

鋼構造シリーズ 11

*Basis and Application*

ケーブル・スペース構造の  
基礎と応用

*of Cable and Space Structures*

土木学会

Japan Society of Civil Engineers

鋼構造シリーズ 11

Basis and Application

ケーブル・スペース構造の  
基礎と応用

of Cable and Space Structures



B 1 1 0 8 0 9 1 B  
土 木 図 書 館

土木学会

Japan Society of Civil Engineers

Basis and Application  
ケーブル・スペース構造の  
基礎と応用  
of Cable and Space Structures

登 録	平成 11年 11月 10日
番 号	第 47254 号
社 団 法 人	土 木 学 会
附 属	土 木 図 書 館

土木学会

Japan Society of Civil Engineers

Steel Structures Series 11

---

**Basis and Application of  
Cable and Space Structures**

---

Published by

**Japan Society of Civil Engineers**

**1999**

## まえがき

20世紀後半における我が国の長大橋建設技術の進歩は目覚ましいものがあり、吊橋として明石海峡大橋が、斜張橋としては多々羅大橋がそれぞれ世界最長の支間をもつものとして実現した。また、21世紀に向けて、東京湾口、伊勢湾沖、紀淡海峡、豊予海峡などを横断する計画が具体的な検討課題として取り上げられつつあり、この他にもいわゆるスーパー横断プロジェクトが国内・海外で話題に上っている。

これら未来技術の課題に向けて、現存の長大橋建設技術を継承し発展させ、また、より一層新しい発想のもとに新技術の開発に努めることはこれからの土木構造技術者にとって重要な使命であり、また夢でもある。

長大橋梁の支間については、現在までの研究成果から判断して、現有の材料を用いる限り、吊橋では3500m、斜張橋ではその半分程度が限界であるといわれている。今後この限界を超えてさらに長大スパンの橋梁に挑戦する上には、一つには新素材の導入などによる軽量・高強度の構造部材の開発が必要であり、また、それと並行して、新しい構造システムの追求とその施工技術の開発が、トータルの経済性の追求をも含めてなされなければならない。

これらの問題を総合的にとらえた研究・開発は土木技術者、とりわけ鋼構造に携わる研究者・技術者にとって今後の重要課題であるといつて良いであろう。

ところで、これまで土木構造物の分野で一般に大スパンの構造物といえば、橋梁に代表されるように、平面的に長大な構成をもつものが主体であった。ここで新しい構造システムの開発という夢を実現する上に、橋梁構造の分野で培われたさまざまな高度の構造技術を単にその延長上で発展させるだけでなく、建築構造の分野ですでに広範な研究がなされているスペースストラクチャーの技術を学び取って、より広い空間を創造する3次元的な広がりを持った新しい構造システムを未来の構造物の姿として思い浮かべることが出来ないであろうか。もちろん土木構造物の機能は建築学上のそれとはかなり性格の異なるものであるから、建築学上の知見が直ちに土木構造物へ応用されるものとはなり難いが、少なくともその基礎的な知識を導入して、3次元空間を覆う新しい土木構造物を開発する、あるいは、それに基づいて、現状の形態の橋梁構造から一歩を進めて、より立体的なシステムとしての新形式橋梁構造を開発するといった方向へ技術の転換がなされることは未来指向の技術の姿として望ましい形であろうと思われるのである。

その夢は単に支間3000m超の超長大橋にとどまらず、大規模人工島やウォーターフロント、あるいは宇宙の彼方において大空間を創造するようなスペース構造の開発にまでひろがるであろう。

以上のような観点から、1994年12月土木学会鋼構造委員会の中に「ロングスパン・スペース構造研究小委員会」が設けられ、上記の主旨に沿って活動を開始した。

この委員会の活動の多くは、各委員からのさまざまな専門のテーマに関する話題提供により、情報の交換と問題意識の整合を目指すこと、および、外部の権威者を招請して新しい知識を導入することに費やされた。特に3次元のスペースストラクチャーについては、その方面の権威者の講演をお願いして極めて有益な情報を得ることが出来た。

