記に示す最適な条件を把握する必要がある。

１）グリッド長さ及びデプス（デプスとは上弦材と下弦材の芯心間距

* 新日本製鐵株式会社建築事業部　工修
** 新日本製鐵株式会社建築事業部　工博
*** 東京工業大学建築物理研究センター　教授・工博
Nippon Steel Corporation, M. Eng.
Nippon Steel Corporation, Dr. Eng.
Prof., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

NII-Electronic Library Service

離をさす）の設定（以下、グリッド長さ及びデプスをグリッド形状という）
2）境界条件
3）部品
4）施工法
5）塗装仕様

ここでは、上記の条件を規定する情報について取り上げる。

2．2　共通項目

システムトラスは主として体育館、プール、アイススケート場等のスポーツ施設や広場屋根、サンバイザー、アトリウム等のプラザや、また、博覧会、展示場、ホール等の多目的ホールに使用されている。過去15年間における実施例（200件）の中で各種用途の中から、図2に示すような4種類の屋根形状について112件のデータ分析（温暖地域98件、多雪地域14件）を行った。これらのデータを分析するにあたり、下記の点を共通項目とする。

1）屋根形状には、平版、部分円筒、寄棟、曲面版、切妻、シェル、方形、任意曲面等の様々あるが、ここでは、これらの形状のうち、力学的特性の異なる4種類の形状（平版43件、部分円筒31件、寄棟16件、曲面版22件の実施例の計112件）を選定する。ここで、曲面版とは、スパン・ライズ比2.5以上の2方向曲率を有する形状のうち、ドームや水平投影で矩形や楕円等も含む。
2）グリッド形状は4角錐グリッド[10]からなる複層システムトラスを対象とする。4角錐グリッドにおける縦と横のグリッド長さは異なる場合が多いので、桁行方向の最大部材となるグリッド長さを代表とする。3角錐グリッドは、多雪地域や平面形状が多角形の場合等に限られるため、ここでは対象とない。
3）材質は鋼材を対象とする。実施例において、ステンレス、アルミニウム等の材質のものはごく稀である。
4）屋根面積は500 m²から7000 m²の範囲を対象とする。
500 m²より小さい規模では、境界条件が多様であること、また、7000 m²より大きい規模では、システムトラスの標準部品を超えることが多いので、ここでは対象としない。
5）荷重は鋼管部材に曲げモーメント及びせん断力の二次応力が生じないように節点に作用するものとする。また、クレーンや局部的に大きな荷重等の特殊条件を除いている。
6）境界条件は2辺支持、4辺支持、4点支持を対象とする（図3）。
7）上記の条件を満たすシステムトラスの最小スパンは16.0m、最大スパンは87.1m、最高高さは7.0～38.2mである。

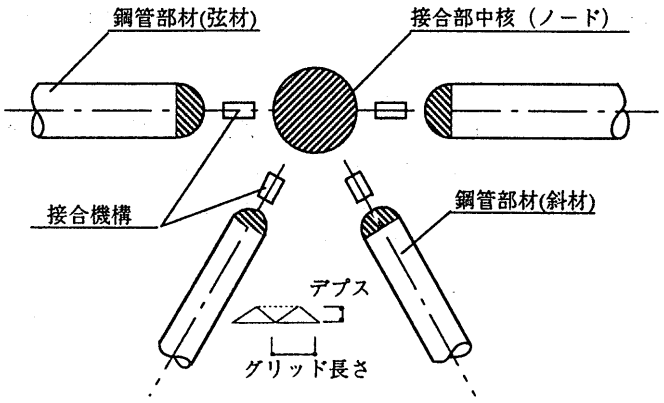


図1　システムトラス接合部の基本構成

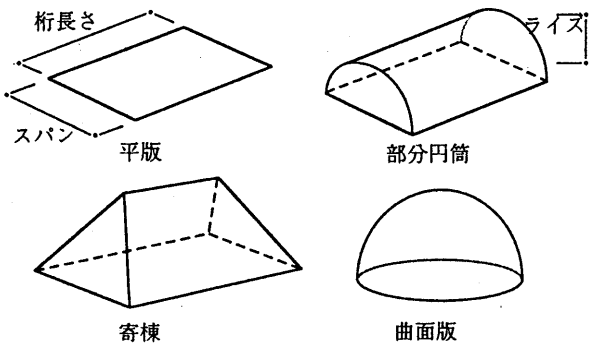


図2　屋根形状

3．設計・施工情報の特性

2節で示したシステムトラスの実施例における設計・施工情報の概要に基づき、グリッド形状、境界条件、部品、施工法、塗装仕様の各情報について代表的なデータを示し、その特性を述べる（表1 a,b,c,d）。

3．1　グリッド形状

システムトラスのグリッド形状は屋根形状を構成する基本ユニットであり、システムトラス全体の剛性や各部品の強度の他、意匠上の制約や経済性を考慮して決定する必要がある。以下、システムトラスのグリッド形状を規定する情報において、スパン・デプス比（α＝L／d）、デプス・グリッド長さ比（β＝d／g）、スパン・ライズ比（γ＝L／f）を設定する。なお、平版のライズは水勾配（1／100～5／100）程度であるため、γの項は－とした。実施例の屋根面積は、

