

## Bridge over the Rhine at Düsseldorf : Design, Calculation, Fabrication and Erection

(デュッセルドルフのライン河にかかるKnie橋：設計, 計算, 製作および架設)

著 者	誌 名							ページ	図 数	表 数	抄 録		査 読
G. Schreier	Acier Stahl Steel, 1972, 5.							209 223	5			立石健一 宮地鉄工所	大宮克巳 川崎重工業
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。													

デュッセルドルフの市中心部とライン河の左岸地域とを結ぶライン河に架かる新しい道路橋が1969年10月16日に開通した。

### 1. 構造上の特徴

この橋は斜張橋で, 1つの橋脚上で桁の両外側に立てられた2本の塔に架られた4本の平行なケーブルを有している。これらケーブルの一端は流水部を跨ぐスパンに取り付けられており, 他端は塔を跨いで左岸河川敷部の橋脚に定着されている。したがってこの橋脚は引張りを受けている。この橋は左右非対称で, 河の中央の流水部は1スパンで渡り, 障害となる構造物は存在しない(図9.1)。

#### 1.1 桁

この斜張橋の桁は構造上11支点上の連続桁で, 橋脚上の6支点は剛, ケーブル取付けの4支点は弾性支持, 残りの橋脚上の1支点は剛支持となっている。各支点におけるベアリングの配置は図9.2に示されている。

桁は腹板2枚を有する開断面であるが(図9.3), この形式は, ケーブル定着における難かしさのため, 従来の斜張橋には用いられなかったものである。主桁間の車線部のデッキは鋼床板で, プレート厚は12~30mmであり, そのリブはバルブプレートである。デッキプレート上面には, 高さ28.5mmのジグザグバーが15cm間隔で横断方向に配置されており, 舗装アスファルト(7cm厚)の滑り止めとなっている。歩道部は, 桁から3.9mの張出しとなっており, そのデッキプレート厚さは10mm~40mmである。主桁下フ

ランジは図9.4に示すが, 20mm厚の板数枚から構成され, その内訳は, 1枚のベースプレート(幅1m)および1~6枚の追加プレート(巾97.5cm)であり, それらの板は板の端を相互に溶接されている。またベースプレートには, 下フランジの厚さの変化を隠すための化粧板が取り付けられている。

#### 1.2 塔

塔は2室(セル)をT型に配置した断面である(図9.5)。ケーブルサドルは橋桁側(内側)のセルに位置している。橋桁側セルは2枚のダイヤフラムで, さらに3室に分割されている。反対側(外側)のセルには, リフトおよび梯子が設置されている。また各セルの継手は相互にずれている。板厚は90mm(ベース部)から20mm(塔頂部)まで変化しており, さらに部分的に板を溶接して補強されている。

#### 1.3 ケーブル

ケーブルは, 直径72mmのフルロックドコイル13本から成り, 偏平な六角形に配置されている。ケーブル端では非常に狭い場所に短形に配列され, ダイヤフラムの中にある定着桁に支持されている。各ケーブルの端ソケットの前には, グリップリングがはさみ込まれている。この丸い孔はケーブルの疲労強度を改善する働きをしている。サドルの溝, カラー, ケーブルクランプには, 2mm厚の鉛の敷き込みがなされており, またケーブル間の隙間にも成形した鉛が埋め込まれている。

#### 1.4 支 承

桁の両端にはNeo top f-Teflonの支承が設けられ, 縦方向および横方向に動けるようになっているが, 風に対しては

ウインドシューが設けられて桁の動きが規制されている。塔の位置では同じようにNeo topf-Teflonの支承が設けられているが、上下方向および縦方向の動きは規制され、また横方向にはゴムのパッドで弾性的に支持されている。ケーブルを定着している4本の引張り橋脚の所では、ロッカー支承で支持され、縦方向の動きと横方向には多少の動きが可能となっている。塔は径32mmのプレストレスバーを用いて基礎に固定され、ロッカー支承も同様に引張り橋脚に固定されている。桁の端のエクспанションは車道ではDEMA G形式の特殊なシャッター形のものを用い、歩道では滑り板形式のものが用いられている。