また、この委員会の活動は、超長大橋の建設技術に関わるものと、スペース構造に関する基礎的な検討を行うものにと大別される。前者においては、未来の超長大橋の建設技術を開発する基本的な調査・研究を主体として、吊橋、斜張橋、斜張吊橋、ケーブルネット橋などを対象に国内外の研究・開発成果を抽出し、橋梁構造の長大化達成に必要な技術的課題を検討した。後者においては、立体トラス、シェル、ラティスドーム、ケーブルネット、ケーブルトラス、テンセグリティ構造、膜構造など、各種形態のスペース構造物について基礎的な検討を行うと共に、それらの構造技術が土木構造物の世界にどのように適用可能であるかについて調査し

た。また、これらの技術が上述の超長大橋の新しいシステム開発に応用される可能性についても検討を加えた。

本書は、以上のような諸活動の成果のまとめとして執筆されたものであるが、本小委員会の基本的な姿勢としては、上記の二つの活動を個々別々のものとして取り扱うのではなく、超長大橋梁もスペース構造も同じ範疇に属する構造形態であるとして、これらを「ケーブル・スペース構造」なる名称のもとに統一的に取り扱おうとしたのである。

本書は「基礎編」と「応用編」とから成り、その内容については「序章」で詳しく述べられている。

「基礎編」ではケーブル・スペース構造を形成する基本的な構造要素としてのケーブル、膜、シェル等について基礎的な力学上の取り扱いを説明しているが、特にここではケーブルについて多くのページが費やされている。ケーブルが長大橋やスペース構造で多用されることは周知の通りである。しかし、ケーブルの力学について、その基本から詳細に論じた成書がほとんど見当たらないというのが実状でもあるので、これからこの分野の研究・開発を手がけようとする技術者、学生のための入門書の役も兼ねるという目的で本編が執筆されており、これが本書の一つの大きな特色となっている。

「応用編」では基礎編で取り扱われた構造要素を組み合わせたさまざまな形態の構造物について歴史的展開や未来技術の展望などについて詳述している。

本書が、現在あるいは近い将来、超長大橋やスペース構造の技術の研究・開発に携わろうとされる方々への一助となれば幸いである。

本書の執筆担当者以下の通りである

	序章	: 波田凱夫
基礎編	第1章	: 阿井正博 (1.1 ~ 1.4), 山口宏樹 (1.5)
	第2章	: 阿井正博
	第3章	: 頭井洋
	第4章	: 山口宏樹
	第5章	: 松田浩
	第6章	: 田波徹行
	第7章	: 田波徹行
応用編	第8章	: 古屋信明 (8.1 ~ 8.2), 長井正嗣 (8.1 ~ 8.3), 星埜正明 (8.2 ~ 8.3), 金子俊一・井上雅雄・春日昭夫・熊谷紳一郎 (8.3)
	第9章	: 長井正嗣 (9.1, 9.6), 謝旭 (9.1), 山田均 (9.2), 木村吉郎 (9.2), 藤野陽三 (9.3), 古屋信明 (9.4 ~ 9.5), 田中洋 (9.4), 風間浩二・前田研一・大野克紀・高尾道明 (9.5)
	第10章	: 川口健一
	第11章	: 阿部雅人, 樋口健

なお、この小委員会の活動の一環として、下記の方々をお招きし、貴重なご講演を頂きました。厚くお礼申し上げます。

春日 昭夫 (住友建設)  
川口 衛 (法政大学)  
鈴木 英之 (東京大学)  
半谷 裕彦 (東京大学)  
本間 秀世 (住友建設) (50音順, 敬称略)

(半谷裕彦先生は1998年8月急逝されました。先生には「大スパン構造における形態創生」と題してきわめて印象深いご講演を賜りました。ここに付記し、委員一同慎んで哀悼の意を表する次第であります。)

また、委員会外部から、下記の方々に特にお願いして執筆加わって頂きました。厚くお礼申し上げます。

阿部雅人 (東京大学)  
春日昭夫 (住友建設)  
川口健一 (東京大学)  
熊谷紳一郎 (住友建設)  
謝 旭 (埼玉大学, 現・開発コンサルタント)  
樋口 健 (文部省宇宙科学研究所)  
風間浩二 (住友重機械工業) (50音順, 敬称略)

最後に、約四年間にわたり、熱心にこの委員会の活動を推進された、藤野陽三幹事長はじめ委員各位のご努力に対し深甚の謝意を表します。とくに、編集の実務の大部分をご担当頂いた松田浩委員に対し厚くお礼申し上げます。