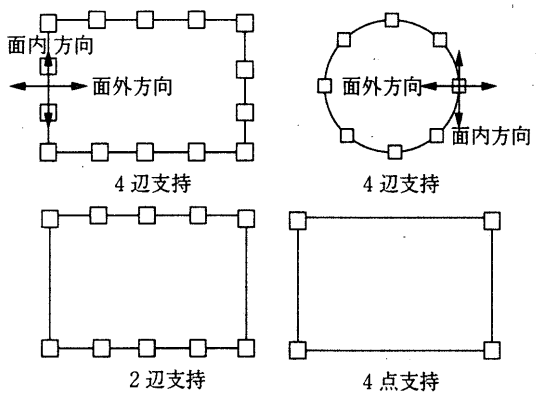


図3　境界情報

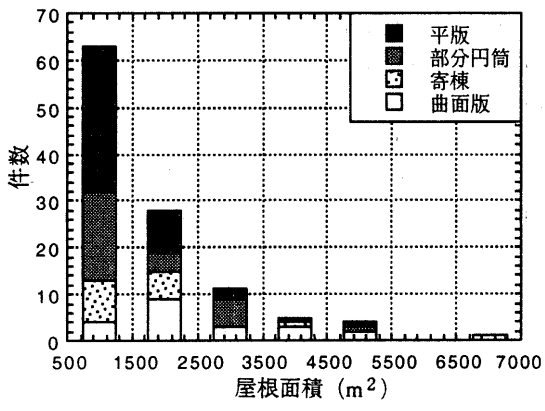


図4　屋根面積の分布

NII-Electronic Library Service

表1a　平版の実施例

平板	ｽﾊﾟﾝL	桁長さB	ﾃﾞﾌﾟｽd	ﾗｲｽﾞf	ｸﾞﾘｯﾄﾞ長さg	L/d	B/L	d/g	L/f	最大部材径	λmax弦材	λmax斜材	境界	塗装	施工	建設地	用途	鉛直荷重	屋根面積	最高高さh	備考
						*1	*2	*3	*4				*5	*6	*7	*8	*9	*10			
データ	m	m	m	m	m					mm								kg/m²	m²	m	
A01	34.5	21.5	1.5	0.0	3.0	23.0	0.62	0.50	-	114	78	86	2	1	1	3	1	95	742	14.5	
A02	24.0	37.2	2.4	0.0	3.0	10.0	1.55	0.80	-	165	54	105	2	1	1	3	1	390	892	11.7	多雪地域
A03	30.6	33.2	1.5	0.0	2.8	20.4	1.08	0.55	-	139	57	62	2	1	1	1	1	113	1218	11.7	
A04	27.4	36.3	1.6	0.0	2.6	17.1	1.32	0.62	-	114	68	62	2	1	1	3	1	95	995	15.4	
A05	28.8	37.8	1.5	0.0	2.8	19.2	1.31	0.54	-	139	59	71	2	1	1	1	1	120	1087	16.1	
A06	28.8	41.2	2.5	0.0	5.3	11.5	1.43	0.47	-	190	81	94	2	3	1	2	1	120	1187	18.0	
A07	37.1	33.6	1.8	0.0	3.2	20.6	0.91	0.56	-	165	57	83	2	1	1	3	1	80	1247	14.0	
A08	35.2	35.2	2.0	0.0	3.0	17.6	1.00	0.67	-	165	53	75	2	3	1	2	1	190	1243	16.3	
A09	30.6	36.0	2.0	0.0	3.0	15.3	1.18	0.67	-	216	41	61	2	3	1	2	1	400	1310	17.0	多雪地域
A10	36.6	37.3	2.5	0.0	3.7	14.6	1.02	0.67	-	216	50	64	1	1	3	3	1	134	1366	18.0	施工時ローラー支持
A11	33.4	47.6	2.0	0.0	3.4	16.7	1.43	0.59	-	114	87	90	2	1	1	1	1	80	1591	17.4	
A12	34.3	47.3	1.5	0.0	1.8	22.9	1.38	0.85	-	114	46	64	2	1	1	1	1	130	1626	14.3	
A13	38.2	46.4	2.2	0.0	4.0	17.4	1.21	0.55	-	165	71	75	2	1	1	3	1	95	1773	15.5	
A14	40.0	40.0	2.2	0.0	3.3	18.2	1.00	0.66	-	267	46	58	1	1	1	3	3	305	1878	12.0	多雪地域
A15	39.0	50.0	2.1	0.0	3.0	18.6	1.28	0.70	-	190	46	98	2	1	3	1	1	95	1950	20.0	施工時ローラー支持
A16	44.6	45.1	2.5	0.0	3.0	17.8	1.01	0.83	-	216	40	69	2	1	1	1	1	210	2017	22.2	
A17	27.6	35.6	2.1	0.0	3.5	13.1	1.29	0.61	-	139	72	93	2	1	1	1	1	95	986	17.2	
A18	26.4	33.6	2.4	0.0	3.8	11.0	1.27	0.64	-	165	68	92	2	1	1	3	1	370	887	13.5	多雪地域
A19	25.6	32.0	2.0	0.0	3.2	12.8	1.25	0.63	-	165	57	54	2	1	1	3	1	310	819	16.2	多雪地域
A20	24.4	39.7	2.0	0.0	4.0	12.2	1.63	0.50	-	114	104	100	2	1	1	3	1	95	2183	8.8	
A21	34.0	36.1	2.0	0.0	4.0	17.0	1.06	0.50	-	139	83	115	2	1	1	1	1	120	1226	9.0	
A22	45.0	56.0	3.0	0.0	4.5	15.0	1.24	0.67	-	165	96	127	2	2	1	1	1	90	2520	17.0	
A23	23.7	47.8	1.7	0.0	2.0	13.9	2.02	0.85	-	101	57	85	2	2	1	1	1	120	1150	11.4	
A24	39.0	55.0	2.0	0.0	3.1	19.5	1.41	0.65	-	165	55	62	2	1	1	1	1	180	2141	17.8	
A25	22.0	35.1	2.0	0.0	2.9	11.0	1.60	0.68	-	139	63	74	2	1	1	1	1	175	774	11.9	
A26	31.0	43.4	1.9	0.0	3.1	16.4	1.40	0.61	-	114	82	84	2	2	4	2	3	125	1345	11.6	
A27	28.5	38.1	2.0	0.0	4.1	14.3	1.34	0.49	-	139	87	117	2	1	1	3	1	120	1085	12.0	
A28	22.5	19.7	1.5	0.0	2.4	15.0	0.88	0.62	-	165	43	40	1	2	1	1	2	120	574	12.5	
A29	26.6	42.9	1.6	0.0	2.7	16.6	1.61	0.60	-	139	55	81	2	1	2	1	1	110	1326	11.1	
A30	27.0	27.0	1.5	0.0	3.0	18.0	1.00	0.50	-	190	46	40	3	2	1	2	3	120	729	7.0	
A31	32.0	37.5	2.0	0.0	3.7	16.0	1.17	0.54	-	190	56	58	2	1	1	1	1	115	1200	12.6	
A32	24.4	30.5	1.2	0.0	2.0	21.2	1.25	0.58	-	101	58	70	2	1	1	3	1	120	699	10.3	
A33	21.0	28.5	1.8	0.0	3.0	11.7	1.36	0.60	-	165	53	72	2	2	1	1	2	140	698	15.4	
A34	50.0	50.0	2.6	0.0	3.5	19.2	1.00	0.74	-	216	47	55	2	2	3	2	3	140	2500	33.1	施工時ローラー支持
A35	26.0	32.1	2.2	0.0	4.8	11.8	1.23	0.46	-	216	64	84	2	1	3	1	1	250	835	16.5	施工時ローラー支持
A36	16.0	48.0	1.4	0.0	3.2	11.9	3.00	0.42	-	165	56	55	3	3	4	1	3	233	768	7.0	
A37	60.0	84.0	3.5	0.0	3.0	17.1	1.40	1.17	-	318	27	72	2	1	2	1	3	130	5318	16.1	施工時ローラー支持
A38	25.6	37.0	1.4	0.0	2.6	18.3	1.45	0.54	-	139	54	76	2	1	1	3	1	180	947	11.1	
A39	20.5	29.5	1.9	0.0	3.0	11.1	1.44	0.63	-	165	52	58	2	1	1	1	1	205	606	11.9	多雪地域
A40	36.0	45.5	2.2	0.0	2.8	16.1	1.26	0.80	-	216	38	53	2	1	1	1	1	250	1706	13.0	多雪地域
A41	24.8	30.0	1.2	0.0	2.0	20.7	1.21	0.60	-	165	35	61	2	1	1	1	1	115	744	8.8	
A42	20.0	37.8	1.0	0.0	2.1	20.0	1.89	0.48	-	101	61	59	2	1	1	1	1	85	756	15.5	
A43	26.0	32.5	1.4	0.0	2.8	18.6	1.25	0.50	-	165	49	94	2	1	1	3	1	140	857	11.9	

