

プレストレスト コンクリート橋の曲げ終局限界状態の検討について

土木学会プレストレストコンクリート設計
施工指針改訂小委員会設計分科会

1. ま え が き

プレストレスト コンクリートの設計は、現在、昭和36年度に改訂された土木学会プレストレスト コンクリート設計施工指針に基づいて行われており、道路橋、鉄道橋においてはそれぞれ道路協会プレストレスト コンクリート道路橋示方書（昭和43年3月）、および国鉄構造物設計事務所・プレストレスト コンクリート鉄道橋設計施工基準（案）によって設計がなされている。

これ等の指針示方書においては、許容応力度を定めて安全度を検討するとともにある荷重係数を用いた割増断面力に対し、部材断面の抵抗モーメントを比較して安全度を確かめるといった一種の限界状態設計法が併用されている。

第6回 FIP 国際会議（1970年プラハ）で提出された FIP-CEB の連合委員会によるコンクリート構造物設計施工国際指針においては、準確率論に基づく限界状態設計法を推奨しており、アメリカ、ドイツ、イギリスなど諸外国の示方書もこれに準じて限界状態設計法を採用している。

土木学会においては数年来現在の指針の改訂の作業を進めているが、全面的な限界状態設計法の採用には諸般の情勢から時期尚早との意見が多く、その採用は準備段階にあるといえよう。しかし、現在の破壊に対する安全度の検討は一種の限界状態設計法であり、これを、将来の確率論に基づく限界状態の設計法の採用を前提として改訂することはあまり大きな困難なしに合理的な設計に近づくものと考えられる。したがって、現在のプレストレスト コンクリート設計施工指針の4章 55, 56 条あるいは、道路橋示方書 5.2.1 ならびに鉄道橋設計施工基準 4.4 に基づいて実際に設計された橋について、FIP-CEB コンクリート構造物設計施工国際指針に基づく仮定にしたがって終局限界状態を検討した結果について若干の考察を加えることとする。検討した実橋（従来の各種規準、規定類によって設計された橋）の種類および数は次のとおりである。

種 類	構造形式	断面形状	検 討 断 面	検 討 数	支 間 長 (m)
道路橋	単純桁	I 型桁	支 間 中 央	15	15~40
"	連続桁	箱 桁	中 間 支 点	15	最大 230
"	"	"	中央径間中央	10	最大 90
"	"	"	変 曲 点	12	"
"	"	"	側 径 間 中 央	6	最大 130
小 計				58	
鉄道橋	単純桁	I 型桁	支 間 中 央	32	15~45
"	"	箱 桁	"	4	40~45
"	"	槽状桁	"	7	19~31
"	連続桁	箱 桁	中 間 支 点	12	最大 80
"	"	"	中央径間中央	12	"
"	"	"	変 曲 点	3	"
"	"	"	側 径 間 中 央	3	"
小 計				73	
合 計				131	

2. FIP-CEB 国際指針による終局限界状態の検討

現在の土木学会制定プレストレスト コンクリート設計施工指針と FIP-CEB 国際指針との相違は、材料強度および施工上の不確かさを考慮した点である。

すなわち、FIP-CEB 国際指針によると、破壊に対する安全度を検討するための安全係数は、材料強度に関するものと、荷重に関するものとに分けられ、次のとおりとする。

- 1) 材料強度に関するもの コンクリート 1.5
(現場打ちの場合)
鋼 材 1.15
- 2) 荷重に関するもの 活荷重 1.5
死荷重 1.5または0.9の内不利な条件を与えるもの

本論文では破壊抵抗モーメントを求め、荷重係数が実橋についてどのようになっているかを検討した。

曲げ破壊抵抗モーメント計算上の仮定

- 1) コンクリート断面は平面保持の法則に従い、鋼材

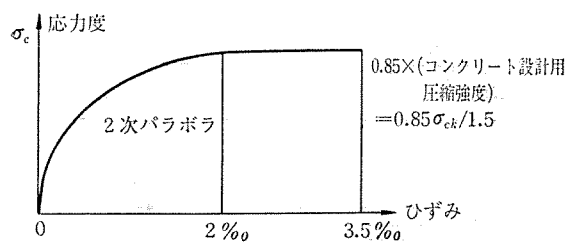


図-1 コンクリートの圧縮応力度～ひずみ曲線 (Case I)