1999年7月

土木学会鋼構造委員会  
ロングスパン・スペース構造研究小委員会  
委員長 波田 凱夫

# 土木学会鋼構造委員会 ロングスパン・スペース構造研究小委員会構成

(50音順, 敬称略, ○印幹事兼務)

委員長	波田凱夫	摂南大学工学部土木工学科
幹事長	藤野陽三	東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻
委員	○阿井正博	法政大学工学部土木工学科
〳	○石川智巳	(財)電力中央研究所 我孫子研究所
〳	井上雅雄	(株)宮地鐵工所 設計部
〳	大野克紀	川田工業 技術開発本部 技術研究室
〳	金子俊一	(株)横河ブリッジ 橋梁本部 工事部
〳	木内龍彦	大阪市立大学工学部建築学科
〳	木村吉郎	東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻
〳	鈴木政直	石川島播磨重工業(株) 橋梁基本計画部
〳	○頭井 洋	摂南大学工学部土木工学科
〳	高尾道明	NKK 橋梁建設部 開発技術室
〳	田中 洋	日立造船(株) 鉄構・建機事業本部 建築土木設計部
〳	○田波徹行	太陽工業(株) 空間技術研究所
〳	○長井正嗣	長岡技術科学大学工学部環境・建設系
〳	○古屋信明	本州四国連絡橋公団 設計部
〳	星埜正明	日本大学理工学部交通土木工学科
〳	前田研一	東京都立大学工学部土木工学科
〳	○松田 浩	長崎大学工学部構造工学科
〳	増田陳紀	武蔵工業大学工学部土木工学科
〳	水澤富作	大同工業大学工学部建設工学科
〳	○山口宏樹	埼玉大学工学部建設工学科
〳	山田 均	横浜国立大学工学部建設学科



# 目 次

序 ロングスパン構造とスペース構造	1
<b>I 基礎編</b>	<b>5</b>
<b>1 単一ケーブルの力学</b>	<b>7</b>
1.1 直線ケーブル	7
1.2 放物線ケーブル	8
1.3 カテナリー・ケーブル	12
1.4 弾性カテナリー・ケーブル	14
1.5 ケーブルの有限要素	17
参考文献	18
<b>2 ケーブル構造の静的解析</b>	<b>19</b>
2.1 直線ケーブル要素による変位法つり合い解析	19
2.1.1 構造系のつり合い式と接線剛性	19
2.1.2 つり合いの正則性と特異状態	21
2.2 弾性カテナリー要素による応力法つり合い解析	23
2.2.1 組合せケーブルでの応力法展開	23
2.2.2 適合条件まわりの補ポテンシャル	26
2.3 つり合い解析での繰返し計算	28
2.3.1 Newton-Raphson 法	29
2.3.2 部分修正法	30
参考文献	40
<b>3 ケーブル構造の形状決定解析</b>	<b>43</b>
3.1 ケーブル構造の形状決定問題	43
3.2 最適化手法による形状決定法	45
3.3 拡張最適化手法による形状決定法	47
3.4 形状決定問題の数値計算例	50
参考文献	55
<b>4 ケーブル構造の動的問題</b>	<b>57</b>
4.1 基礎方程式とその特徴	57
4.1.1 基礎方程式	57
4.1.2 種々の動的問題に対する支配方程式	60
4.1.3 波動方程式とケーブル内を伝播する 2 種の波動	61
4.2 ケーブルの振動解析	63