表1b　部分円筒の実施例

部分円筒	ｽﾊﾟﾝL	桁長さB	ﾃﾞﾌﾟｽd	ﾗｲｽﾞf	ｸﾞﾘｯﾄﾞ長さg	L/d	B/L	d/g	L/f	最大部材径	λmax弦材	λmax斜材	境界	塗装	施工	建設地	用途	鉛直荷重	屋根面積	最高高さh	備考
						*1	*2	*3	*4				*5	*6	*7	*8	*9	*10			
データ	m	m	m	m	m					mm								kg/m²	m²	m	
B01	23.0	32.0	2.0	11.5	4.6	11.5	1.39	0.44	2.0	165	80	97	1	1	1	1	1	115	1156	13.0	
B02	28.0	34.0	1.2	2.9	2.2	23.3	1.21	0.54	9.7	190	34	57	2	1	1	1	1	110	979	8.2	
B03	55.8	68.2	3.5	5.0	3.6	15.9	1.22	0.97	11.2	267	39	91	2	1	1	1	1	250	4311	21.0	
B04	28.0	42.0	1.6	11.0	3.5	17.5	1.50	0.46	2.5	216	47	76	1	1	1	1	3	175	1779	27.5	
B05	34.0	34.0	1.8	4.3	3.0	18.9	1.00	0.60	7.9	114	77	72	2	1	1	3	1	110	1482	14.8	
B06	39.4	68.6	2.2	5.5	3.2	17.9	1.74	0.69	7.2	165	56	91	1	1	2	1	2	150	2944	18.5	
B07	22.9	31.0	1.5	3.8	3.1	15.3	1.35	0.48	6.0	114	81	69	1	1	1	3	1	100	762	14.1	
B08	21.3	27.3	1.4	1.5	3.1	15.2	1.28	0.45	14.2	114	80	86	1	1	1	3	1	85	591	11.0	
B09	26.8	44.0	1.3	3.4	2.5	20.6	1.64	0.52	7.9	139	52	72	2	1	1	1	1	113	1245	22.5	
B10	50.2	66.0	2.7	7.8	4.4	18.6	1.31	0.61	6.4	216	59	73	1	1	2	3	1	205	3413	36.0	施工時ローラー支持
B11	27.7	41.2	1.5	2.0	2.6	18.5	1.49	0.59	13.9	114	67	78	2	1	1	3	1	125	1304	11.2	
B12	20.3	25.5	1.4	4.8	3.2	14.5	1.26	0.44	4.2	139	67	77	1	1	1	3	1	140	585	11.9	
B13	27.5	31.4	1.5	5.2	2.3	18.3	1.14	0.65	5.3	139	48	85	1	1	2	1	1	115	940	14.7	
B14	30.0	45.5	1.6	2.3	2.5	18.8	1.52	0.64	13.0	165	44	50	2	1	1	1	1	130	1367	19.3	
B15	26.0	34.0	1.5	3.0	2.3	17.3	1.31	0.65	8.7	165	41	64	1	1	1	1	1	130	876	12.9	
B16	28.0	33.0	1.8	2.2	2.8	15.6	1.18	0.64	12.7	190	43	69	2	1	1	3	1	205	1060	13.8	多雪地域
B17	28.2	64.8	1.8	5.1	3.0	15.7	2.30	0.60	5.5	216	41	49	1	1	1	1	3	84	1830	27.7	
B18	44.4	75.0	2.4	1.5	4.0	18.5	1.69	0.60	29.6	267	43	57	2	2	2	2	1	270	3330	10.1	多雪地域
B19	20.5	29.3	1.4	1.8	2.0	14.6	1.43	0.70	11.4	139	42	77	1	1	2	3	1	110	602	11.6	
B20	52.2	48.0	2.5	4.9	3.0	20.9	0.92	0.83	10.7	267	32	58	2	1	2	3	1	210	3230	21.3	
B21	29.0	45.0	2.0	3.5	3.0	14.5	1.55	0.67	8.3	165	53	84	2	1	2	3	1	130	1424	22.5	
B22	20.0	32.0	1.4	3.0	2.5	14.3	1.60	0.56	6.7	139	52	74	1	1	1	3	1	220	625	17.6	
B23	40.9	60.8	2.4	4.8	3.2	17.0	1.49	0.75	8.5	318	29	50	1	1	2	3	1	205	2576	17.0	
B24	26.5	36.0	1.5	3.6	3.0	17.7	1.36	0.50	7.4	165	53	75	1	1	1	1	1	85	1220	18.8	
B25	48.0	54.0	2.3	6.0	3.3	20.9	1.13	0.70	8.0	190	50	94	1	1	1	1	1	120	2890	19.6	
B26	20.0	25.0	1.3	3.9	1.8	15.4	1.25	0.74	5.1	89	58	69	2	1	1	3	1	130	550	19.7	
B27	87.1	57.1	3.2	5.0	3.4	27.2	0.66	0.96	17.4	318	31	83	2	2	1	3	1	340	5295	17.7	多雪地域,施工時ローラー支持
B28	40.6	41.6	1.8	4.3	3.3	22.6	1.02	0.55	9.4	216	44	52	2	1	1	1	1	115	1739	20.5	
B29	26.0	41.0	1.2	2.6	2.3	21.7	1.58	0.52	10.0	101	68	67	2	1	1	1	1	105	1074	12.5	
B30	27.8	32.7	1.4	4.3	2.4	19.9	1.18	0.60	6.5	139	48	84	1	1	1	1	1	130	965	17.2	
B31	30.5	55.0	1.9	6.0	4.0	20.9	1.13	0.48	5.1	216	54	94	1	1	1	1	1	120	1696	13.9	

NII-Electronic Library Service

1500m² 以下の小規模のデータが大部分を占める（図4）。

3．2　境界条件

3．1で示した各形状の境界条件は、その支持方法によってピン支持（バネ評価も含む）またはローラー支持からなる。さらに、4辺または4点をピン支持とする場合や、ピン支持とローラー支持を組み合わせた場合に分類できる。曲面版の境界条件はスラストや温度変化等に対応すべく、面内方向をピン支持、面外方向をローラー支持としている。これらの境界条件には、施工中にローラー支持、施工終了後にピン支持となる場合もある。