### 1.5 付帯設備

検査用通路が各主桁の内側に設けられている。また、ガソリンエンジン駆動のトロリーが、橋の全長にわたって移動できるようにになっている。

### 1.6 接合および組立

デッキの接合はすべて溶接である。原則として縦方向には裏当て金を用いた突合せ溶接であり、横断方向には、裏当て金無し突合せ溶接が施され、板厚によっては開先加工が施されている。

### 1.7 使用材料

総鋼重は9393tであり、そのうちに1002tのケーブルが含まれている。橋体には、主にSt52級を用い、2次部材にはSt37級が使用されている。ロッカー支承の板にはHSB55、ケーブル関係のソケット等には鋳鋼GS60が使用された。ワイヤーの引張強さは $150\text{ kg/mm}^2$ である。ケーブル端ソケットは亜鉛合金Zamak 610でシールされている。

## 2. 構造計算の要旨

### 2.1 車輛荷重、支承移動、風、温度

本橋は一般荷重はDIN1072の橋格60に適合させ、また車輛に対してはMLC100によって設計されている。支承点における移動には種々の最も不利な組合せの値が用いられた。風荷重はシュツツガルト大学での空気静力学的実験に基づいて $110\text{ kg/m}^2$  ( $42\text{ m/sec}$ )に決定された。等分布および局所的な温度分布が考慮されており、また、塔には氷圧80tが考慮されている。

### 2.2 平面構造への置換

2本の主桁およびケーブルが異なった面に配置されているために、厳密には立体構造物としての解析が必要であるが、他の諸例における立体および平面構造としての解析結果から、ほとんどの場合、平面構造物としての解析は安全側の値を与えている。

### 2.3 ケーブルの影響

ケーブルの弾性係数およびサグのために、厳密には計算に重ね合せの法則は成立しない。しかしその誤差は小さいので、弾性計算には仮定の係数を使用することが許される。

### 2.4 断面2次モーメントおよび桁の断面

コンピューターを使用して、この構造物を解析するにあたり、上部工の断面特性に関し種々の仮定が設けられた。車道部デッキプレートの有効幅は、場所に応じて種々の値が仮定されたが、歩道部のデッキプレートは全幅有効とされた。

### 2.5 計算

本橋は平面構造としては13次の不静定構造物になるが、4本のケーブルの力が関連づけられるため塔が面内曲げを受けないことから、9次の不静定構造となる。この系は最初弾性理論で解析され、その結果を用いて変形理論で計算が行われた。これには著者の提案した追加荷重法を用い、イテラションによって計算された。

### 2.6 デッキの計算

鋼床板は帯状の影響面を用い連続異方性板として解析した。しかし活荷重の作用点では差が生ずるので、チェックポイントにおける差は格子桁解析の値によって補正した。この1次応力に、部分的な縦桁としての2次応力を加えて計算した。

### 2.7 塔の計算

この2本の自立塔の設計は変形理論による計算によってなされ、強度はDIN4114 Section 10.02によってチェックした。この解析の結果、塔の最も不利な断面においても、なお死荷重が1.35増加してもよいような応力の余裕が残されていた。

### 2.8 座屈

主桁の腹板、下フランジ、縦桁等の局部的座屈のみでなく

鋼床板、歩道部床板、全体系の座屈のチェックが必要であった。特に全体系に対しては、著者の意見で限界圧縮力に対し軸方向の圧縮力は $1/4$ でチェックされた。流水部の桁のケーブル取付部でデッキプレートが局部的に壊れた。これは架設時に起ったもので、その原因としてはケーブルの角度が予期したものより大きかったと考えている。その他、製作時にこの部分に何らかの「Kink」（よじれ）が生じていたのではないかと思われる。この部分は後で補強された。