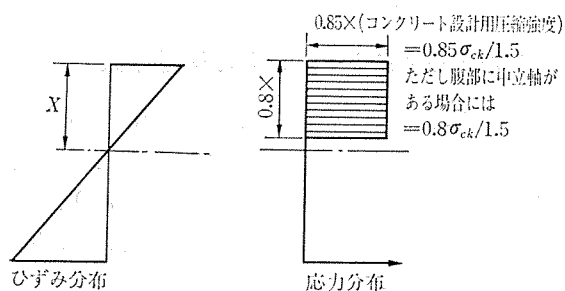


図-2 (Case II)

のひずみはこれに接するコンクリートひずみと同じとする。

2) コンクリートの引張強度は無視する。

3) コンクリートの応力度～ひずみ曲線は図-1による (Case I)。単純曲げをうける断面では図-1に示す矩形～放物線の圧縮応力度分布曲線を図-2に示すような矩形分布としてもよい (Case II)。この場合、圧縮応力度の領域がI桁、箱桁のウェブに亘る場合には、幅

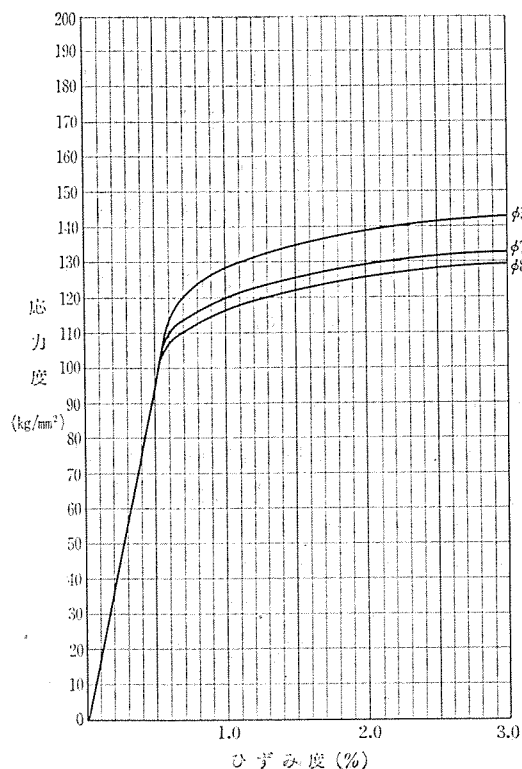


図-3 SWPR 1 および SWPD 1 φ 5, 7, 8 mm
応力～ひずみ曲線 (1/1.15曲線)

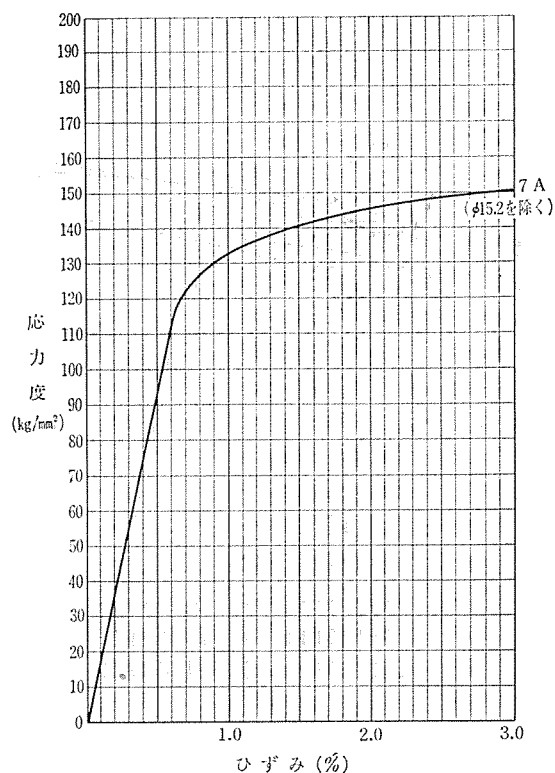


図-4 SWPR 7 A 応力～ひずみ曲線 (1/1.15曲線)