3．3　部品

システムトラスの部品は鋼管部材の径 ϕ48～ϕ355（STK 400）、接合部中核の径60mm～430mm（SM490A相当）、接合機構のボルトとして径M12～M76（F9T相当）を使用している[4]。鋼管部材の座屈長さは接合部中核の中心間距離とし、その座屈長さに対する部材の細長比は圧縮材、引張材にかかわらず160以下としている。接合部中核は、個々の部材の設計軸力に対してボルトの許容引張力以下でねじ抜けが起きないことや、複数の部材の軸力状態に対しても安全となるように設計している。ボルトサイズはM200まで製造できることを報告している[1]が、高張力鋼で造られている太径ボルトの場合、高軸力下における靭性の確保及び熱処理等の品質管理の問題から、標準部品としては最大ボルトをM76としている。これらの部品はシステムトラスを構成する部品の中から定められた設計手順に基づいて選定している。

3．4　施工法

本実施例に使用されている施工法を分類すると下記のようになる。システムトラスの施工中は支保工で支持されているが、支保工の位置や設計条件によっては、施工時の応力・変形・反力が設計時に想定したものより上回る場合もある。

1）総足場工法

システムトラスを架設するレベル近くまで作業用の固定の仮設足場を設け、その上で建方する工法である。建方の自由度は高いが、足場費用は高くなる。

2）移動足場工法

システムトラスを固定の足場ではなく、移動型の足場の上で建方

表1c　寄棟の実施例

寄棟	ｽﾊﾟﾝL	桁長さB	ﾃﾞﾌﾟｽd	ﾗｲｽﾞf	ｸﾞﾘｯﾄﾞ長さg	L/d *1	B/L *2	d/g *3	L/f *4	最大部材径	λmax 弦材	λmax 斜材	境界 *5	塗装 *6	施工 *7	建設地 *8	用途 *9	鉛直荷重 *10	屋根面積	最高高さh	備考
データ	m	m	m	m	m					mm								kg/m²	m²	m	
C01	24.5	46.0	1.8	1.8	3.1	13.6	1.88	0.58	13.6	139	65	93	2	1	1	1	1	130	1309	14.6	
C02	34.5	44.6	2.0	3.3	4.3	17.3	1.29	0.46	10.5	190	66	77	2	1	1	1	1	130	1606	14.0	
C03	18.6	51.0	1.8	1.1	4.2	10.3	2.74	0.43	16.9	139	88	91	2	1	1	1	1	145	988	12.0	
C04	40.0	52.0	2.2	2.3	4.0	18.2	1.30	0.55	17.4	267	44	55	2	1	1	1	1	180	2098	17.5	
C05	41.3	52.5	2.0	2.0	3.5	20.7	1.27	0.58	20.7	267	38	66	2	1	1	3	1	128	2201	15.3	
C06	26.3	34.2	1.3	1.9	2.9	19.7	1.30	0.47	13.8	139	60	63	2	1	1	3	1	125	943	16.2	
C07	23.3	27.1	1.4	0.6	2.7	16.6	1.16	0.52	38.8	114	70	79	2	1	1	1	1	160	635	12.2	
C08	22.3	38.3	1.5	1.4	2.3	14.9	1.72	0.65	15.9	114	59	85	2	1	1	3	1	135	908	22.8	
C09	27.7	49.2	1.8	4.0	3.6	15.4	1.78	0.50	6.9	139	75	90	2	1	1	3	1	80	1667	14.7	
C10	33.4	52.5	2.2	2.9	3.8	15.2	1.57	0.59	11.7	216	51	61	2	1	1	1	1	140	1753	14.5	
C11	18.4	30.8	1.8	2.1	3.0	10.2	1.67	0.60	8.8	139	62	71	2	1	1	1	1	125	565	14.1	
C12	32.5	47.5	2.0	3.3	3.0	16.3	1.46	0.67	10.0	216	40	51	2	1	1	1	1	170	1576	17.4	
C13	19.5	30.0	1.7	3.9	2.5	11.5	1.54	0.68	5.0	89	83	95	2	1	1	1	1	145	592	19.9	
C14	24.9	36.5	1.5	3.1	2.4	16.6	1.47	0.63	8.0	139	50	66	2	1	1	3	1	130	938	13.3	
C15	51.6	83.2	2.5	11.6	3.0	20.6	1.61	0.83	4.4	267	32	50	2	1	1	3	1	195	4332	23.1	
C16	24.6	58.3	1.7	3.1	2.0	14.5	2.37	0.85	7.9	216	27	46	2	1	1	3	1	425	1435	13.1	多雪地域

表1d　曲面版の実施例

曲面版	ｽﾊﾟﾝL	桁長さB	ﾃﾞﾌﾟｽd	ﾗｲｽﾞf	ｸﾞﾘｯﾄﾞ長さg	L/d *1	B/L *2	d/g *3	L/f *4	最大部材径	λmax 弦材	λmax 斜材	境界 *5	塗装 *6	施工 *7	建設地 *8	用途 *9	鉛直荷重 *10	屋根面積	最高高さh	備考
データ	m	m	m	m	m					mm								kg/m²	m²	m	水平投影形状
D01	34.7	34.7	1.5	14.1	3.0	23.1	1.00	0.50	2.5	101	87	86	2	2	1	2	3	167	1620	29.4	円形
D02	70.0	70.0	1.5	13.0	3.5	46.7	1.00	0.43	5.4	318	32	31	2	1	1	3	3	110	4867	29.5	円形
D03	74.0	74.0	2.0	14.7	3.0	37.0	1.00	0.67	5.0	165	53	61	2	2	1	1	1	145	4700	28.3	円形
D04	56.4	56.4	1.5	7.7	3.5	37.6	1.00	0.43	7.3	165	62	60	2	2	1	1	1	145	2720	21.7	円形
D05	50.4	66.0	2.5	9.0	3.0	20.2	1.31	0.83	5.6	216	41	44	2	1	1	3	3	190	3650	23.1	矩形
D06	33.7	39.2	2.0	3.0	2.8	16.9	1.16	0.71	11.2	190	43	50	2	1	1	3	1	130	1585	14.4	矩形
D07	31.9	31.9	1.5	1.1	2.5	21.3	1.00	0.60	29.0	190	38	41	2	1	1	1	1	205	801	27.1	円形
D08	57.3	70.0	2.5	4.7	3.1	22.9	1.22	0.81	12.2	267	34	69	2	2	1	2	1	170	4180	19.3	矩形
D09	23.4	31.5	1.8	3.0	3.2	13.0	1.35	0.57	7.8	139	66	60	2	2	1	2	1	170	864	17.3	矩形
D10	43.4	55.8	2.0	6.4	3.1	21.7	1.29	0.65	6.8	165	55	62	2	1	1	1	1	110	3152	22.4	矩形
D11	42.0	42.0	2.2	7.9	3.0	19.1	1.00	0.73	5.3	190	46	54	2	1	1	3	3	230	2236	12.8	矩形,多雪地域
D12	34.5	40.0	1.5	2.6	2.5	23.0	1.16	0.60	13.3	139	52	60	2	1	1	3	1	125	1488	16.0	矩形
D13	44.5	95.4	2.5	16.1	3.6	17.8	2.14	0.69	2.8	318	33	54	2	2	1	2	3	170	3808	27.8	半円
D14	39.8	39.8	3.0	8.5	3.9	13.3	1.00	0.77	4.7	190	59	62	2	2	1	2	3	150	1584	38.2	矩形
D15	30.6	36.8	1.2	12.1	1.8	26.6	1.20	0.64	2.5	165	32	49	2	1	1	3	3	250	1546	21.5	楕円
D16	30.0	60.0	2.3	2.0	3.0	12.8	2.00	0.78	15.0	139	63	82	2	2	1	1	3	300	1356	15.0	半円,多雪地域
D17	36.0	36.0	1.6	5.5	3.0	22.5	1.00	0.53	6.5	190	46	47	2	1	1	3	3	235	1726	14.3	矩形,多雪地域
D18	39.8	60.0	2.1	3.2	3.0	19.0	1.51	0.70	12.4	267	33	32	2	1	1	1	1	170	2349	24.5	矩形
D19	44.0	47.0	2.5	2.7	3.1	17.6	1.07	0.81	16.3	267	34	59	2	1	1	1	1	200	2500	8.5	矩形
D20	63.7	99.0	3.2	6.3	4.5	19.9	1.55	0.71	10.1	318	41	41	2	2	1	3	1	160	6684	24.2	矩形,施工時ローラー支持
D21	38.4	38.4	1.8	10.4	2.5	21.3	1.00	0.72	3.7	139	52	83	2	2	1	2	1	160	2490	25.1	円形
D22	22.5	35.0	1.5	1.7	2.3	15.0	1.56	0.65	13.6	101	67	64	2	1	1	1	1	160	2490	14.2	矩形

