

Die Severinsbrücke Köln, Entwurf und Fertigung der Strombrücke (ケルンゼヴェリン橋河川部橋梁の設計と施工)

著者	誌名								ページ	図数	表数	抄録		査読
H. Hess	Der Stahlbau, 1960, 8.								225 261	87	12	下瀬健雄	成瀬輝男	
												石川島播磨重工業	石川島播磨重工業	
分類	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	備考	
	一般	計画	設計	解析	構造	製作	材料	ケーブル	架設	実験	耐風	その他		
関連ある番号に○印を, 特に詳細なものに◎印を付けた。														

1. 設計概要と設計条件に対する考察

1.1 計画経緯

ケルン市の都市計画でKöln-Deutz橋の上流約600mに新しい橋が必要となり, 競争設計が行われた。その結果, 周囲の環境との調和とケルン市の地方的特色, とくにライン左岸の2つのドームを重視して, 右岸側に三角形の塔を配置した斜張橋が採用された。ケーブルは塔の頂点から放射状に分散しているため, ケーブル同士が交差することがないという特徴をもっている。

1.2 設計条件

図2.8.1 縦断面 図2.8.2 標準断面を参照。

1.3 構造系諸元

図2.8.3 一般図を参照。

箱桁の高さはケーブル吊径間で4.57mで, 橋台に向かって約3mまで減少する。

鋼床版の板厚は10mm, 横桁間隔は約2m, 縦リブ間隔は31cmである。鋼床版中央の剛性を増すために, 鋼床版中央に横桁とほぼ同じ剛性を有する縦桁を配置した。

斜の塔柱は4.212mの間隔で橋脚上で剛結され, ケーブルが集中している塔頂では, 4つのケーブルサドルと定着構造を有する。塔柱は側面では基部で4.17m, 頂部で3.36mと上部に向かって細くなっているが, 前面では基部で3.72m, 頂部で4.60mと逆に太くなっている。

ケーブルはロックドコイルを使用しているが, その束ね方は従来吊橋に使用された六角形はやめて四角形断面を選んでいる。各ケーブルの大きさは次のとおりである。

ケーブルⅠ: 340×250mm, ケーブルⅣ: 340×340mm
 ケーブルⅡ: 280×210mm, ケーブルⅤ: 210×210mm
 ケーブルⅢ: 170×170mm, ケーブルⅥ: 150×150mm

1.4 荷重と鋼重

1.4.1 死荷重

表2.8.2 河川橋の鋼重と鋼種

構造部分	死荷重 t	St37 t	St52 t	Cs52.1 C35他 t	軌道, ロープ他
主桁	6866	1369	5497	-	-
塔	708	59	645	3	Alu 1
脊, サドル	90	4	5	80	Aiu+Blei 1
脚柱	63	11	52	-	-
高欄	61	61	-	-	-
軌道	160	-	27	-	St70180 133
ケーブル	601	-	-	-	601
	8549	1504	6226	83	736

橋面積 $2950 \cdot 690.86 = 20380 \text{ m}^2$
 鋼重 $\frac{8549}{20380} = 0.418 \text{ t/m}^2$
 (軌道を除く) $\frac{8389}{20380} = 0.412 \text{ t/m}^2$

主桁の補強は橋脚2, 3上とケーブル定着点で行われ, 腹板厚はケーブル定着点で12mm, 他は10mmである。

表2.8.2 補剛桁の荷重

鋼重	1主桁当 死荷重t	1主桁当荷重強度		
		無軸径間 t/m	軸力支間 t/m	全体 t/m
主桁	1745	2.41	2.64	2.52
鋼床版	1570	2.22	2.28	2.26
ケーブルサドル他	104	0.08	0.22	0.15
1主桁当ケーブル重量	150	-	0.43	0.22
軌道, 高欄他	125	0.18	0.18	0.18
1主桁当鋼重	3694	4.89	5.75	5.33
その他	1187	1.71	1.71	1.71
1主桁当死荷重	4881	6.60	7.46	7.04

1.4.2 活荷重

適用荷重は D I N 1072 (橋格 60), その他である。

衝撃係数は主桁に対し $\varphi = 1.04$, 横桁に対し $\varphi = 1.05 \sim 1.10$, 縦リブ, デッキプレートに対し $\varphi = 1.40$ とする。

等分布活荷重は 5.72 t/m , これに対し死荷重は 7.36 t/m である。

1.4.3 その他の荷重

風荷重, 制動荷重, 沓の摩擦力は D I N 1072 による。

橋脚 2, 5 のロッカー柱は引張圧縮支承である。

温度変化, 構造各部の温度差による応力照査は 6 つの場合を想定した。

橋脚 1, 2, 5 のロッカー柱の傾斜により主桁に橋軸方向の力が作用する。この力は塔基部の主桁固定沓により支持される。

2. 河川橋の静的計算

2.1 1 次不静定主桁系の計算

2.1.1 静定系の計算条件

D I N 1073 に基づいているが, 許容応力は B E および $\epsilon = +1$ に対する D V 8 4 8 に準拠しやや高目にとられている。

主桁に軸力の導入される斜吊の範囲では縦断線形の影響を多角形状で考慮し, 活荷重の変形に対しては 2 次理論を導入し近似収斂させる。

2.1.2 死荷重状態

2.1.2.1 死荷重とプレストレスの導入 (省略)

2.1.2.2 キャンバー

鋼床版の有効幅は架設中の支間長および荷重状態によって異なってくるので, 架設中の各状態毎に計算した。

工場におけるキャンバーの調査は, 2 つ及至 3 つの主桁ブロックを連結して照査・修正した。鋼床版のデッキプレートは縦・横方向とも現場溶接されるが, 横断方向の溶接を先に行い収縮拘束を回避した。キャンバーはブロック継手部で折曲げてつける。

ケーブルの活荷重に対する見かけの弾性係数は偏差 3 % で 1620 t/cm^2 , サグを考慮すると平均 1560 t/cm で, この値は一定値として仮定しえたが, 死荷重に対する弾性係数は個々に調査して決定した。ケーブルの弾性伸びについては, 先ず既往の例から数値を仮定し, 最終的に使用ケーブルについて実験を行ってその値を比較修正した (表 2.8.3)。

ケーブルの長さの計測誤差と弾性係数のばらつきに対する調整は, 塔部とケーブルアンカーのライナー調整で行う。

表 2.8.3 ロープの伸び

ケーブル	調整応力 $\sigma_E (\text{t/cm}^2)$	死荷重応力 $\sigma_g (\text{t/cm}^2)$	見かけの弾性係数 $E_l (\text{t/cm}^2)$	ロープ張力調整から死荷重載荷時までの伸び $\Delta l (\text{mm})$
I	0.780	3.764	1250	462
VI	0.780	3.375	1240 1220	347 356
II	0.610	2.863	1265 1255	222 227
V	0.610	2.839	1200	195
III	0.350	1.839	1200	100
IV	0.350	2.331	1210	122