すなわち圧縮応力度を図-2の0.95倍とする。

4) PC鋼材の応力度～ひずみ曲線は図-3～6のように、国産各種PC鋼材についての試験結果をまとめて

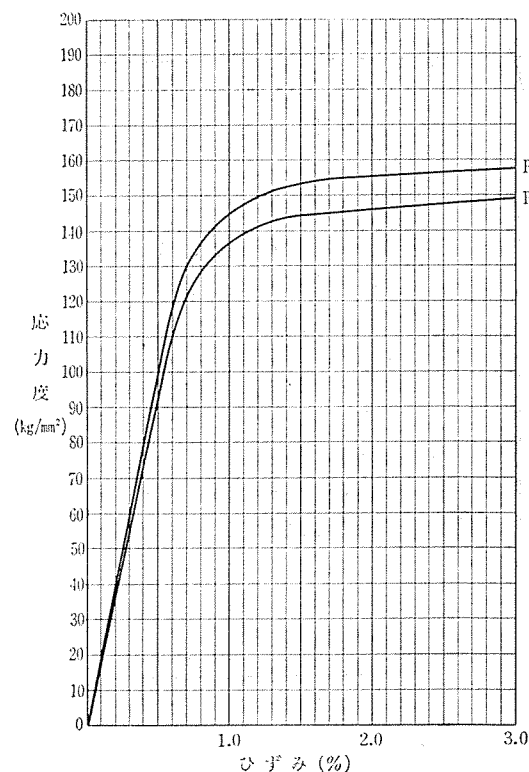


図-5 SEEE ケーブル (F13, F14) 応力～ひずみ曲線
(1/1.15曲線)

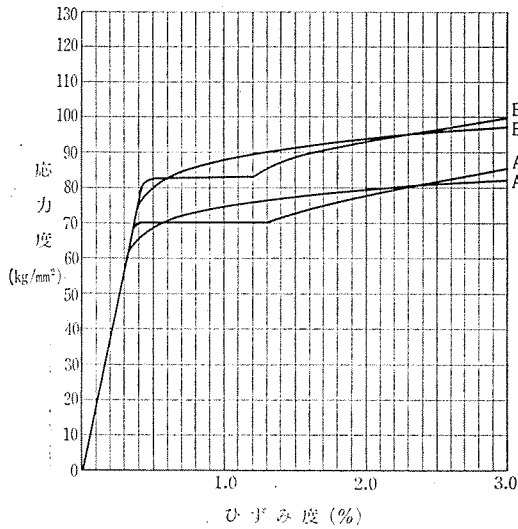


図-6 SBPR 95/120 (B₂) 95/110 (B₁)
SBPR 80/105 (A₂) 80/90 (A₁)
応力-ひずみ曲線 (1/1.15 曲線)

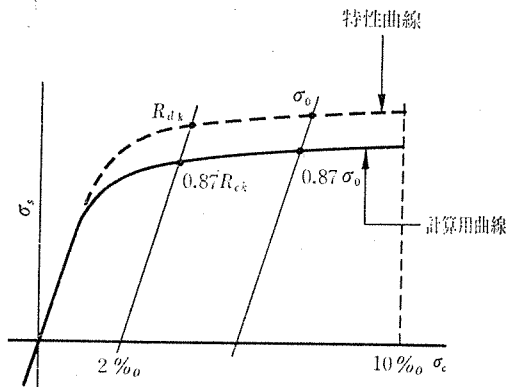


図-7

定めた応力-ひずみの特性曲線を 図-7 に示すように材料強度に対する低減係数 0.87 を乗じたものを用いる。

- 5) 鉄筋の応力度-ひずみ曲線は 図-8 による。
- 6) 鋼材の最大引張ひずみは 10‰ とする。
- 7) 曲げをうける断面のコンクリートの最大圧縮ひずみは 3.5‰ とする。
- 8) 曲げ破壊抵抗モーメントは、あらゆるプレストレスング力の損失を差し引いたプレストレスング力が作用した状態を基としてこれをもとめる (図-9)。