4.2.1	有限要素法による離散化解析	63
4.2.2	一般化変位を用いた離散化解析	64
4.2.3	有限要素法と一般化変位法を併用したケーブル構造の振動解析	66
4.2.4	特性曲線法による波動解析	68
4.3	ケーブルの固有振動	69
4.3.1	弦の固有振動固有振動	69
4.3.2	放物線ケーブルの固有振動	70
4.3.3	一般的なケーブルの固有振動	73
4.3.4	ケーブルの固有振動特性	75
4.3.5	ケーブルのモード減衰	77
4.4	ケーブルの連成振動	80
4.4.1	面外外力による非線形連成振動	80
4.4.2	面内外力によるパラメトリック連成振動	80
4.4.3	軸力変動によるパラメトリック振動	81
4.4.4	斜張橋における内部共振	82
4.4.5	内部共振が及ぼす斜張橋モード減衰への影響	84
4.5	ケーブルの振動制御の基礎	84
4.5.1	粘性ダンパーを有するケーブルの減衰解析	85
4.5.2	ケーブル連結による振動制御とその減衰効果	85
	参考文献	88
<b>5</b>	<b>シェル・膜構造の力学</b>	<b>91</b>
5.1	スペース構造の概説	91
5.1.1	シェルの構造特性	92
5.1.2	膜・張力構造の構造特性	96
5.2	3次元弾性論	100
5.2.1	曲面の数学的表示	100
5.2.2	3次元弾性論における力学量と基礎方程式の関係	102
5.2.3	直交曲線座標系	102
5.2.4	3次元弾性体の力学量と直交曲線座標系における基礎方程式	103
5.3	工学的シェル理論	105
5.3.1	工学的シェル理論の前提条件と仮定	105
5.3.2	ひずみ-変位関係式	106
5.3.3	応力と合応力および合モーメント	108
5.3.4	構成方程式(一般化 Hooke の法則)	109
5.3.5	つり合い方程式 (Hamilton の原理による誘導)	111
5.3.6	境界条件式	114
5.4	シェル構造の膜理論	117
5.4.1	膜理論の基礎方程式	117
5.4.2	軸対称荷重を受ける回転シェルの膜理論解	118
5.5	シェルの曲げ理論	119
5.5.1	軸対称荷重を受ける回転シェルの曲げ理論	119
5.5.2	曲げ理論の近似理論	122
5.6	偏平シェル	123
5.6.1	曲面形状	123
5.6.2	基礎方程式	124
5.6.3	基礎方程式の解	125

5.6.4	種々の形状を有する偏平シェルの解析例	126
5.7	膜構造	127
5.7.1	はじめに	127
5.7.2	基礎方程式	127
5.7.3	仮想仕事の原理に基づく基礎式の誘導	129
5.8	ケーブルネット構造	131
5.8.1	はじめに	131
5.8.2	2方向ケーブルネットの基礎方程式	131
5.8.3	主モードによる応力・変形解析	133
5.9	あとがき	134
	参考文献	135
<b>6</b>	<b>膜の形態解析</b>	<b>137</b>
6.1	概説	137
6.2	膜の形態解析	139
6.2.1	有限要素の幾何	139
6.2.2	適合関係	141
6.2.3	つり合い式	144
6.2.4	例題	146
6.3	膜構造の利用	147
	参考文献	150
<b>7</b>	<b>可動性と形態の力学</b>	<b>151</b>
7.1	可動性と形態	151
7.2	基礎式	155
7.3	一般逆行列と幾何剛性	155
7.3.1	一般逆行列の定義	155
7.3.2	ベクトルの一般逆行列	156
7.3.3	直交射影行列の性質	156
7.3.4	Bott-Duffin 逆行列	156
7.3.5	幾何剛性	157
7.4	剛体変位モードと自己応力	158
7.5	不安定構造物の構造解析	158
7.6	ひずみ零の挙動解析	160
7.7	解の存在条件	163
7.8	おわりに	165
	参考文献	165
<b>II</b>	<b>応用編</b>	<b>167</b>
<b>8</b>	<b>吊形式橋梁とその展開</b>	<b>169</b>
8.1	歴史と発展	169
8.1.1	吊橋の歴史と発展	169
8.1.2	斜張橋の歴史と発展	175
8.2	吊橋, 斜張橋の計画・設計法	179
8.2.1	吊橋の計画・設計法	179
8.2.2	斜張橋の計画・設計法	187