2.1.2.3 死荷重による断面量

プレストレスを含む死荷重による曲げモーメントおよび軸力を図 2.8.4 に, 主桁のせん断力, 図 2.8.5 に示す。

2.1.3 活荷重による軸力および曲げモーメント

2.1.3.1 影響線の計算

最大曲げモーメント, 最大せん断力, 最大軸力を図 2.8.6 a~d に示す。

2.1.4 2 次理論の (2 次変形) の影響

Walking によれば, 斜張橋では 2 次理論の影響は少ない。この影響を曲げモーメントについて計算した結果を表 2.8.4 に示す。ケーブル張力についてはこの影響は $\pm 1 \%$ 以内である。

表 2.8.4 2 次理論による曲げモーメント

点	$\min M^I$ (tm)	ΔM (tm)	増加量 (%)
3	-24629	-261	1.1
4 (ケーブル I)	-5880	+56	-0.9
5 (ケーブル II)	-9217	-88	1.0
5.5	-3113	-145	4.7
7 塔	-4052	-51	1.3
8.5	-2391	-152	6.4
	$\max M^I$		
8.5	+4049	+90	2.2

2.2 静的風荷重載荷状態の橋梁

2.2.1 静的構造系 (省略)

2.2.2 風荷重による曲げモーメントと反力 (省略)

2.3 温度変化, 制動, 摩擦力による断面力 (省略)

2.4 塔のAシステム計算

2.4.1 静定構造系(省略)

2.4.2 断面力(省略)

2.5 橋梁の立体作用

2.5.1 ダイヤフラム(省略)

2.5.2 塔頂にケーブルを集中する効果

橋梁の振り剛性はケーブルを塔頂に集中することにより高められる。図2.8.7に塔頂に仮定した不静定力 X_{12} を示し、その影響線を図2.8.8に示す。最大値は650tであるが、これは上下流両サドル間の曲ったダイヤフラムで93%まで伝達される。

2.6 塔頂におけるケーブルの方向変化，定着による支承反力およびその差

2.6.1 ケーブルⅠ／Ⅵ

図2.8.9に示すとおりケーブルⅠは12本のロープを有し、ケーブルⅥは16本のロープを有する。このうち4本のロープはサドル上で定着される。12本のロープのサドルへの圧縮力は2420t、直接塔に定着される4本のロープの成分は430tである。

ケーブルⅠとⅥのケーブル張力の差は、ロープ間に摩擦板を置くことにより吸収するように考えられている。

ケーブル支圧面の摩擦係数について実験を行い、平均的な数値として0.22を得たが、安全をみて実験値のばらつきを最下限をとり、計算上の摩擦係数は $\bar{\mu} = 0.10$ としている。摩擦面は実際には6面あるが、計算上は均等な支圧をうける摩擦面として半分の3面のみを考慮している。

摩擦板に導入された力は高力ボルトの締付力によってサドルに導入され、さらに上下流サドル間に曲面のダイヤフラムが設けられていて、両サドル間の力の差を伝達している。

2.6.2 ケーブルⅡ／Ⅴ

ケーブルⅡの12本のロープのうち3本は塔頂で定着される。活荷重によるケーブル張力差は最大520t、最小-363t、死荷重による張力差9tである。最大529tの力が上段ケーブルと同じ要領で摩擦板により2.5の安全率でサドルに伝達されている。

2.6.3 ケーブルⅢ／Ⅳ

最大張力はケーブルⅢ801t、ケーブルⅣ641t。

サドルの構造を図2.8.10に示す。ケーブルの長さ調整は桁側定着部で行うので、ソケットはその装着作業が可能

範囲で相互に接近して位置している。スプレーサドルは塔外に設けられているが、下方へずれることがないようにダイヤフラムに側方から固定されている。

2.6.4 ダイヤフラムの応力(省略)

2.7 主桁のスプレーサドルの作用力の決定

ケーブルはスプレーサドルにおいて鉛直面内および平面方向でロープの方向を変え、主桁の外側の腹板のすぐ内側にあるアンカー構造に定着される。スプレーサドルの側壁には、多少の移動の可能にするためにローラー支承が設けられている。

2.8 床版構造の計算

2.8.1 直交性床版の計算

鋼床版の縦リブ間隔は約0.31m、横リブ間隔は約2.0mである。基本理論はG. Fischerの計算方法を使用している。

縦リブとデッキプレートの衝撃係数 $\varphi = 1.40$ 、横桁は $\varphi = 1.10$ とする。デッキプレートの応力は主桁作用、格子作用、局部デッキプレート応力を重ね合わせて決定される。許容応力は縦リブの応力の重ね合わせに対して $\sigma = \pm 2.4 \text{ t/cm}^2$ (St52)、デッキプレートの応力の重ね合わせに対して $\sigma = 3.6 \text{ t/cm}^2$ (St52)、デッキプレートの局部応力に対しては 2.7 t/cm^2 である。

デッキプレートと縦リブの座屈安全率は $\nu \geq 1.15$ 、弾性支承上の縦リブの座屈係数は横リブ付近で $k = 1.25$ 、横リブと横リブの間で $k = 0.9$ である。

2.8.2 歩道と自転車道の計算

自転車および歩道は主桁の上フランジでもあり、曲げ圧縮材として応力が作用する。設計断面力は死荷重および活荷重 $0.3 \sim 0.5 \text{ t/m}^2$ で設計され、縦リブは主桁作用も含めて断面が決定される。

3. 主桁の構造

3.1 通常の主箱桁

箱桁の外側の腹板は、外側から1.05mの間隔でT形の垂直補剛材で補強されている。一般の垂直補剛材は3.5m間隔で、7m間隔で対傾構形ダイヤフラム、4.0～5.0m間隔でダイヤフラムが配置されている。縦リブは腹板についてはL150×100×8、その他の部材はフラットバーを使用している。両主箱桁間には検査車が設けられている。箱桁の継手は1.5～1.6mおきで、リベットにより添接されている。