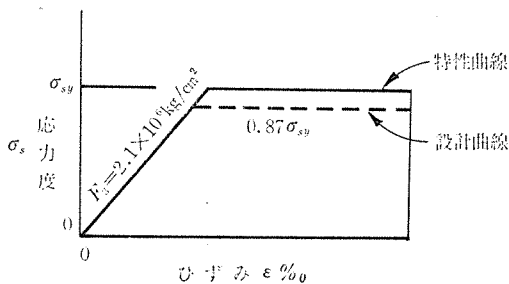


図-8

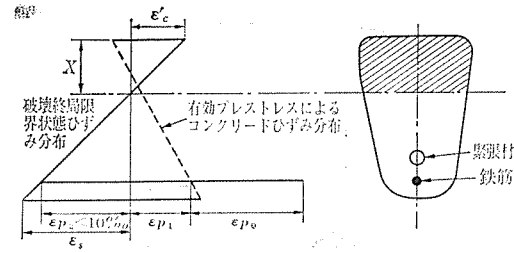


図-9 緊張材有効ひずみ

3. 曲げ破壊抵抗モーメントと荷重係数

前述の仮定に基き、1. に示した 131 断面について抵抗モーメントの算定を電算によって実施した。この場合計算を簡単にするため、コンクリートのひずみが 0 となる時の緊張材のひずみ $\epsilon_{p1} + \epsilon_{p0}$ に対応する応力度は $0.55 \sigma_{pu}$ に等しいものとした。

抵抗モーメントに対応する荷重係数は次の 5 つの組合せについて算定した。

$$M_R = A_1 (M_D + M_L)$$

$$M_R = 0.9 M_D + B_1 M_L$$

$$M_R = M_D + B_2 M_L$$

$$M_R = 1.3 M_D + B_3 M_L$$

$$M_R = 1.5 M_D + B_4 M_L$$

ここに M_R : 破壊抵抗モーメント

M_D : 死荷重モーメント

M_L : 活荷重モーメント

A, B : 荷重係数

抵抗モーメントは、コンクリートの圧縮応力度分布が矩形-放物線の場合 (CASE I) および矩形分布 (Case II) の 2 種類について算定した。

(Case II) によって求めた荷重係数の頻度は 表-1 ~ 5 に示す。

(Case I) と (Case II) によって求めた抵抗モーメントの差の頻度は 表-6 に示す。

4. 結果に対する考察

表-1 ~ 5 に示す頻度から考察すると次のような荷重係数で、現行指針により設計された橋の抵抗モーメントはその大部分が対応する。

$$A_1 : 1.4 (M_D + M_L) > M_u \quad 98\%$$

$$1.5 (M_D + M_L) > M_u \quad 93\%$$

$$B_1 : 0.9 M_D + 2.4 M_L > M_u \quad 100\%$$

$$0.9 M_D + 2.6 M_L > M_u \quad 98\%$$

$$B_2 : 1.0 M_D + 2.2 M_L > M_u \quad 100\%$$

$$1.0 M_D + 2.4 M_L > M_u \quad 97\%$$

$$B_3 : 1.3 M_D + 1.6 M_L > M_u \quad 98\%$$

$$1.3 M_D + 1.8 M_L > M_u \quad 95\%$$

表-1 安全度(荷重係数)の頻度表(A₁)

種 類	構造形式	断面形状	検 討 断 面	検討数	安 全 度 (荷重係数)										
					1.4~ 1.5	1.5~ 1.6	1.6~ 1.7	1.7~ 1.8	1.8~ 1.9	1.9~ 2.0	2.0~ 2.2	2.2~ 2.4	2.4~ 2.6	2.6~ 3.0	3.0~
道路橋	単 純 桁	I 型桁	支 間 中 央	15			2	4	3	2	4				
	連 続 桁	箱 桁	中 間 支 点	15	3	3	4		2		3				
			中央径間中央	10		1		1		1		2		5	
			変 曲 点	12	1	1		1		1	1	1	1	6	
			側径間中央	*1 5		1	1	1		1		1			
	小 計			57	4	5	8	5	7	3	9	2	2	1	11
鉄道橋	単 純 桁	I 型桁 箱 桁 槽状桁	支 間 中 央	32 4 7	1		2	8	3 1 1	17 1	3				6
	連 続 桁	箱 桁	中 間 支 点	*2 11	2	3	1	1	2	1			1		
			中央径間中央	12					1	1	4	2	2		2
			変 曲 点	3									2	1	
			側径間中央	3				1	1	1					
	小 計			72	3	3	3	10	9	21	7	2	3	2	9
合 計				129	7	8	11	15	16	24	16	4	5	3	20

