

I-12

VILLINGEN歩道橋(PC斜張橋)の設計と施工

八千代エンジニアリング(株)

正員

斉藤和人

1. 概要

Villingen歩道橋は、西ドイツ西南部のSchwarzwaldの中にある人口約3万の小さな町Villingenに建設されたプレストレストコンクリートの主桁をもつ斜張橋である。森に囲まれた静かな美しい町の表玄関ともいえるべき国鉄駅の上につけられるため、美観は特に重視され、主桁断面形状、ピロンの高さ、斜張ケーブルの張り方等の構造要素はもとより、高欄の枝料、形状、照明等に至るまで細心の注意が払われている。プラットホーム、旅客線、貨物操車場を越えて架設されるため種々の制約条件が付された。

橋梁型式、構造については種々検討の結果、最終的に張出し付き3径間連続PC桁を主桁にもつPC斜張橋(スパン23.0m+31.0m+66.5m+3.0m)に決定した。

本橋の特徴は、(1) 我国には本格的なものは未だ建設されておらず、西ドイツでも初めて建設されたPC斜張橋である。

(2) 将来のPC斜張橋の長スパン化への出発点として計画された。

(3) PC斜張橋としては世界で初めて軽量骨格コンクリートのプレキャストブロック工法が用いられている。

(4) 中央径間の大部分のスラブ高が60cmであり、スラブ高と中央スパンの比が約1/10というおそろく世界で最もスレンダーなプレストレストコンクリート橋である。

2. 設計

ケーブル碇着機構を必要とする2面ケーブル方式は美観上からしりぞけられ、中央単独タワーによる一面ケーブル方式が採用された。斜張ケーブルはタワー及び主桁に碇着されている。

ソケット(図-2)にはMannheim-Nord橋で開発された冷間錆込み工法が用いられ、斜張ケーブルも同じくMannheim-Nord橋で開発された平行線ケーブル(図-2)が用いられている。

中央径間のプレキャスト桁断面は図-3の如きホロースラブが用いられている。

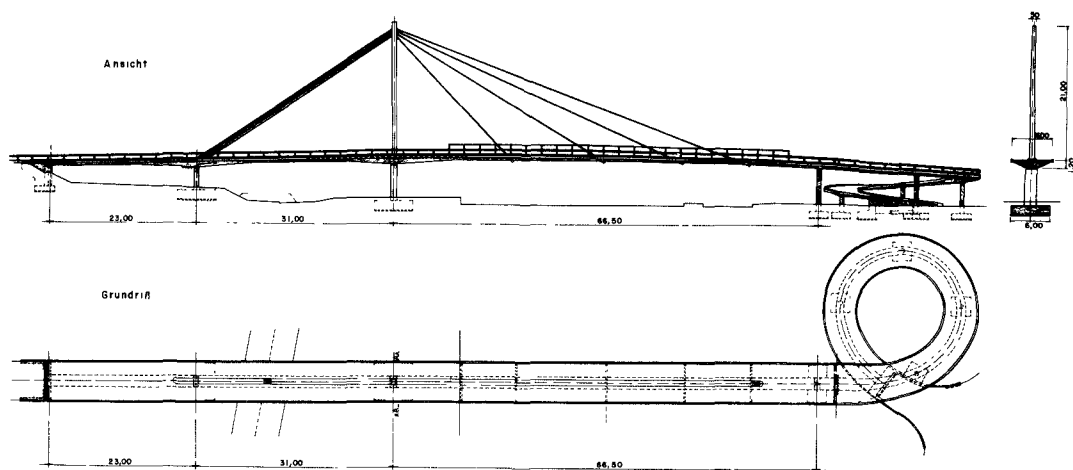


図-1 一般図

本橋の主要構造諸元は次の通りである。(図-1 一般図参照)

型式・キャンテレー付3径間連続PC斜張橋

橋長：123.5m (伸縮継手間)

スパン割：23.0+31.0+66.5+3.0m

スラブ高：60cm (P_2, P_3 橋脚附近のみ120cm)

巾員：6.0m (地覆内面間)