3.2 主箱桁のケーブル定着

図2.8.1.1にケーブルⅥの定着概要を示す。

ケーブルの水平方向の力は、中間縦ダイヤフラムを通して上下フランジに伝えられ、垂直成分は一部横ダイヤフラムを通して主桁腹板に伝えられる。

ケーブルⅥの定着点のみ、全量1640tの負反力のうちカウンターウェイトとして箱桁内にコンクリートを600t余り充填している。この場合、沓へ伝達される負反力は1026tとなる。ケーブル定着部は、設計死荷重全量が載荷した状態でもジャッキ操作によりケーブル張力調整ができるように、背後に十分な空間が設けられている。特にケーブルⅥ定着部には、この目的のために厚さ192mmの鍛鋼が使用されている。他の定着部はすべて溶接構造である。

4. 直交性床版、横ダイヤフラム、歩道、高欄の構造

車道部の鋼床版デッキプレートの板厚は10mmが基準で、必要に応じて板厚を増し12～25mmと補強する。床版パネルの最大ブロック幅6.48m、最大長16.14m、最大重量30tである。鋼床版のデッキプレートと縦リブ腹板と下フランジ間のすみ肉溶接は3.5mmのサイズで行われた。

デッキプレート相互間の橋軸方向の継手は、裏当金を使用して上方から現場溶接される。横方向については、まずデッキプレートの上から、次に下面の溶接作業を行う。縦リブの現場継手も溶接である。歩道床版は約10.5m間隔に配置されているブラケットにより支持され、3.5mおきに主箱桁と側桁とに支持された中間横桁が配置されている。

5. 塔の構造

5.1 塔基部と塔における主桁の固定支承

圧縮力をうける塔は原則としてリベット構造である。ただし塔柱外壁板の突合せ溶接、塔頂部、支承部、塔基部は溶接構造である。塔柱外壁板は最大30mm厚で、ブロック重量は90tである。そのためパネルで現地に送り、組立て後フローティングクレーンで架設した。

5.2 塔柱

塔柱のブロックは5個あり、各々約16mの長さである。概要は図2.8.1.3のとおりである。

5.3 ケーブルサドル支承とケーブル定着部を有する塔頂

塔頂部の構造は、前後各ロープの張力がかなり相違している

ため、全ケーブルのソケットを塔頂で定着構造に固定し、さらにコンクリートで充填する案も考えた。

その他種々の案を比較検討した上、前記のような一部のケーブルのみ固定する構造としたものである。

溶接構造のサドルは、格子状の梁の上フランジでの役割も果たす。ロープのサドルにおける支圧応力を少なくするため、スプレーサドルの曲率半径をできるだけ大きくしている。すなわち、下段・中段のケーブルで $R = 6.2\text{ m}$ および 4.0 m である。サドルにおける各ロープの支圧力を均等化する目的で、アルミ板が支圧面に用いられている。厚さ1～2mm、純度98%である。塔頂部の水仕舞が完全であること、ロープ多層の防錆皮膜などから、鋼材の間にアルミ板を挿入することによる電気的な腐蝕の発生は心配ない。

6. 支 承

6.1 主箱桁内のスプレーサドル

図2.8.1.3参照

6.2 橋脚0, 3, 6のローラー沓

橋脚0, 6の位置には主桁の腹板直下にそれぞれ300mm, 400mmの直径の1本のローラの沓がある。港湾地区である関係から視界を妨げないことを考慮し、橋脚を出来るだけ細くするために、支承も小形にしたものである。

とくに橋脚3は35mm厚の鋼管の内部にコンクリートを充填し、これを合成させて1.7m径の下端固定の細い柱としている。400mmの直径の1本ローラー沓の荷重は1823tである。

6.3 ロッカー橋脚1と2の上下の沓

橋脚1では940t、橋脚2では1178tの反力が作用し、ロッカー本体は10～12mm厚の鋼板でカバーされたコンクリート柱である。ロッカーの上下沓は全方向に回転するピボット沓を使用している。

6.4 主桁の塔部固定支承

主桁から突出するブラケットが塔柱内部に貫入し、ピボット沓で固定されている。この沓に作用する力は鉛直反力941t、水平反力364tである。

6.5 引張圧縮橋脚としてのロッカー橋脚5

この橋脚は中にコンクリートを充填した直径1.3mの円筒

状脚で、12 mmの鋼板で外側がカバーされている。下側の杓は橋軸方向のみ回転するようになっている。最大張力は1026 t、最大圧縮力は444 tである。

7. 車道および歩道の伸縮装置

設計の対象とする移動量は±250 mmで、60 tの車輛対

して設計がなされた。







8. ロープおよびロープの調査

8.1 構造部材としてのロープ

8.1.1 ケーブルの配置

ケーブルの配置、径などは図2.8.1.5に示す。

表 2.8.5 ケーブル諸値

ケーブル	形状	本数 n	直径 φ mm	1本の 断面積 F _l cm ²	合計の 断面積 F _{ges} cm ²	Kg	minK _p t	maxK _p t	K _{min} ^H K _{max} ^H ケーブル 中央 t/cm ²	σ _g t/cm ²	minσ _p = $\frac{\text{min}K_p}{F_{ges}}$ t/cm ²	maxσ _p = $\frac{\text{max}K_p}{F_{ges}}$ t/cm ²	疲 勞 強 度				
													0.6 minσ _p t/cm ²	0.6 maxσ _p t/cm ²	σ _u =σ _g +0.6 minσ _p t/cm ²	σ _o =σ _g +0.6·σ _p t/cm ²	Δσ= σ _o -σ _u t/cm ²
1		12	84.4	49.34	593	2232.6	-69.7	888.9	2162.9 3121.5	3.764	-0.118	1.499	-0.071	0.899	3.693	4.663	0.970
6		16	84.4	49.34	790	2666.3	-404.0	1567.2	2262.3 4233.5	3.375	-0.511	1.984	-0.307	1.190	3.058	4.565	1.497
2		12	68.9	32.86	395	1131.0	-17.2	1007.2	1113.8 2138.2	2.863	-0.044	2.550	-0.026	1.530	2.837	4.393	1.556
5		9	68.9	32.86	295.74	839.7	-27.5	580.5	812.2 1420.2	2.839	-0.093	1.963	-0.056	1.178	2.783	4.017	1.234
3		4	84.4	49.34	197.36	362.9	-99.8	423.8	272.1 786.7	1.839	-0.460	2.147	-0.276	1.288	1.563	3.127	1.564
4		4	72.5	36.17	144.68	337.3	-85.4	298.0	251.9 635.3	2.331	-0.590	2.060	-0.354	1.236	1.977	3.567	1.590

直線状態の使用ロープのみかけの弾性率は1620 t/cm² ±3%が規定され、実験により確認された。活荷重満載時には、ほぼこれに等しい値になるわけであるが、実際のロープにおける数値のばらつきを考慮し、また活荷重を満載から1/3 載荷の状態に減じたとき E = 1510 ~ 1560 t/cm²に落ちることを考えて、計算においては1560 t/cm²を使用した。