8.2.3	吊橋と斜張橋との対比	190
8.3	最近の新しい展開	195
8.3.1	ケーブルシステム橋梁	195
8.3.2	曲線吊形式橋梁	197
8.3.3	合成斜張橋	198
8.3.4	ケーブルトラスト橋	202
8.3.5	エクストラロード橋	205
8.3.6	吊床版橋	207
	参考文献	210
<b>9</b>	<b>吊形式橋梁の長大化に向けての設計・施工技術の開発</b>	<b>213</b>
9.1	静的安定問題と解析法	213
9.1.1	長大吊形式橋梁の静的安定問題	213
9.1.2	有限変位解析	213
9.1.3	変位依存型の風荷重を考慮した有限変位解析	219
9.1.4	弾塑性有限変位解析	220
9.1.5	有効接線弾性係数 ( $E_f$ ) 法	224
9.2	動的空力問題と解析法	226
9.2.1	風による発散振動	226
9.2.2	ガスト応答解析	231
9.3	振動制御技術	235
9.3.1	吊形式橋梁における振動制御技術	235
9.3.2	ケーブルの振動制御	236
9.3.3	塔の振動制御	240
9.3.4	全体系の振動制御	246
9.4	施工技術	249
9.4.1	吊橋ケーブル	249
9.4.2	吊橋, 斜張橋補剛桁	254
9.4.3	架設精度管理	255
9.5	吊橋の長大化に向けての技術展開	261
9.5.1	空力的・構造的的手法による耐風安定性の確保	261
9.5.2	ケーブルシステム	268
9.5.3	海外事例	285
9.6	斜張橋の長大化の可能性と課題	291
	参考文献	296
<b>10</b>	<b>空間構造</b>	<b>303</b>
10.1	空間構造の歴史	303
10.2	鉄筋コンクリートシェル	308
10.2.1	筒形シェル	309
10.2.2	球形シェル	310
10.2.3	鞍形シェル	311
10.2.4	任意形状シェル	311
10.3	スペース・フレーム	312
10.3.1	単層スペースフレーム	313
10.3.2	複層スペースフレーム	315
10.4	ケーブル構造	317

10.4.1 張力構造 . . . . .	317
10.4.2 張力構造の構造形態 . . . . .	317
10.4.3 ケーブル構造の構造形態 . . . . .	318
10.4.4 ケーブルドーム構造 . . . . .	319
10.5 膜構造 . . . . .	320
10.5.1 膜構造の構造形態 . . . . .	320
10.5.2 サスペンション膜構造 . . . . .	321
10.5.3 骨組膜構造 . . . . .	321
10.5.4 空気膜構造 . . . . .	322
10.6 半剛性構造と部分張力構造 . . . . .	324
10.6.1 半剛性構造 . . . . .	324
10.6.2 部分張力構造 . . . . .	324
10.7 おわりに . . . . .	326
参考文献 . . . . .	326
<b>11 宇宙における展開型ケーブル・膜面構造とその課題</b> . . . . .	<b>327</b>
11.1 はじめに . . . . .	327
11.2 テザー衛星の力学と収納時挙動 . . . . .	330
11.2.1 テザー衛星とその応用 . . . . .	330
11.2.2 テザー衛星の力学 . . . . .	331
11.2.3 収納時発散振動の制振 . . . . .	334
11.2.4 宇宙ケーブル構造の課題と展望 . . . . .	334
11.3 膜面構造の力学と収納時挙動 . . . . .	335
11.3.1 宇宙における膜面構造とその応用 . . . . .	335
11.3.2 太陽電池アレイの力学と収納時挙動 . . . . .	336
11.3.3 膜面の展開・収納挙動の解析 . . . . .	337
11.3.4 宇宙膜面構造の課題と展望 . . . . .	338
11.4 おわりに . . . . .	340
参考文献 . . . . .	340

## 序章

### ロングスパン構造とスペース構造

#### —— 本書の内容について ——

海峡を横断する長大橋梁や巨大な空間を創出する大建築物などはいつの時代においても人々の夢をかきたて、とくに構造工学に携わる者にとって強い技術的興味の対象であり続けてきた。現在では、建設技術の目覚ましい進歩により、支間長が2000mに近い吊橋が実現し、また、室内競技場や大劇場など多くの人間を収容できる空間構造として数万平方メートルの広がりを持つものが完成している。これからも技術の進歩とともに、ますます構造物の巨大化、長大化の夢が次々と現実のものとなり続けていくであろうと思われる。本書はこのような、いわゆるロングスパン・スペース構造について包括的に技術上の諸問題を論じ、また将来の展望を述べたものである。以下その内容について若干の説明をしておきたい。

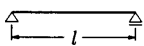

まず前半の「基礎編」においては、ロングスパン構造やスペース構造を形成する基本的な要素としてのケーブル、膜、シェル等について基礎的な力学上の取扱い方を説明している。後半の「応用編」では、これらの構造要素を組み合わせたいろいろの形態の構造物についての歴史的な展開や、現状および将来の技術の展望について述べている。