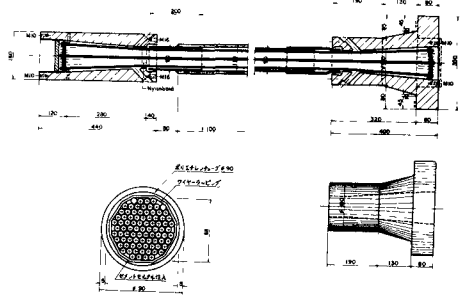


図-2 ソケット及び斜張ケーブル断面

本橋は歩道橋としては長スパンに属する66.5mの中央スパンを有し世界でも最も大きいドイツ工業規格(DIN)の活荷重(群衆荷重)をそのまま適用するには疑問がもたれたが、特に低減は行わず、応力状態で判断することにして設計が進められた。

本橋の設計荷重を示すと

主荷重 (1) 活荷重 (2) 死荷重 (3) 静荷重
(4) プレストレス (5) 斜張ケーブル調整力 (6) 移行断面力 (7) クリープ、乾燥収縮

従荷重 (1) 温度変化 (2) 支床沈下 (3) 風荷重
活荷重は、DIN 1072 に従ってスパン23.0mに対して435kg/m² スパン31.0m、66.5mに対して400kg/m² が考慮されている。

一般にメタル斜張橋は主桁のクリープ、乾燥収縮がないため(6)の移行断面力が生じない。そのため(5)の斜張ケーブル張力の調整により、死活荷重の曲げモーメントを最少にすればよい。しかしPC斜張橋は主桁のクリープ、乾燥収縮により完成時及びクリープ、乾燥収縮完了時の応力状態に差が生じる。

それゆえPC斜張橋においては(6)の移行断面力を計算し、完成時に加える(5)の斜張ケーブル調整力を算出するのが重要な課題となる。

本設計においてはPC斜張橋の持続荷重に対する曲げモーメントがケーブル碇着点を支点とする連続梁としての曲げモーメントと等しいのが最も安定した状態であるという前提のもとに、ケーブルS₁~S₅の張力を調整することにより断面2、4、5、6、7、の5点の曲げモーメントを調整した。断面3に生ずる曲げモーメントの両状態の差は小さいであろうという想定であったが図-4の如くかなり大きな差が生じ、しかも主桁のクリープ、乾燥収縮によるプレストレスの減少等により各支点とも連続ばりとしての曲げモーメントに対し少なからず差が生じた。その為、5本のケーブル張力を調整するのみでは不足であるのが判明したので断面27をジャッキアップすることによりケーブル碇着点を含めた中間支点6点(点2~7)で、所定の曲げモーメントを得られるようにS₁~S₅のケーブル張力及び断面27の支点反力が調整された。その結果は、図-5に示す通り十分

本設計においてはPC斜張橋の持続荷重に対する曲げモーメントがケーブル碇着点を支点とする連続梁としての曲げモーメントと等しいのが最も安定した状態であるという前提のもとに、ケーブルS₁~S₅の張力を調整することにより断面2、4、5、6、7、の5点の曲げモーメントを調整した。断面3に生ずる曲げモーメントの両状態の差は小さいであろうという想定であったが図-4の如くかなり大きな差が生じ、しかも主桁のクリープ、乾燥収縮によるプレストレスの減少等により各支点とも連続ばりとしての曲げモーメントに対し少なからず差が生じた。その為、5本のケーブル張力を調整するのみでは不足であるのが判明したので断面27をジャッキアップすることによりケーブル碇着点を含めた中間支点6点(点2~7)で、所定の曲げモーメントを得られるようにS₁~S₅のケーブル張力及び断面27の支点反力が調整された。その結果は、図-5に示す通り十分