注
*1:スパン・デプス比(α=L/d)
*2:桁長さ・スパン比(=B/L)
*3:デプス・グリッド長さ比(β=d/g)
*4:スパン・ライズ比(γ=L/f)
*5:境界条件（1:2辺支持,2:4辺支持,3:点支持）
*6:塗装仕様（1:一般塗装,2:重防腐塗装,3:溶融亜鉛メッキ塗装）
*7:施工法（1:総足場工法,2:移動足場工法,3:スライディング工法,4:ブロック工法,5:リフトアップ工法）
*8:建設地（1:市街地,2:海岸・工業地帯,3:田園・住宅・農村地帯）
*9:用途　（1:スポーツ施設,2:プラザ,3:多目的ホール）
*10:鉛直荷重は多雪地域の積雪荷重も含む。

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

する工法である。足場が軽量のため移動が容易なこと、支持点のアンカー時に上下移動がないので作業が単純である。

3）スライディング工法

建物の一端に部分的に仮設足場を設け、この上で組上ったシステムトラスを治具を用いてスライドさせ、順次送り出して建方する工法である。システムトラスの一部または全部をスライドさせる際、境界条件が異なるため、部品サイズの変更を伴う場合が多い。

4）ブロック工法

システムトラスをいくつかのブロックに地組してから上架して建方する工法である。

5）リフトアップ工法

システムトラス全体またはその一部を地上面で組み立てた後、システムトラスを平行に支持点までの高さまで持ち上げて、支点を受ける工法である。

3．5　塗装仕様

塗装は防錆と美装及び安全性などの機能を満たすために行われる。その仕様はメンテナンスや経済性を考慮し、建築物の用途、機能にふさわしいものを選定しなければならない。システムトラスの鋼管部材の塗装仕様例として、一般塗装、溶融亜鉛メッキ塗装、重防触塗装の3種類に分類できる。重防触塗装はウレタン系やフッソ系、エポキシ系等を使用するもので、太陽光線による紫外線劣化等の防止や耐久性の向上のために使用されており、溶融亜鉛メッキ塗装に代わる防錆塗装として普及している。一般塗装は、JISで規定する錆止め塗装である。

4．設計・施工情報の分析

設計条件の適切な評価や合理的な構造物の性能を把握するため、3節で示したシステムトラスの実施例において構造物の性能を規定する設計・施工情報を定量的に分析する。

4．1　グリッド形状

平版、部分円筒、寄棟、曲面版の各形状におけるデプスは、スパン16～87mに対して各々1.0～3.5mの範囲に分布している（図5）。これらの各形状とも鉛直荷重に対して長期1/300、短期1/200の変形制限を満たしており、十分な剛性を有している。各形状別にみると、平版、部分円筒、寄棟、曲面版のスパン・デプス比（α＝L／d）は10＜α＜20の範囲で、各々43件中36件で84%、31件中24件で77%、16件中14件で87%、22件中10件で45%を占める。20＜α＜30の範囲で、各々43件中7件で16%、31件中7件で23%、16件中2件で13%、22件中9件で41%を占める（図6）。特に、曲面版は他の形状に比して20＜α＜30の範囲に多く分布している。曲面版は面内剛性が高いので、スパンに対してデプスを小さくすることができる傾向を示している。

グリッド長さは2～4mの範囲に多く分布する（図7）。これは、下部構造の柱芯々間距離が5～9mの範囲に分布し、支点を柱上部に配置できるようにグリッドを2分割、3分割等に割り付けているためである。すなわち、システムトラスの支点を柱位置に合わせることで、システムトラスに作用する荷重を下部構造にスムーズに伝達し、下部構造の経済性に寄与することになる。また、グリッド形状と美的要素、細長比の関連は後で詳細に述べるが、仕上材及び母屋材の強度とスパン等の影響も受ける。