8.1.2 ケーブルとロープの構成

各ケーブルの数、配置、直径を表2.8.5に示す。またロープ断面を図2.8.1.6に示す。

8.1.3 ロープの強度と応力

ワイヤーの強度は、計算上仮定している破断強度に対して8%の余裕が保証され、ロープの作用力に対し2.5倍の安全率を有する。ロープの疲労強度試験が横方向支圧力作用状態で行なわれた。疲労照査を要求された条件は、応力振幅1.6 t/cm²、横支圧力1.86 t/cm、繰返し回数200万回などで、活荷重に対しては設計荷重の60%のみ考慮されている。

8.2 ロープ材料と材料試験（省略）

8.3 弾性係数とロープのマーキング

ロープのみかけの弾性係数は、設計荷重になるまでの段階で変化するが、これは張力-変形図により把握できる。

これに加えて、既往のデータからロープ長の径年変化を推定してロープ長およびシム厚を決定した。

8.4 ロープソケットと鑄込み

ロープソケットの構造は図2.8.1.7のとおりである。

ソケットへの金属注入時には、ソケットはあらかじめ180° ~ 200°Cに暖められ、350°Cの鉛-亜鉛-アンチモン合金が注入される。ワイヤーとこの合金間の許容付着強度は0.20 kg/mm²である。