### 2.9 架設応力

架設中に生じる応力は厳密に調査された。しかしこの桁は非常にたわみ易く、架設中の変形は最大上方に2.2m、下方に3.2mにもなる。そこで実際の変形が計算値より逸脱しないように努めた。架設中の張出し時に桁が風によってフラッターを起こさないように、架設時には仮ブレーシングを入れてこれを避けた。

## 3. 工場製作に関して

主桁の製作工場が異なったため、およびロッカーベアリングのベース部が、上部工架設に先立って設置されたため、上部工に対して高精度が要求された。塔に対しても、その誤差を架設時に修正することは困難であるため、同様に高精度が要求された。

### 3.1 主 桁

下フランジを構成するプレートは、その端部を溶接することによって重ね合された。残留応力による板の浮き上がりは、対称溶接によりほぼ完全に防止されたが、ベースプレートおよびボトムプレートは約1mm浮上がった。

### 3.2 塔

塔にはケーブルからの偏心荷重がかかるので、頂上で56cm外側に向いた製作キャンバーが付けられた。塔の各部材は直線に作られたため、キャンバーはスムーズな曲線ではなく、各セルの所で折れた折線になっている。

### 3.3 ケーブル

ケーブル端のソケットは、すべて超音波および機械的手技を用いた検査がなされた。ワイヤロープを所定長さに切断するには、ひずみ応力試験を用いた。

## 4. 架 設

### 4.1 断面の分割

本橋は左岸側からの張出し工法によって架設された。上部工は34ユニットに、塔の内側セルは15ユニットに、外側セルは10ユニットに分割された。

### 4.2 桁の架設

現場の仮置場および組立場が左岸の橋近傍に設けられ、桁のデッキとは積換えクレーンで連絡されている。この積換えクレーンで桁の第1、第2ユニットを架設し、その先は移動式の2ブーム架設クレーンで架設が行われた。左岸の河川敷部では可搬式仮支柱で受けて張出しを行い、流水部ではその代わりにマストを持った移動式ケーブルステーションを用い、桁の先端を吊上げて張出した。架設用仮ブレーシングは検査トロリーのレール上に設けられ、主桁間隔を確保し、ねじれを防止した。

### 4.3 塔の架設

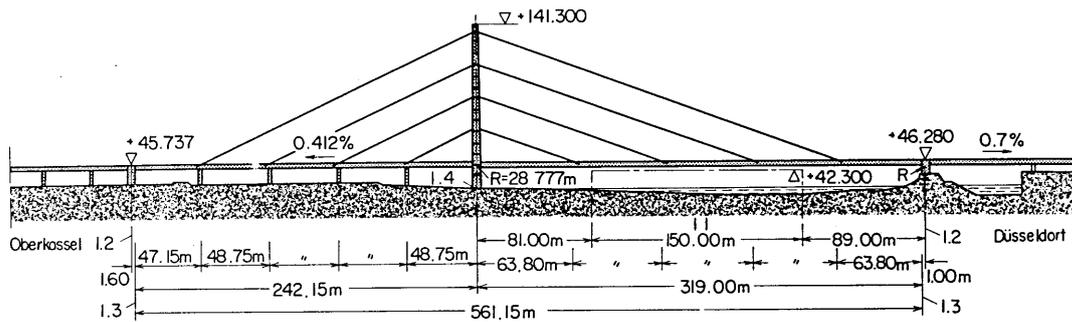
桁の架設が塔の手前まできたときに塔の第1節を設置して、その中にコンクリートを充填し、プレストレスボルトで締付けた。その後46mの高さまで架設クレーンで架設し、次に桁を塔の先まで張出した。そこで架設クレーンによりクライミングプラットフォームを塔に取付け、そこから上の塔の架設は、このプラットフォームによって行った。

### 4.4 ケーブルの架設

ケーブルを架設するに際し、サドルは最終位置よりも少し低位置に、また、橋軸方向にもある程度ずらして設置された。後に、これらのサドルはジャッキ等を用いて最終位置に調整された。ケーブルを構成するロープは、1本目が正確に設置され、残り12本のロープは、最初のロープと同じサグを持つように設置された。