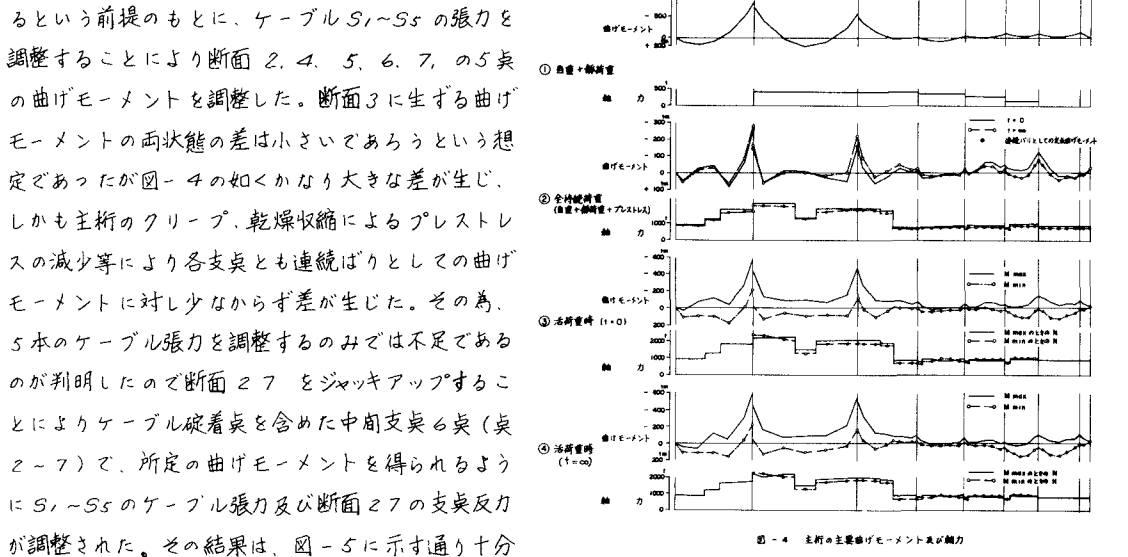


図-4 主桁の主要曲げモーメント及び軸力

満足すべき値が得られた。

さらに、クリープ、乾燥収縮による斜張ケーブル張力の時間的変化がわずかであるとの前提のもとに完成時のPC斜張橋と連続梁としての曲げモーメントの差を急激な不等沈下によって生ずる曲げモーメントとみなし、クリープ、乾燥収縮によるPC主桁の短縮によって生ずる曲げモーメントを徐々に生じる不等沈下による曲げモーメントとみなして、Trost 理論によって、クリープ完了後において得られる曲げモーメントを求めたが、表-1の如く満足すべき結果が得られた。

本橋のコンクリートの許容圧縮応力度は普通コンクリート (B_n 450) に対し $\sigma_{ca} = 140 \text{ kg/cm}^2$ 、軽量骨材コンクリート (LB 300) に対し、 $\sigma_{ca} = 100 \text{ kg/cm}^2$ 、許容引張応力度は特に制限を設けず、15% 活荷重時に於ける引張応力度を出来るだけ少なく押さえることとし、生じた引張力は全て鉄筋によってカバーされている。設計荷重時の最大最少応力は表-2の通りであるが、断面65に生じた最大圧縮応力 111.5 kg/cm^2 は許容圧縮応力 ($\sigma_{ca} = 100 \text{ kg/cm}^2$) を越えているが、鋼材を考慮した換算断面を用いて再計算した結果、許容応力度におさめることができた。本橋に使用された主な材料、材質は次の通りである。

普通コンクリート (B_n 450) (場所打ち部分)

圧縮強度 $\sigma_{cb} = 450 \text{ kg/cm}^2$
 単位重量 $\gamma = 2.5 \text{ t/m}^3$
 ヤング係数 $E = 3.5 \times 10^6 \text{ kg/m}^2$
 クリープ係数 $\varphi_{\infty} = 2.5$
 乾燥収縮度 $\epsilon_s = 12 \times 10^{-5}$

軽量骨材コンクリート LB 300 (プレキャストブロック)

圧縮強度 $\sigma_{cb} = 300 \text{ kg/cm}^2$
 単位重量 $\gamma = 1.7 \text{ t/m}^3$
 ヤング係数 $E = 1.7 \times 10^6 \text{ kg/m}^2$
 クリープ係数 $\varphi_{\infty} = 1.75$
 乾燥収縮度 $\epsilon_s = 20 \times 10^{-5}$

PCケーブル (BBRV) 斜張ケーブル (85-φ7)