8.5 疲労強度試験（省略）

付 本橋の荷重試験についての報告は以下に目次のみ示し内容抄訳は省略する。

載荷実験

1. 載荷実験の目的
2. 測定方法とその精度
3. 測定位置の計画

4. 車両配置

- 4.1 移動荷重
- 4.2 静止荷重

5. 移動荷重による測定結果

- 5.1 4.333点
- 5.2 1.5点

6. 制動試験結果

7. 静止荷重による測定結果

- 7.1 主桁の応力とたわみ

7.2 ケーブルの応力

8. 主桁測定的基础となる計算方法と測定結果の考察

9. 活荷重による橋梁のねじれとたわみ

- 9.1 点1.5のねじれ
- 9.2 河川部支間点3.5から点6までのねじれ
- 9.3 たわみ

10. 軸力のない89.13m側径間支間(支間6/7)の荷重

分布横ダイヤフラム連結部の調査

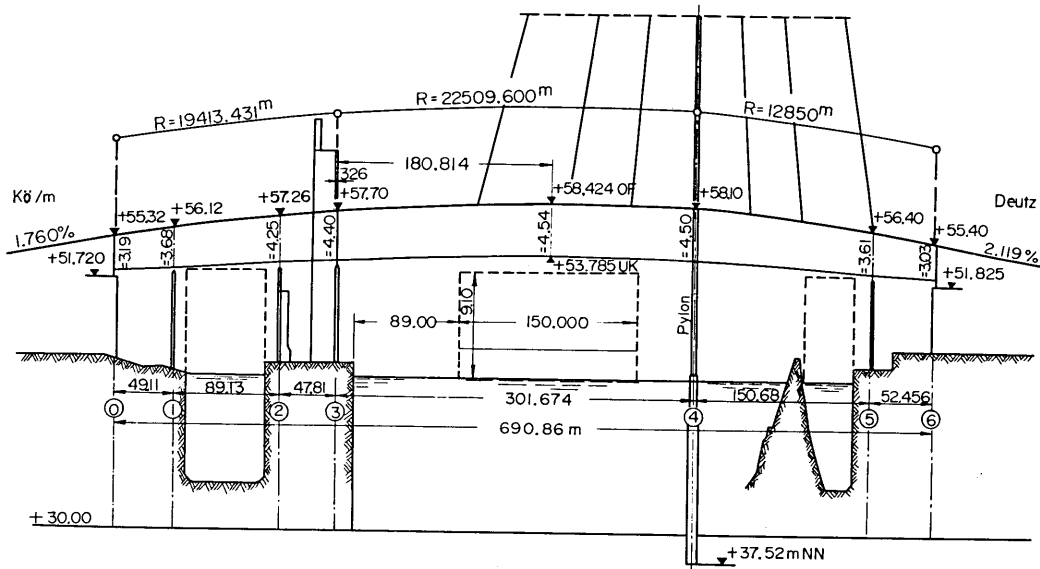