部分円筒、寄棟、曲面版の各形状のスパン・ライズ比（γ＝L／f）

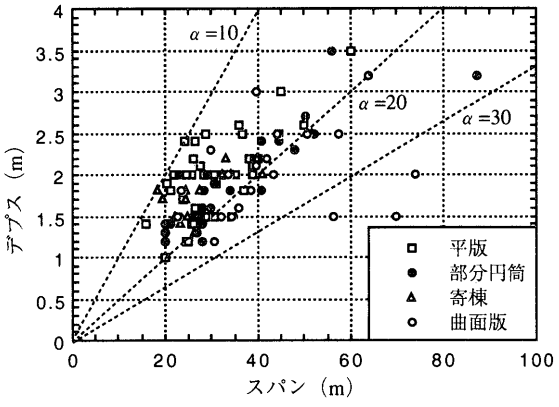


図5　スパンとデプスの関係

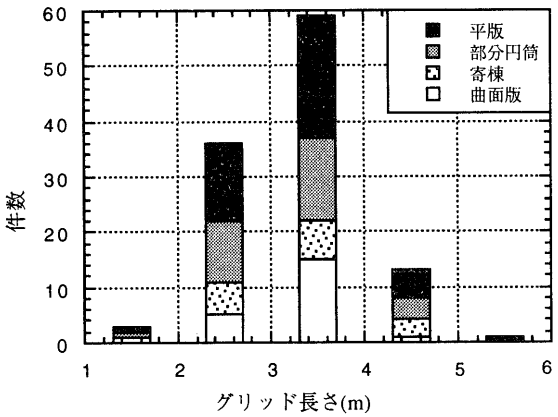


図7　グリッド長さの分布

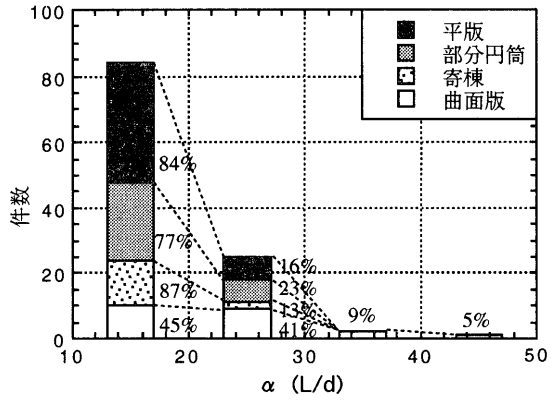


図6　各形状におけるα分布

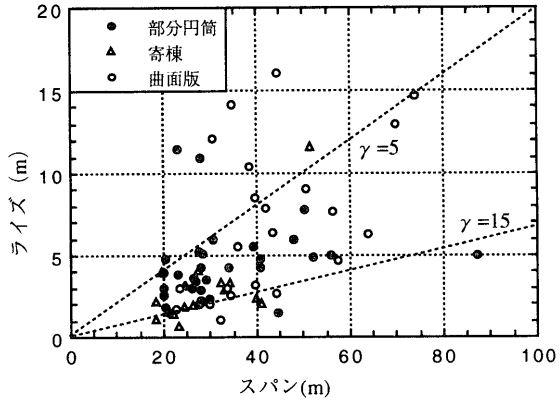


図8　スパンとライズの関係

NII-Electronic Library Service

は、5～15の範囲に多く分布している（図8）。ライズを決定する要因として、構造上の合理性のほか、システムトラスを使用している建築物の必要有効高さや水勾配等の意匠上の制約と経済性が考えられる。

4．2　境界条件

平版、部分円筒の境界条件における4辺支持は、表1aに示すごとく43件中39件で91%、31件中14件で45%を占めている。寄棟と曲面版にいたっては全て4辺支持である（図9）。 4辺支持の多くを、面外方向をローラー支持、面内方向をピン支持としているのは、システムトラスの立体効果により、面外方向を移動自由にすることでスラスト力の発生を押え、下部構造への荷重の負担を軽減しているためである。下部構造は鉄骨造またはRC造であり、 面内方向にラーメン架構となっている場合が多く、上記の条件をとることによりシステムトラスから作用する荷重を容易に負担できることになる。平版、部分円筒の境界条件における2辺支持は、43件中3件で7%、31件中17件で55%を占める。これは妻面の下部構造をシステムトラス支点まで立ち上げれない場合等の理由によるものである。また、屋根構造により2つの建物の間をつなぐ場合、システムトラスは両者の建物の地震時における強制変形を受けないように一方向をピン支持、一方向をローラー支持の2辺支持のものもある。

4．3　部品

1）鋼管部材

周辺部が単純支持された平版システムトラスに鉛直荷重が作用した場合、弦材の最大軸力はスパン中央部に生じる。この最大軸力の大きさは単純梁の理論による最大モーメントM から（1）式で示される。

$$M=\frac{s\,g\,L^2}{8}\quad,\quad N=\frac{M}{d}\qquad(1)$$

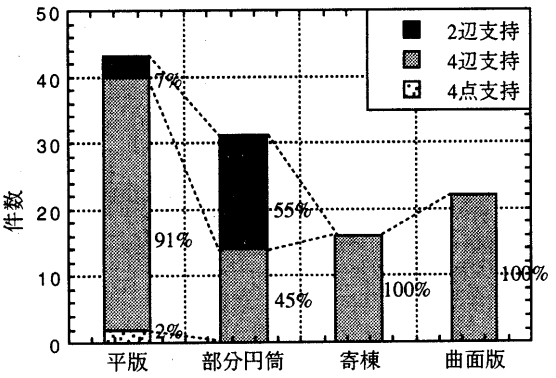


図9　境界条件の分布

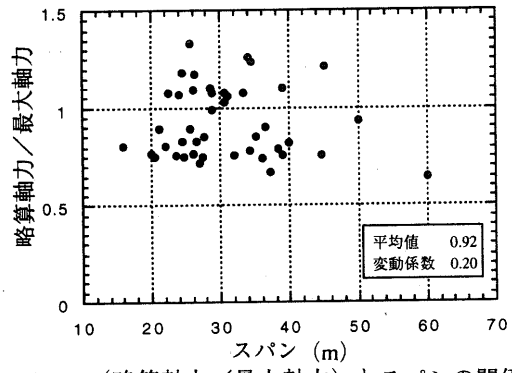


図10　（略算軸力／最大軸力）とスパンの関係

ここで、

最大軸力：N（t）、スパン：L（m）、桁長さ：B（m）

デプス：d（m）、グリッド長さ：g（m）、鉛直荷重：s（t／m²）

最大軸力は力が両方向に流れるとして辺長比（＝B／L）による換算係数η [10]（表2）を用いると（2）式で示される。

$$N=\frac{s\,g\,L^2}{8\,d}\eta\qquad(2)$$

ここでは、（2）式を用いて平版における略算最大軸力と実施例の最大軸力の比較を試みる（図10）。（2）式による略算最大軸力は、平版において鉛直荷重によって支配される部材が多いが、部材

表2　辺長比（=B/L）による最大軸力の換算係数η

B/L	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4以上
η	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0

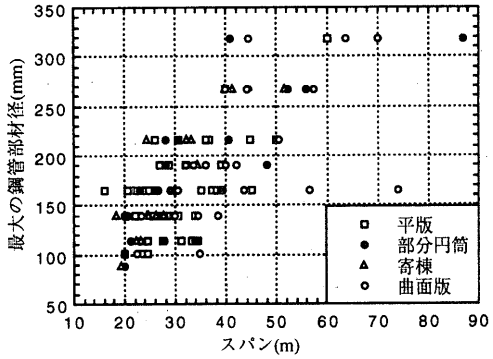
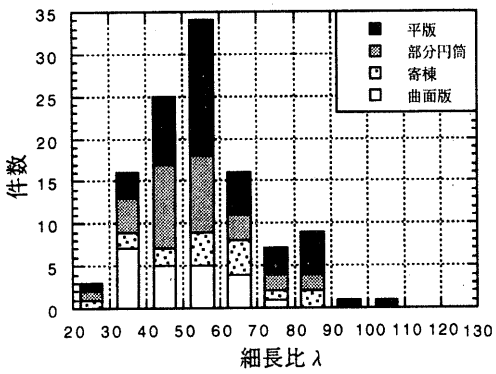
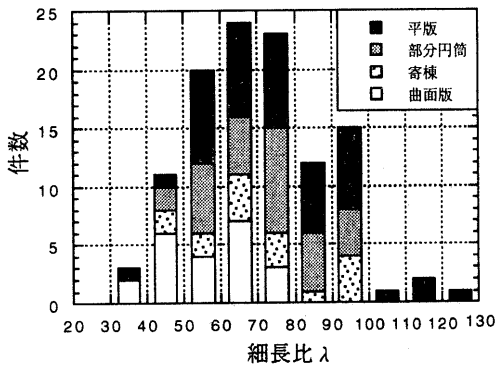