$S_t = 150/170$ $S_t = 140/160$
 $P_a = 58.2 \text{ t/本}$ $P_a = 250 \text{ t/本}$

ピロン

S_t 37 及び S_t 52

3. 施工

230mおよび310mのサイドスパンとメインスパンのうち10.5mのキャンチレバー部分が支保工上で普通コンクリート B_n 450 で場所打ちされた。鋼製のピロンは工場で製作され、全長210mのき、貨車で運ばれ、クレーンで架設された。残り560mのメインスパンと30mのキャンチレバー部分は5個のプレキャストブロックに分けられ、現場附近のヤードで打設された。プレキャストブロック及び斜張ケーブルの架設は図-6フの如く綿密に架設工程が立てられ、所要線路の空き時間を利用して1日1ブロックづ、5日間で架設されるよう計画された。

まず、第1のプレキャスト桁が10.5mのキャンチレバーの先端と、貨車に積込まれたまゝの仮支柱とに、ドイツ国鉄の90tクレーンを用いて架設され、前後方ケーブルがセットされた。

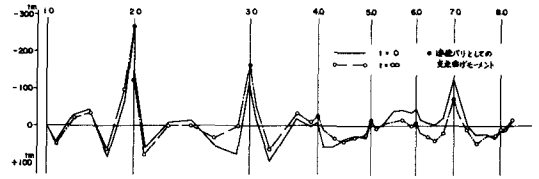


図-5 時経過による曲げモーメント

表-1 Trost 理論による最終曲げモーメント (t_m)

断面	20e	20re	30e	30re	40	50	60	70	摘要
① $\Delta M_t = 0$	-04	-19.2	+41.1	+36.5	+13.0	+0.8	-38.2	-53.2	完成時沈下による曲げモーメント
② $\Delta M_t = \infty$	-0.1	-5.8	+12.4	+11.0	+5.1	+0.3	-15.3	-20.8	クリープ完了後の曲げモーメント
③ $\Delta M_t = \infty$	+12.5	+9.1	-30.7	-26.9	-8.5	-0.4	+27.7	+43.0	主桁のクリープ短縮による曲げモーメント
④ $\Delta M_t = \infty$	+4.7	+3.4	-11.3	-10.0	-3.9	-0.2	+12.9	+19.9	クリープ完了後の③の曲げモーメント
⑤ $\Sigma \Delta M_t = \infty$	+4.6	-2.4	+1.1	+1.0	+1.2	+0.1	-2.4	-0.9	②+④ Trost 理論 (t = ∞) と連続梁との曲げモーメントの差

- 注 ① 完成時 (t=0) と連続梁との曲げモーメントの差
 ② クリープ完了後の①の曲げモーメント
 ③ 主桁のクリープ短縮による曲げモーメント
 ④ クリープ完了後の③の曲げモーメント
 ⑤ = ②+④ Trost 理論 (t = ∞) と連続梁との曲げモーメントの差

表-2 最大、最少応力度 (kg/cm²)

断面	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
15% 活荷重時 + 全断面応力 (t=0)	max	1211	1127	1114	1086	1174	804	845	868	851	895	997	1249
min	-89	-188	-67	-68	355	57	184	112	136	29	-324	-358	-408
15% 活荷重時 + 全断面応力 (t=∞)	max	1101	1128	1024	1145	1274	748	838	866	844	878	1115	980
min	-189	-269	-184	-137	249	-15	164	77	169	-182	-593	-172	-561
15% 活荷重時 + 全断面応力 (t=∞)	max	740	786	808	784	886	424	352	468	637	490	714	862
min	237	20	352	84	415	140	260	143	193	158	-22	-93	-78