ロングスパン構造およびスペース構造という用語についてはとくに明確な定義はないが、通常、支間が数百メートルを超える橋梁をロングスパン構造の典型として、また、交差する2方向の支間長がそれぞれ数十メートル以上に及ぶ大空間建築をスペース構造としてとらえるのが一般のようである。しかし、本書ではこれら両者を別々の構造形態とは考えずに、表題にあるように「ケーブル・スペース構造」なる一つの範疇に属するものとして取り扱うことを基本の姿勢としている。

土木技術の分野では、ロングスパン構造の代表としての長大橋梁に関する成書は従来数多く出版されている。一方、建築学の世界ではスペースストラクチャーとして大スパン建築についての広汎な研究がなされている。そこで、もし、土木工学の長大橋梁に関する知識基盤の上に建築のスペース構造の技術を積み上げることができれば、また新しい形態の土木構造物への展望が開けるのではないかと考えられるのである。その意味で今後建築学の世界から学ぶべきことは極めて多い。本書のねらいとするところの一つはこのような技術の結合による土木構造物の新しい展開への一歩となることである。

さて、上述のように、基礎編では構造の基本要素の力学について詳説しているが、その中でもとくにケーブルについてはかなり多くのページが割かれている。すなわち、単一ケーブルに関する基礎方程式の誘導から、ケーブルトラス、ケーブルネット、その他一般のケーブル構造についての静力学的問題、形状決定問題、動的

表 1 単純桁、2ヒンジアーチおよび放物線ケーブルの自重による断面比較

	断面形状	構造寸法と荷重条件	$\sigma_{max}$	断面決定条件
単純桁 	I型断面 上下フランジ幅 $B$ 上下フランジ板厚 $t_f = B/20$ 腹板高さ $H = 4B$ 腹板板厚 $t_w = 4B/100$	スパン $l$ 水平方向等分布 $w = \gamma A$	$0.1069\gamma l^2/B$	たわみ制限 $\delta_{max} < \frac{l}{1000}$ $5.70 \times 10^{-3}\sqrt{l} < \frac{4B}{l}$
2ヒンジアーチ 	パイプ断面 直径 $D$ 板厚 $t = D/50$	スパン $l$ ライズ $f = l/10$ 水平方向等分布 $w \cong \gamma A$	$1.346\gamma l$	面外および面内座屈 $\sigma_{max} < \sigma_{ta}$ $4.286 \times 10^{-4}\sqrt{l} < \frac{D}{l}$
放物線ケーブル 	円形断面 直径 $D$	スパン $l$ サグ $f = l/10$ 水平方向等分布 $w \cong \gamma A$	$1.346\gamma l$	許容応力 $\sigma_{max} < \sigma_{ta}$ $1.346\gamma l < \sigma_{ta}$

問題などの全般にわたって詳細に述べており、これが本書の大きな特徴となっている。

ケーブルが長大橋梁で主要な役割を果たすことが多いのは言うまでもないが、大空間構造の分野でも、近年コンクリートシェル構造などがコスト面の制約から建設される機会が少なくなり、それに代わって膜やケーブルネットの組み合わせによるものが登場しており、この方面でもケーブルに関する力学的知識の重要性が増してきている。このような技術の趨勢にも関わらず、ケーブルに関する詳細な力学的取扱いを示した成書がほとんど見られないのが現状であり、これがまた本書を企画した大きい動機ともなっている。

ところで、ケーブルがこれらの構造物で多用される理由について簡単な考察を加えてみたい。ケーブルには引張り力のみが作用するから、その材料強度の限界まで耐荷性能が期待できるというのは周知の理由である。そこで具体的に、通常の橋梁で用いられる構造形態として、単純ばり、2ヒンジ放物線アーチおよび放物線ケーブルを単材として比較してみよう。これら相互間の力学的相違点は観念的には自明のことではあるが、以下に具体的な数値をもって考察してみる。

まず、表1にこれら三者の断面設計のための条件を示している。荷重としてはいずれも自重のみとし、断面は、はり、アーチ、ケーブルのそれぞれについて、I形、パイプ、円形とする(材料はすべて鋼)。また、はりには横倒れ座屈などを生じないように面外には拘束されているものとする。