図28.1 基本縦断

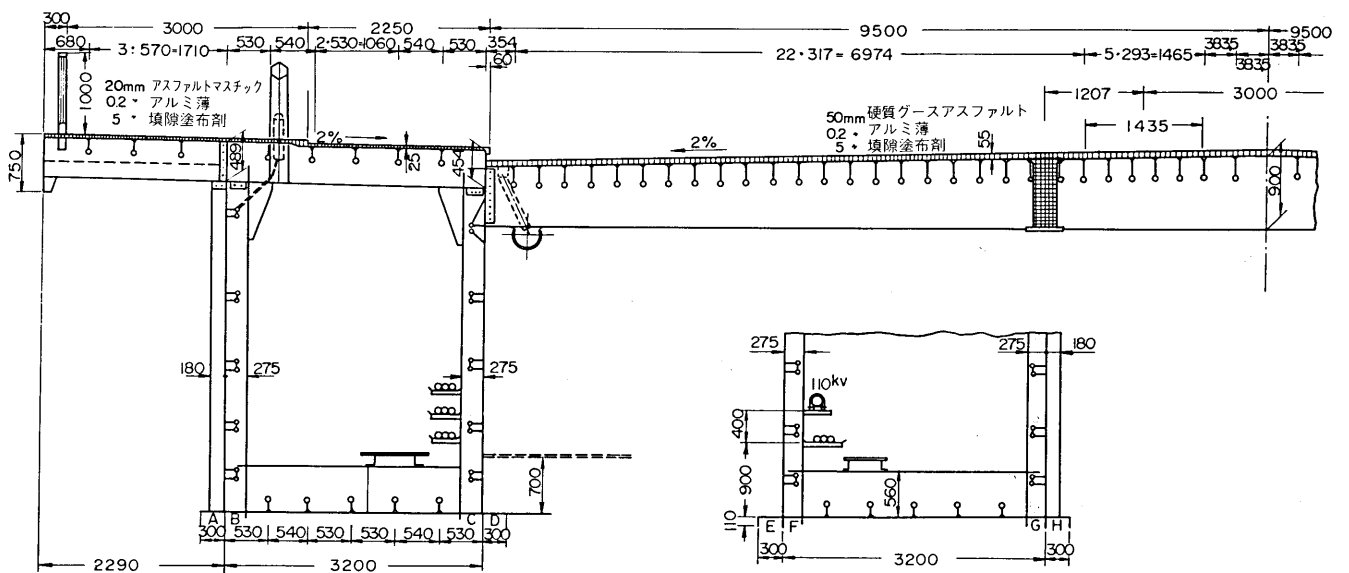


図28.2 主桁断面

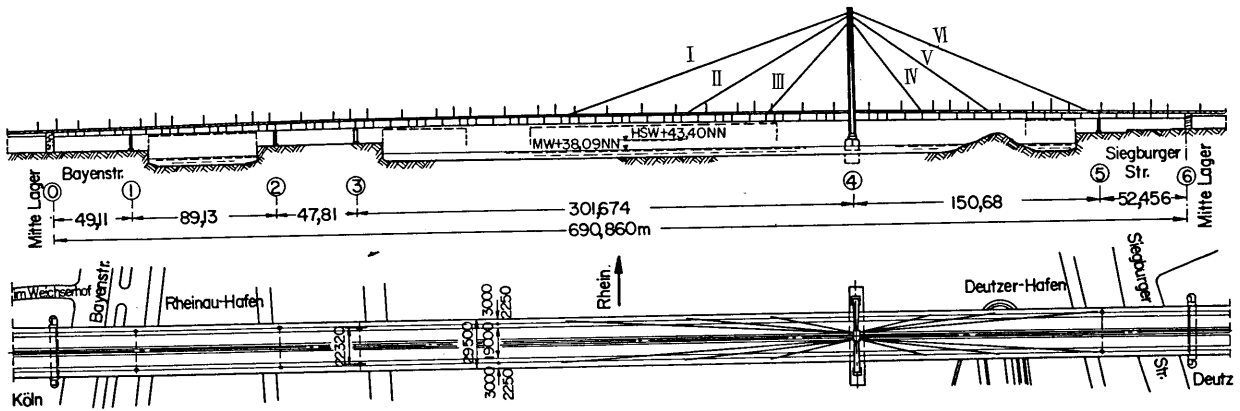


図 2.8.3 一般図

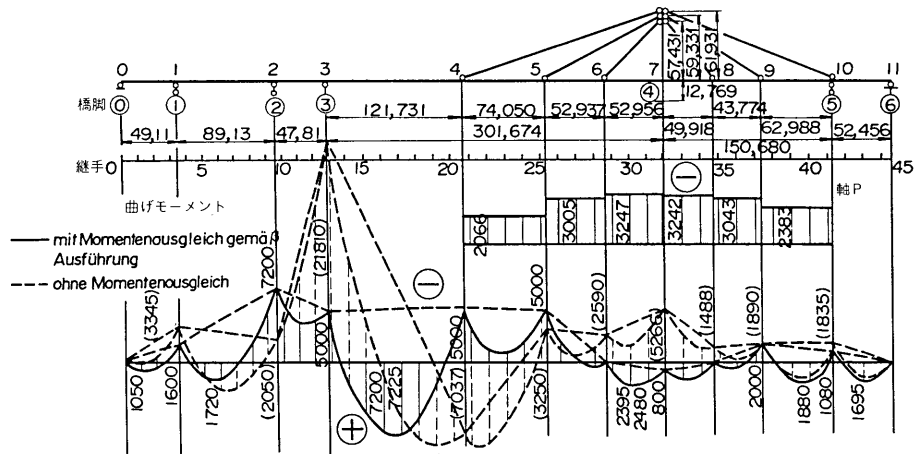


図 2.8.4 死荷重による主桁の曲げモーメントと軸力

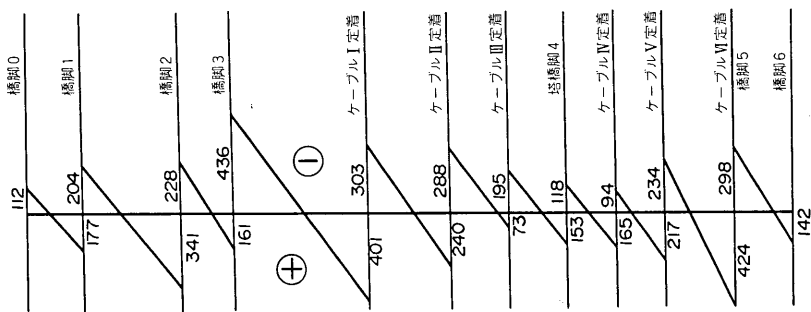


図 2.8.5 死荷重による主桁の剪断力

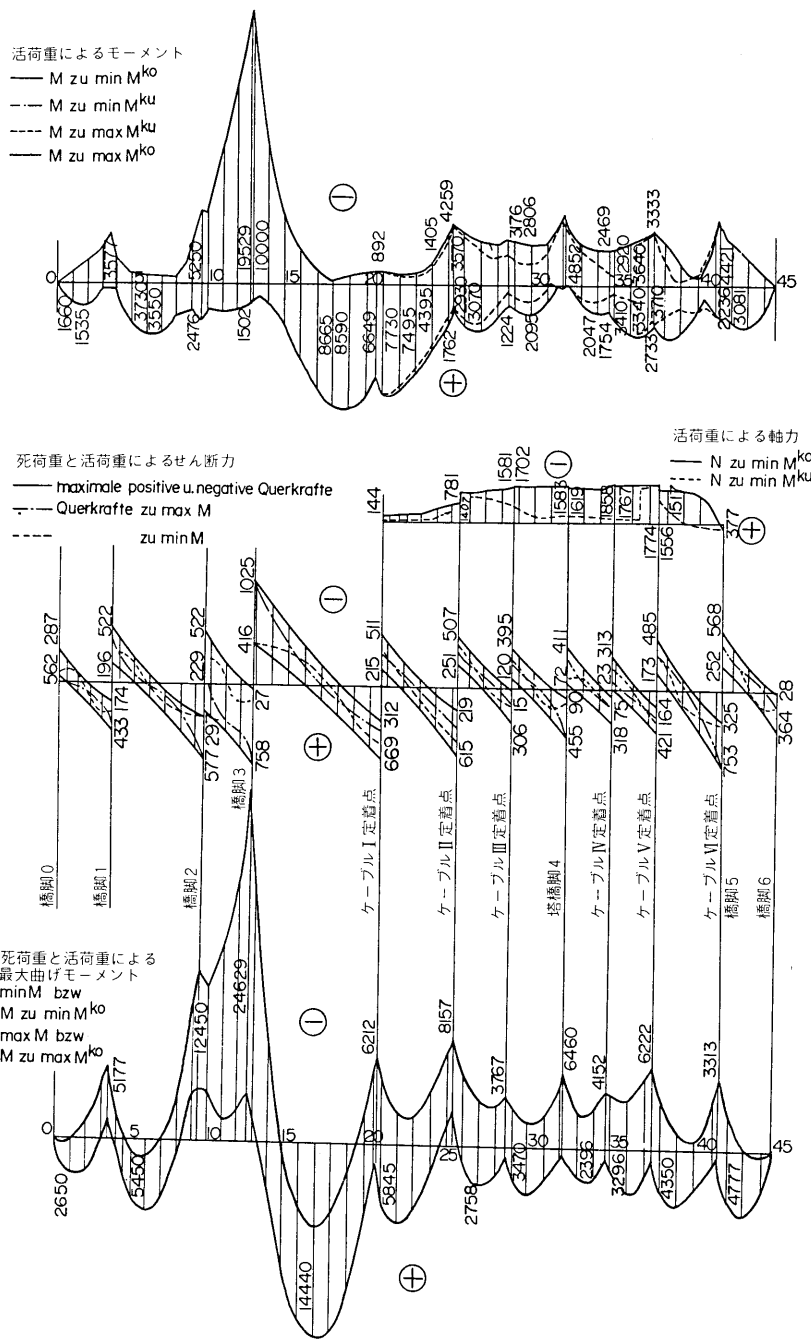


図 2 8 . 6 活荷重による主桁の断面 P と最大断面 P

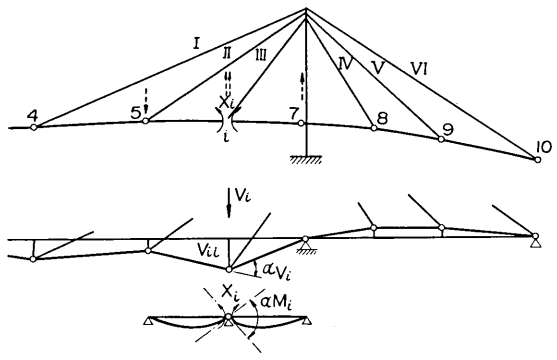


図 2 8 . 7 節点回転角の釣合