図11　スパンと最大の鋼管部材径の関係



a）弦材の最大細長比



b）斜材の最大細長比

図12　部材の最大細長比の分布

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

配置、支点の位置及び個数等の影響により、実施例の最大軸力に対してその値は±約40%の範囲にばらつく傾向にある。

平版、部分円筒、寄棟、曲面版における最大の鋼管部材径とスパンの関係を図11に示す。 各形状における最大の鋼管部材径は、グリッド形状、境界条件の相違等の影響により、各スパンに対してばらつく傾向にある。平版、部分円筒、寄棟の最大の鋼管部材は、弦材においてスパン中央、斜材において支点近傍において配置される傾向にある。曲面版のうち、水平投影が円や楕円の場合における最大の鋼管部材は、弦材において円周方向の最下層に、斜材において支点に取りつく最下層に配置される傾向にある。また、曲面版のうち、ライズが小さく、水平投影が矩形の場合における最大の鋼管部材の配置は、平版、部分円筒、寄棟と類似の傾向を示している。最大細長比λは、30＜λ＜100の範囲で96％を占める。これらのうち、弦材において50＜λ＜60、斜材において60＜λ＜80の範囲に最も多く分布している（図12）。また、λが100＜λ＜130の範囲に分布するものは、表1a～dに示すごとくΦ76～Φ114の細径部材であり、部材長が3mを全て超えている。このように最大の鋼管部は、各形状に対して共に圧縮材として有効な断面となっている。

一方、鋼管部材の種類は各実施例において3～7種類であり、Φ114、Φ139、Φ165の部材サイズの使用頻度が高い。これは、実施例に示した制約条件においてスパンの大小にかかわらず、応力なりに段階的に部材が選定されていることによるものである。

2）グリッド形状と使用部品

グリッド形状はシステムトラスの使用部品を決定するための重要な要素となる。その使用部品は強度を満たし、部品の干渉を生じないように選定されなければならない。既に、著者らは、デプス・グリッド長さ比（β＝d／g）が1.2以上または0.5以下に使用されるグリッド形状の場合、部品サイズは、耐力よりも競り合い角度や進入角度等の部品の干渉によって決定される割合が多くなることを報告している[12]。 本実施例において平版、部分円筒、寄棟、曲面版の各形状とも、βが0.4＜β＜0.5の範囲で21%、0.5＜β＜0.9の範囲で75%、0.9＜β＜1.2の範囲で4%を占めることから、部品サイズの干渉によって部材断面が決定される割合は少ないと考えられる（図13）。なお、各形状のβの平均値は0.60～0.66、変動係数は0.17～0.22を示している。一方、グリッド長さを小さくし、均一な部材配置とすれば、部品サイズのバランスが良く見える。しかし、βが1を超えるか、または、0.4より小さい場合、斜材と弦材が干渉し接合部中核のサイズが大きくなるため、鋼管部材との美的なバランスを維持できなくなる場合が多い。

3）グリッド形状と経済性

部品サイズは、強度と干渉の他、経済性を考慮してを選定しなければならない。平版、部分円筒、寄棟、曲面版の各実施例のコストを各形状におけるグリッド長さg=3.5mに対する割合として、グリッド長さと経済性を比較する。各形状においてばらつきはあるものの、グリッド長さが大きくなるに連れて経済的となる傾向を示す（図14）。なお、回帰直線は平版の近似式で、その分散は0.03である。グリッド長さが大きくなると、鋼管部材の座屈耐力が小さくなり、部材サイズは大きくなる。しかし、接合部中核及び接合機構の経済性に占める割合が大きく、それらの部品数が減少し安価となるため、このような傾向を示すと考えられる。

4．4　施工法

施工法において、総足場工法が85％で最も多く、続いて移動足場工法9%、スライディング工法4%、ブロック工法2%の順となる（図15）。形状別にみると、寄棟、曲面版が全て総足場工法となっている。これは総足場工法における足場の高さが建築物の位置によって異なり、足場の盛り変えを多く必要とすることが大きな要因の一つとし