はりでは断面内の応力度が縁端で最大になり、中立軸近傍の断面要素は有効に耐荷性能に寄与しない。また、スパンが大きくなるにつれて自重の影響が支配的になり、自重によるたわみがスパンの4乗に比例して増大するため、たわみ制限で断面が決定される。アーチでは面外座屈と面内座屈が断面決定の条件となる。ケーブルでは材料の破断強度より決まる許容応力度が断面決定の条件になる。アーチとケーブルにおいて自重(=  $\gamma A$  :  $\gamma$ は単位重量、 $A$ は断面積)は支間方向(水平)に等分布すると仮定すると、アーチは軸力のみを受けるが、この場合自重によるたわみは十分に小さく、たわみ制限が断面の決定条件にはならない。放物線ケーブルについても同様である。表1の最大応力度の欄に示したように、アーチとケーブルの場合には応力度は断面の大きさに関係しない。アーチの場合、厳密には軸線の伸縮を考慮すると断面の大きさが関係するが、その影響は十分に小さいので無視できる。

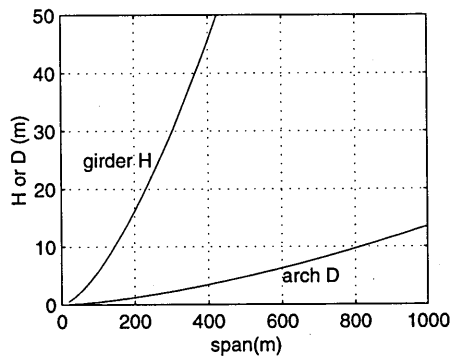


図 1: 単純桁の桁高さ ( $H$ ) および 2 ヒンジアーチの断面径 ( $D$ ) とスパンの関係

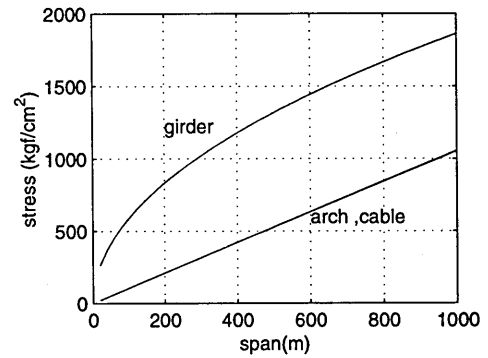


図 2: 最大応力とスパンの関係

以上の条件のもとで設計されたはり断面の高さとアーチ断面の直径が、スパン長とどのような関係にあるかを図 1 に示す。ケーブルではスパンと断面の大きさとは無関係である。単線のワイヤも、ワイヤを束ねたケーブルも同じスパンであれば自重による応力度は等しい。図 1 より、単純に考察してスパンを 100m とすると、はりの高さは 6m (フランジ厚 75mm) と設計の常識を超えた値となり、自重のみでもスパンの限界に達することになる。実際には横倒れ座屈や局部座屈の影響でさらに短いスパンで限界となる。アーチの場合には、スパンを 500m としてもパイプ断面の直径は 5m (肉厚 100mm) 程度ですみ、はりの場合よりはる大スパンへの適用に希望が持てる。

図 2 には、図 1 の条件のもとでのスパン長と最大応力度の関係を示している。アーチとケーブルの最大応力度はほとんど等しく、スパンに比例して増大する。アーチの場合、スパン長が 1000m でも最大応力度は 1050 kgf/cm<sup>2</sup> 程度であり、材料強度の面からはこの程度のスパン長でも適用可能といえる。ただし、座屈安定性を考えるとパイプ断面の直径は 13m、肉厚は 260mm となり、常識的な製作上の限界を超える。一方、高強度鋼のワイヤを用いたケーブルでは許容応力度を 6000 kgf/cm<sup>2</sup> 以上に設定できるので、自重のみの場合スパン長の限界値は 5000m を超えることになる。

以上の簡単な例からもわかるように、スパン長が数百メートルを超えるロングスパン構造では、アーチやケーブルなどの軸力部材が効果的となる。軸力部材では、応力が断面全体に均等に分布することと、両端の水平変位を拘束することにより剛性が格段に高まることとその理由である。その反面、両端で大きな水平反力を吸収するためのアンカーが必要となる。ケーブルとアーチを比べると、アーチでは座屈安定性を確保するために曲げ剛性が必要となるが、ケーブルでは自重だけでは断面の大きさは支間長に関係せず、活荷重などが作用してもケーブルを構成する素線の数を増やすだけで対応でき、製作上の制限はない。また、ケーブルは初期応力を与えれば幾何剛性による剛性向上の効果も期待できる。ケーブルを多用することによって、はじめて支間数百メートル以上のロングスパン構造が実現できるのは基本的には以上のような理由によると考えてよい。