### 4.5 風に対する対策

架設中の風に対して引張り橋脚間に仮ブレーシングが設けられ、また流水部に張出した桁にもブレーシングが設けられ、強風時においても上部工にフラッター振動が生じないように配慮された。もっとも、これらのブレーシング無しでも、そのような振動は生じえなかったものと思われる。



( 図中 1.1 航行水域 1.2 橋脚中心線 1.3 支承中心線 1.4 固定点 )

図 9.1 側面図

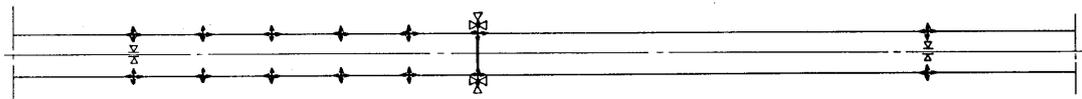
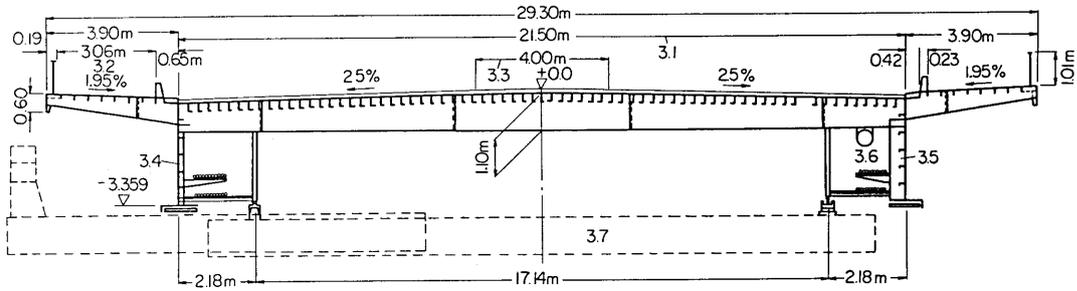
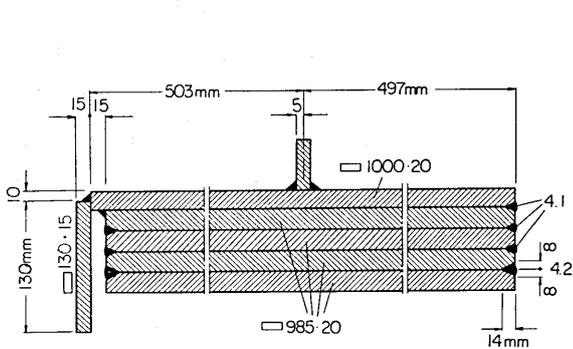


図 9.2 平面および支承ベアリングの配置図



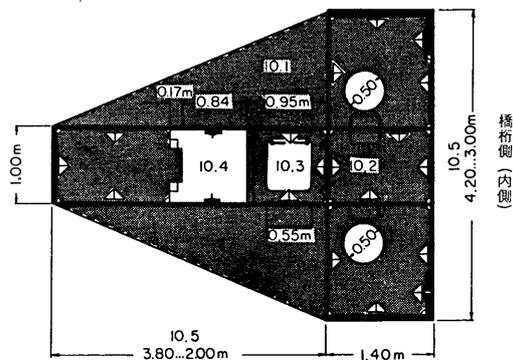
( 図中 3.1 車道 3.2 歩道 3.3 横断勾配移行曲線 3.4 中間補剛材 3.5 主補剛材 3.6 ガス本管 3.7 検査車 )

図 9.3 桁の横断面図



( 図中 4.1 通常の縁溶接 ( 5 ~ 8 mm ) 炭酸ガス 4.2 接手部の縁溶接 ( 8 mm 以上 ) 炭酸ガス )

図 9.4 主桁フランジの横断面



( 図中 1.0.1 傾斜したリブ 1.0.2 継手用のクランジ 1.0.3 梯子用の閉口部 1.0.4 エレベーター 1.0.5 この寸法は底部から頂部へ変化する )

図 9.5 塔の断面図