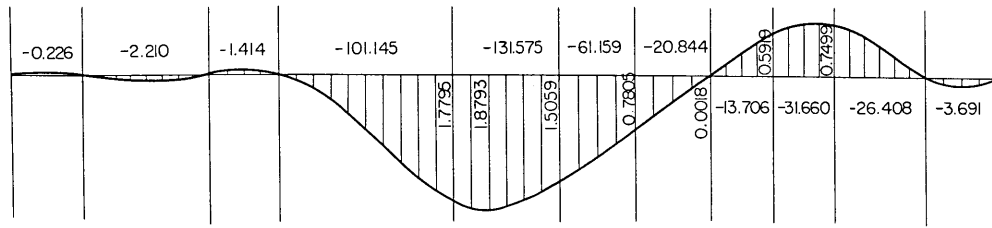


図 2 8 . 8 塔頂剪断力 X_{12} 影響線

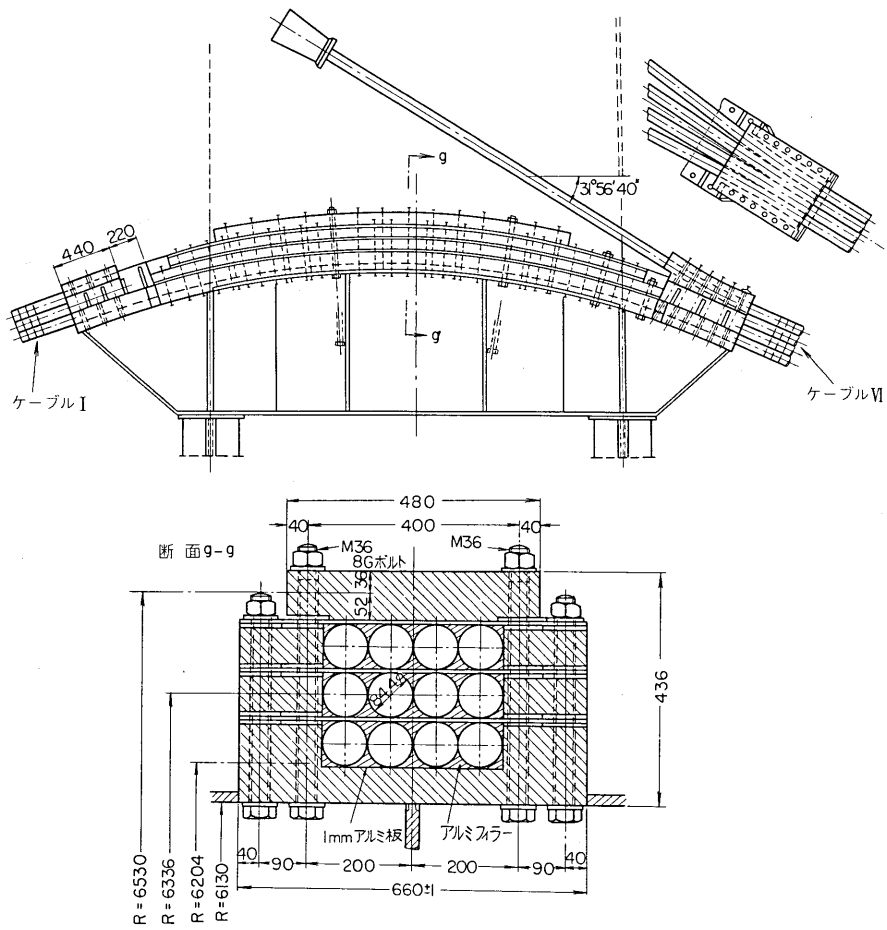


図 2 8 . 9 ケーブル I / VI 塔頂サドル

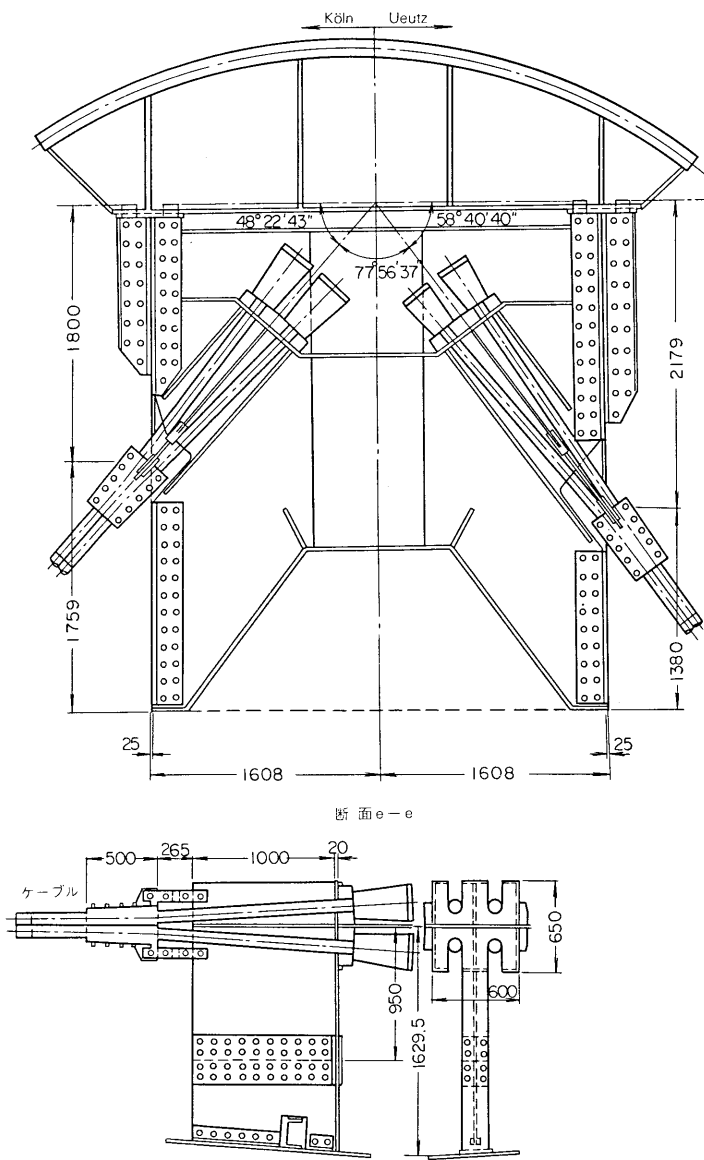


図 2 8.1 0 ケーブルⅢ/Ⅳ塔頂サドル

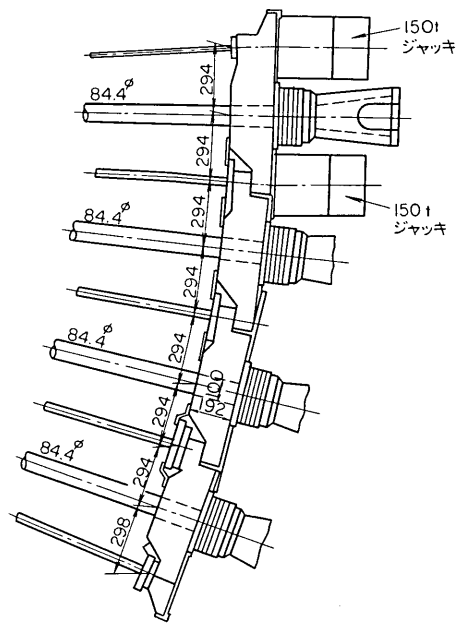


図 2 8.1 2 ケーブルⅤの定着

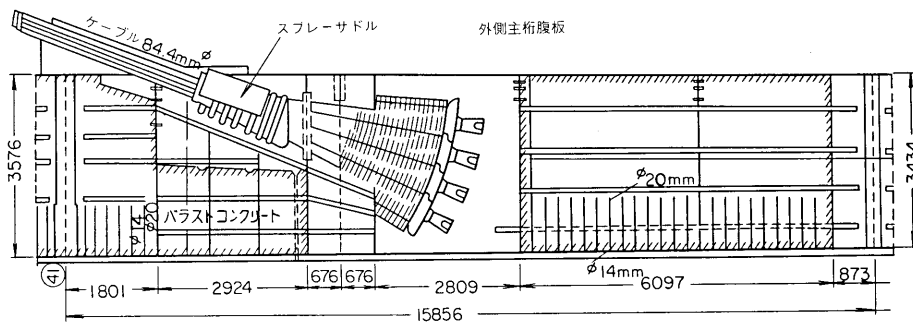
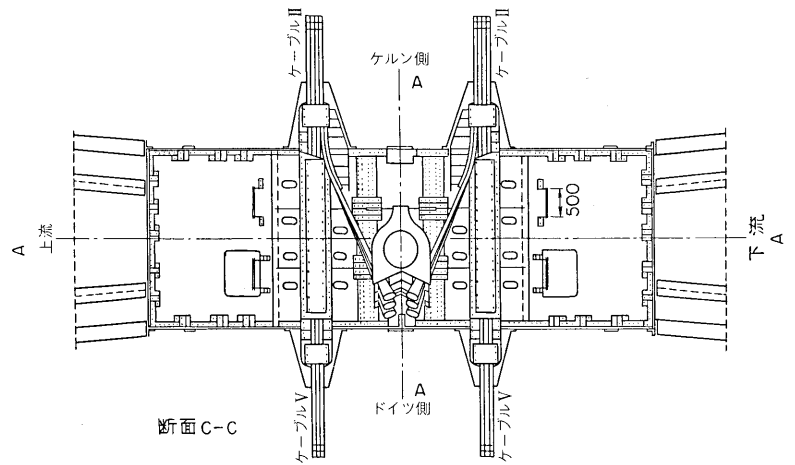
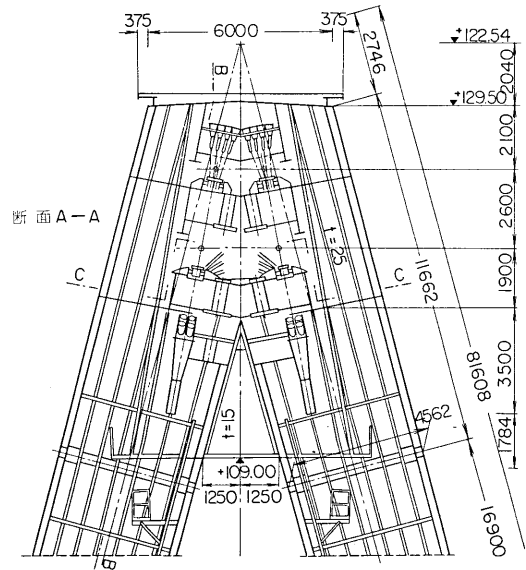
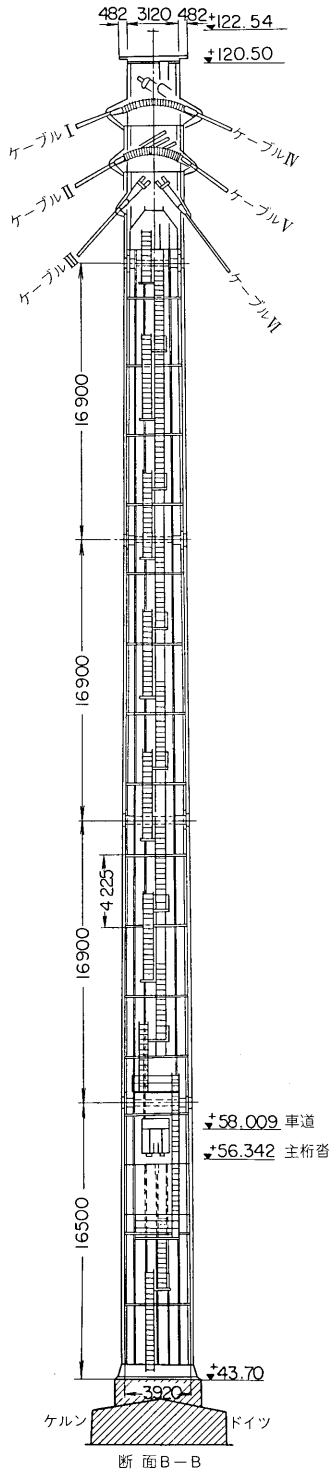