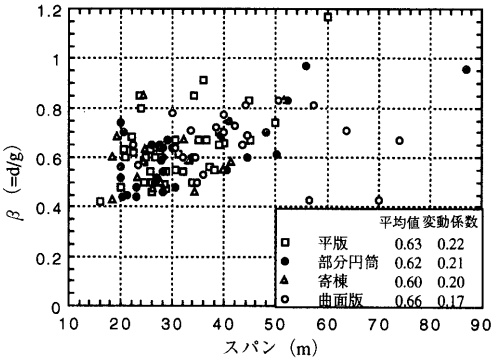


図13　スパンとβの関係

注）Cost(g)：各グリッド長さのコスト

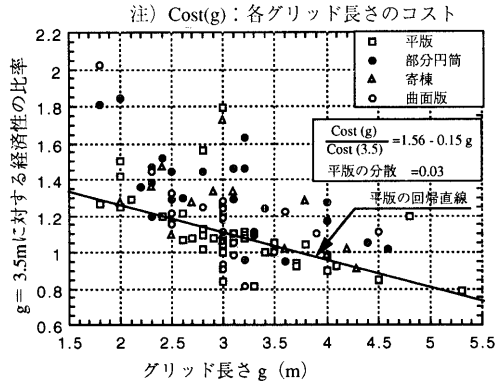


図14　グリッド長さgと経済性の関係

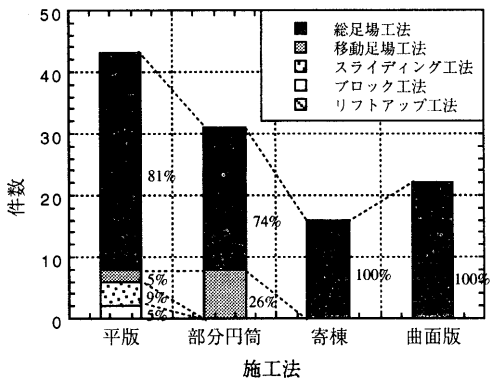


図16　各形状における施工法の分布

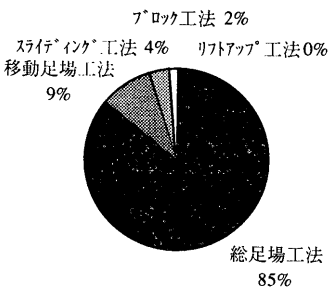


図15　施工法の分布

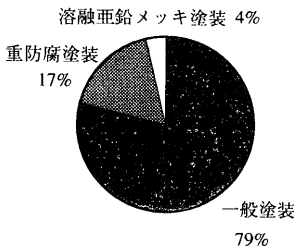


図17　塗装仕様の分布

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

て挙げられる（図16）。総足場工法は足場を最も多く必要とするものの、平版、部分円筒に占める割合が各々43件中35件で81%、31件中23件で74%を占める。これはシステムトラスの施工の他、屋根工事や天井工事、設備工事、塗装工事等に利用できることやそれらの工事の一部を並列に進行することで工期を短縮できる等の理由によるものである。平版では移動足場工法が43件中2件で5%であるが、部分円筒においては31件中8件で26%を占めている。部分円筒では、妻面または桁面の軒高さが一定となり、足場の上下の調整が不用となるからである。スライディング工法は、平版で43件中4件で9%使用されている。足場が増えて不経済になる場合や重機が建築物によりつけできない場合等の制約条件下で限定的に使用されている。ブロック工法は平版において43件中2件で5%であり、4点支持の境界条件等に使用されている。リフトアップ工法は、ここで取り上げた実施例の中には採用されていなかった。これらのことから、施工法は、屋根形状、建築物の制約条件、工期、経済性によって決定されていることが分かる。

4．5　塗装仕様

塗装仕様において、一般塗装は79%で最も多く、続いて重防触塗装17%、溶融亜鉛メッキ塗装4%の順となる（図17）。これは、システムトラスを使用した建築物の用途として体育館等の屋内施設が多いことや経済性（一般塗装：重防触塗装：溶融亜鉛メッキ塗装＝1：1.5～2.3：1.8）によるものである。重防触塗装は海岸・工業地帯において13件中10件の77%を占めるが、市街地では56件中7件の12%、田園・住宅・農村において43件中2件の5%である。溶融亜鉛メッキ塗装は海岸・工業地帯において13件中3件の23%を占めるが、市街地において56件中1件の2%にすぎず、田園・住宅・農村では使用されていなかった（図18）。これらのことから、塗装仕様は、建築物の用途、建設地の条件、経済性によって決定されていることが分かる。

5．結論

著者らが手がけたシステムトラスの実施例における設計・施工情報の統計的分析の結果、次のようなことが明らかになった。

1）スパン・デプス比（α＝L／d）を平版、部分円筒、寄棟において$10<\alpha<20$、曲面版において$10<\alpha<30$の範囲で使用すれば、鉛直荷重に対して長期1/300、短期1/200の変形制限を満たす設計を行うことができる。

2）平版、部分円筒における境界条件の4辺支持は、各々91%、45%、2辺支持は、各々7%、55%を占めている。また、寄棟と曲面版の境界条件はすべて4辺支持となっている。

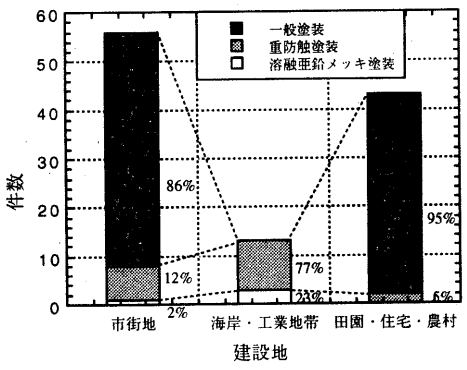


図18　建設地と塗装仕様の分布

3）平版、部分円筒、寄棟、並びに曲面版で水平投影が矩形の場合の最大の鋼管部材は、弦材においてスパン中央、斜材において支点近傍において配置される傾向にある。また、曲面版のうち、水平投影が円や楕円等に使用されている最大の鋼管部材は、弦材において円周方向の最下層に、斜材において支点の取りつく最下層に配置される傾向にある。

4）鋼管部材の最大細長比は$30<\lambda<100$の範囲で96%を占め、圧縮材として有効な断面となっている。また、鋼管部材の種類は各実施例において3～7種類であり、Φ114、Φ139、Φ165の部材サイズの使用頻度が高い。

5）デプス・グリッド長さ比（β＝d／g）を$0.5<\beta<1.0$の範囲で使用すれば、部品の選定にあたって部品の干渉による影響は少ない。

6）平版、部分円筒、寄棟、曲面版の各形状とも、接合部中核及び接合機構の経済性に占める割合が大きく、グリッド長さが大きくなると、部品数が減少するため、経済的になる傾向を示す。

7）施工法において、総足場工法が85%と最も多く、続いて移動足場工法9%、スライディング工法4%、ブロック工法2%の順となる。これらは、屋根形状、建築物の制約条件、工期、経済性によって決定されている。

8）塗装仕様において、一般塗装が79%と最も多く、続いて重防触塗装17%、溶融亜鉛メッキ塗装4%の順となる。これらは、建築物の用途、建設地の条件、経済性によって決定されている。

9）本論で示したシステムトラスにおける設計・施工情報のデータベースは、システムトラスに限らず、スペースフレームとしても設計条件の適切な評価や合理的な構造物の性能を把握するのに役立つと考えられる。

参考文献

1）坪井義勝（研究者代表）：スペースフレーム（立体格子構造）の設計・解析・施工, 1982年度 文部省科学研究費補助金, 総合研究（B）研究報告書, 1983年3月

2）Z.S.Makowski：Analysis,Design and Construction of Braced Domes, PublishedGranada Publishing, 1984

3）川合廣樹, 岩田衛, 白井貴志：システムトラス構法計画成立に関する論証, 日本建築学会計画系論文報告集, pp.51-59, 1988年8月

4）新日本製鐵株式会社：ＮＳトラス標準部品, 建設省東住指発第393号, 1993年9月

5）鹿島出版会：スペーストラクチャーの設計と実例, 1971年

6）斎藤公男：スペース・トラクチヤーのデザイン, カラム, No.83 pp.5-56, 1982年1月

7）日本建築学会, 空間骨組小委員会：二層立体ラチス構造の解析・設計・施工, その現状と問題点, 1992年11月

8）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, No.225 pp.1-7, 1988年4月

9）岩田衛, 藤田正則, 米田雅子, 和田章：システムトラスにおける設計・加工・施工情報に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, pp.191-200, 1994年6月

10）岩田衛：はじめてのシステムトラス, 建築技術, 1996年6月

11）脇山広三, 字留野清, 岩田衛, 川合廣樹, 白井貴志：高強度太径ボルトM200の製造に関する検討, 日本建築学会学術講演梗概集（関東）, C, pp.927-928, 1988年10月

12）藤田正則, 岩田衛：システムトラスの部品選定に関する一考察, 日本建築学会学術講演梗概集, C-1, pp.155-156, 1995年8月

（1996年11月10日原稿受理, 1997年5月26日採用決定）

NII-Electronic Library Service