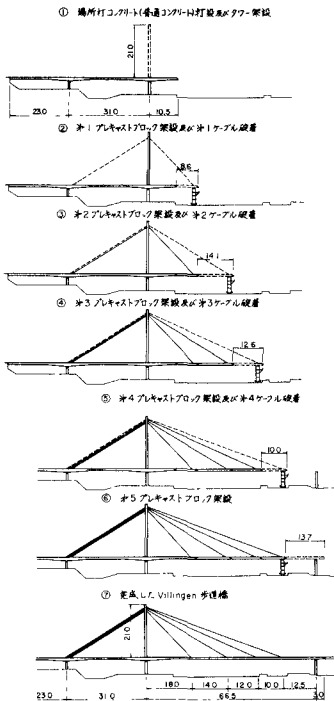


図 - 6 架設計画

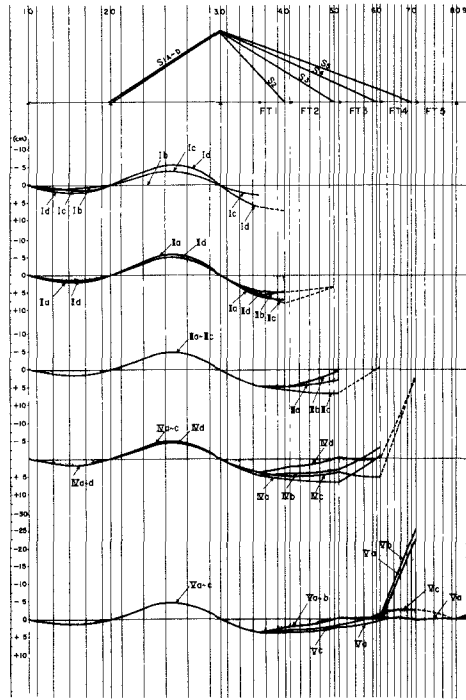


図 - 7 架設時のたわみ

架設順序

- Ia 場所打ちコンクリート打設
- Ib プレストレス導入
- Ic 点2.7 ジャッキアップ (66.5 ton)
- Id オ1ブロック架設
- IIa オ1ケーブルセット
- IIb オ1ケーブル緊張
- IIc オ2ブロック架設
- IIId ケーブル10 再緊張
- IIIa オ2ケーブルセット
- IIIb オ2ケーブル緊張
- IIIc オ3ブロック架設
- IVa オ3ケーブルセット
- IVb オ3ケーブル緊張
- IVc オ4ブロック架設
- IVd ケーブル1c及び1b再緊張
- Va オ4ケーブルセット
- Vb オ4ケーブル緊張
- Vc オ5ブロック架設

ピロンの敏感な挙動を考慮して、最初の1対のケーブルは前後ケーブル張力の差が、常に30t以内に保たれるように慎重に、交互に張力が加えられた。ケーブル張力が所定の値に近づくにつれて徐々に、プレキャスト桁の先端が持ち上がり、仮支柱の反力はゼロとなった。ソケットが半円形シムプレートを用いて碇着され、貨車に積込まれたままの仮支柱が運び去られた。

オ4のプレキャスト桁まで同じような手順が繰返され、最上段のケーブルが碇着された。最も大きなオ5のプレキャスト桁は重量約55 tonあり、プラットフォームを越えて架設されるため、ドイツ国鉄の90tクレーンと自動車クレーンによる両吊りで架設された。

図-7の如くプレキャスト桁の架設による前ブロック先端の下がり、架設が進むにつれて大きくなり、オ5ブロックの架設によりオ4ブロックの先端は約24 cmも下がることになる。そのため、オ5ブロックの架設に際しては、オ4ブロックの先端を仮支柱で支え、且つ、オ3～オ4ブロック間のジョイント部には、特別にやわらかいゴム沓を用いて架設の際に生ずる角変化に対応させることにした。

プレキャスト桁の架設が完了した状態ではプレキャスト桁間のジョイントはヒンジ結合であるため、メインスパンは静定構造となっており、前方ケーブルのシムプレートの厚さを調節することにより、断面力に影響を与えずに橋面高さを最終的に調節された。

ジョイントが場所打ちされると、主桁のPCケーブルがBBRV工法によりプレストレスされ、最後に斜張ケーブルの調整力が加えられ、点2.7の反力が除去されて、架設作業が完了した。

また ヒンジ結合されたプレキャスト桁は日射の影響により、メインスパンでは橋面が数cm上下した。そのため、橋面のレベル測定は日の当たらない朝晩に行なわねばならなかった。