図 2 8.1 1 ケーブルⅤの主桁内定着



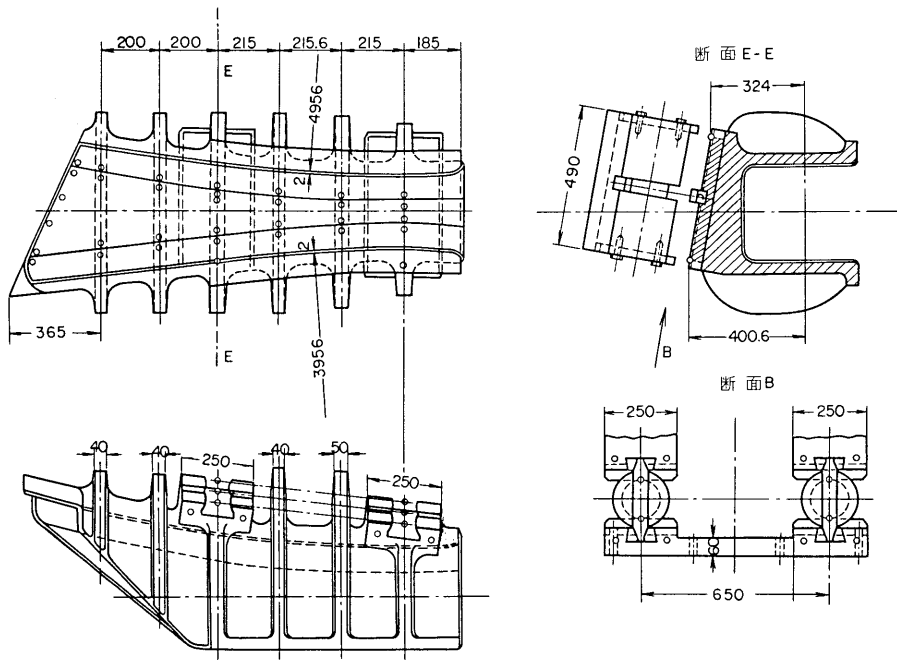


図 2 8.1 4 ケーブル I のスプレイサドル

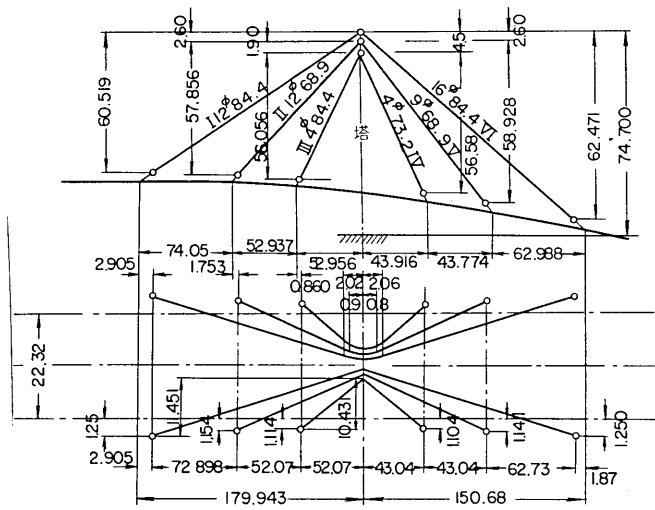


図 2 8.1 5 ケーブル配置

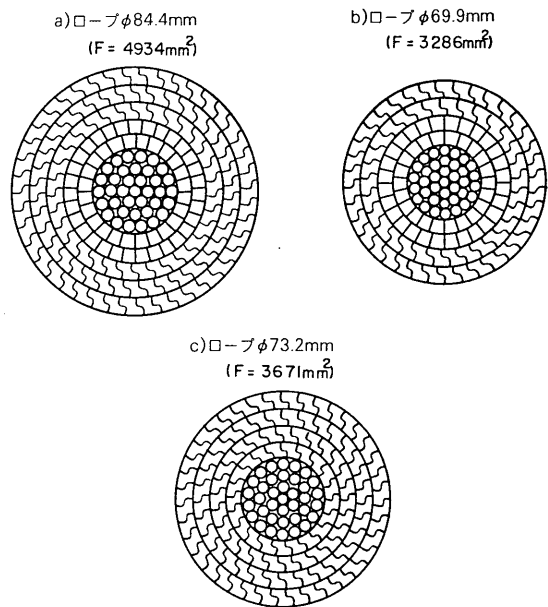
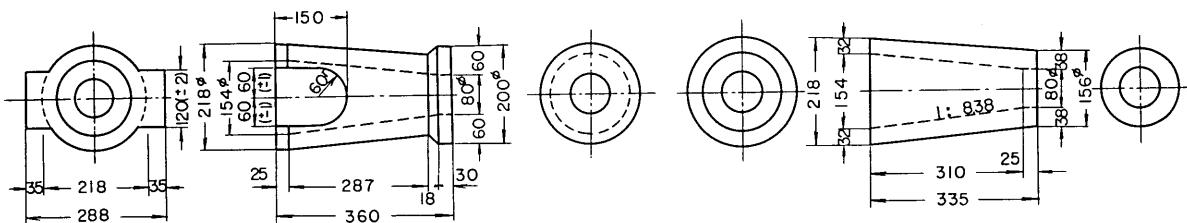


図 2 8.1 6 ロープ断面



主桁用

塔頂用

図 2 8.1 7 ケーブル IV ソケット