さて、立体的な空間を創出するスペース構造では、その構成要素としては、アーチのような線の部材だけではなく、面的な広がりを持った部材が用いられることになる。はりを曲げてその両端の水平変位を拘束してアーチにすると剛性が増し、自重のような等分布荷重に対しては軸力で抵抗できるのと同様、本来曲げで外力に抵抗する平板を曲げて、縁辺で水平変位を拘束したシェル構造にすると、面内力で自重などに抵抗できるようになる。しかも、シェル構造では周方向(フープ)力が存在するので、アーチの場合よりさらに剛性の向上が見られる。縁辺に周方向リングを設置して外側への水平変位を拘束するとアンカーも不要になる。ただ、アーチもシェルも集中荷重に対する剛性は小さく、局所的な曲げ応力が卓越するほか、分布荷重であっても、それが部分的に偏載されると曲げ応力と変形が大きくなる。



アーチを3次的に拡張したのがシェル構造であることを見るのが出来るのに対し、ケーブルを同様に拡張したものが膜構造であると考えられる。膜部材がケーブルと組み合わせて用いられることが多いのは両者の力学的性質が似通っていることによる。膜の場合も、材料強度をフルに活用できること、初期応力(幾何剛性)による剛性向上が期待できることなどケーブルと類似の性質が見られる。また、ケーブルや膜を組み合わせてケーブルネットや膜構造を構成する場合に、無応力状態では一般に不安定になり、初期張力により安定化する必要があること、圧縮力には抵抗できない部材であるので、ゆるみやしわが生じないようにつり合い状態と目標形状を定める形状決定解析が必要なことも共通している。

ケーブル・スペース構造の大きい特徴の一つは、本書の第10章にも述べられているが、その造形の自由さにあり、通常のはりやラーメンなどの構造要素では考えもつかなかった大胆な発想の形態をもつものが生まれる可能性を有することである。写真1は1972年に完成したミュンヘンオリンピックのメインスタジアムである。このケーブルネットの大吊屋根についての毀誉褒貶はさまざまであったが、これが一時代を画した構造物であったことは間違いない。写真2はこれに隣接する競泳場の吊屋根を地上で組み上げているところである。写真3は実現こそしなかったが、そのアイデアの斬新さで注目を集めたアメリカのRuck-a-Chucky橋の想像図である。いずれも従来の構造物の概念を超えた形態のもので、構造技術者の関心を引くところはまことに大きいものがあつた。

さて、未来の構造物としてどのようなものが考え出されるであろうか? 建設工事現場全体をケーブルネットと膜で覆って全天候型にする、山間を覆って新しい居住空間を作る、海浜の巨大人工土地や市街地全体を覆って巨大都市空間を創出する、などと壮大なアイデアは尽きないし、さらには遠く宇宙空間の構造物にまで思いは広がる。いずれもケーブル・スペース構造ならではの発想であり、技術者の夢は未来に向かって大きくふくらむのである。



写真 1: ミュンヘンオリンピック・メインスタジアム

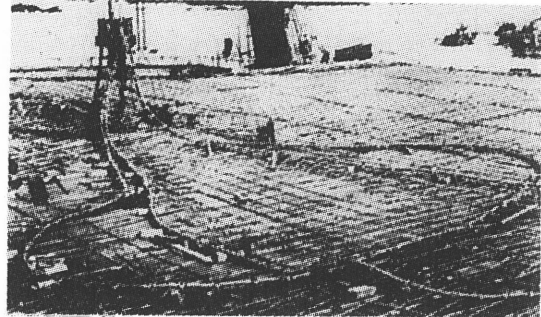


写真 2: 競泳場吊屋根の組み上げ(ミュンヘン)

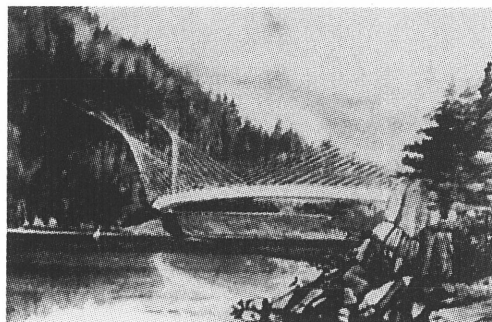


写真 3: Ruck-a-Chucky 橋(想像図)