*1 1.4以下(1個), *2 1.4以下(1個)

表-2 安全度(荷重係数)の頻度表(B₁)

種 類	構造形式	断面形状	検 討 断 面	検討数	安 全 度 (荷重係数)										
					1.6～ 1.8	1.8～ 2.0	2.0～ 2.2	2.2～ 2.4	2.4～ 2.6	2.6～ 2.8	2.8～ 3.0	3.0～ 4.0	4.0～ 5.0	5.0～ 10.0	10.0～
道路橋	単 純 桁	I 型桁	支 間 中 央	15								9	6		
	連 続 桁	箱 桁	中 間 支 点	15								4	3	8	
			中央径間中央	10						1	3		6		
			変 曲 点	12					1	1	1	6	4		
			側径間中央	6						1		3		2	
	小 計			58	0	0	0	0	0	1	2	19	10	22	4
鉄道橋	単 純 桁	I 型桁	支 間 中 央	32						1	4	22	2	3	
		箱 桁		4					1	1	1	1			
		槽状桁		7						1		6			
	連 続 桁	箱 桁	中 間 支 点	12					2	2	1	6	1		
中央径間中央			12								7	3	2		
変 曲 点			3								2		1		
			側径間中央	3							2	1			
	小 計			73	0	0	0	0	2	4	8	40	7	12	0
合 計				131	0	0	0	0	2	5	10	59	17	34	4

$$B_1: 1.5 M_D + 1.4 M_L > M_u \quad 94\%$$

$1.5 M_D + 1.5 M_L > M_u \quad 93\%$ (Aと同じ)
すなわち, 今回提案されている

$$1.5(M_D + M_L) \text{ または } 0.9 M_D + 1.5 M_L$$

という破壊の終局限界検討用荷重を用いて破壊安全度を検討しても, 現行指針で設計された橋の大部分は安全で

あるといえる。しかし7%の橋はこの範囲を出ていることとなるが, 上記の終局限界状態での抵抗モーメントの計算には実際配置されている鉄筋を算入していないので, これを算入すれば, この範囲から逸脱するものは2%(3断面)となる。これ等は支間の小さい連続桁の側径間, 桁高の制限をうけた単純桁の支間中央など緊張材

表—3 安全度（荷重係数）の頻度表（B₂）

種 類	構造形式	断面形状	検 討 断 面	検討数	安 全 度 (荷重係数)										
					1.6～ 1.8	1.8～ 2.0	2.0～ 2.2	2.2～ 2.4	2.4～ 2.6	2.6～ 2.8	2.8～ 3.0	3.0～ 3.5	3.5～ 4.0	4.0～ 6.0	6.0～
道路橋	単 純 桁	I 型桁	支 間 中 央	15								6	6	3	
	連 続 桁	箱 桁	中 間 支 点	15							1	2	3	5	4
			中央径間中央	10						1	3		2	4	
			変 曲 点	12				1				1	1	9	
			側径間中央	6				1	1		1	1	1	1	
小 計				58	0	0	0	0	2	1	2	12	11	12	18
鉄道橋	単 純 桁	I 型桁	支 間 中 央	32						5	9	13		5	
		箱 桁		4					1	1			2		
		槽状桁		7								1		6	
	連 続 桁	箱 桁	中 間 支 点	12				3		3	2	1	2	1	
			中央径間中央	12							2	3	3	4	
			変 曲 点	3							1	1			1
			側径間中央	3						2	1				
小 計				73	0	0	0	3	1	11	14	18	9	10	7
合 計				131	0	0	0	3	3	12	16	30	20	22	25

表—4 安全度（荷重係数）の頻度表（B₃）

種 類	構造形式	断面形状	検 討 断 面	検討数	安 全 度 (荷重係数)										
					1.6～ 1.8	1.8～ 2.0	2.0～ 2.2	2.2～ 2.4	2.4～ 2.6	2.6～ 2.8	2.8～ 3.0	3.0～ 3.5	3.5～ 4.0	4.0～ 5.0	5.0～
道路橋	単 純 桁	I 型桁	支 間 中 央	15				1	1	3	4	3	3		
	連 続 桁	箱 桁	中 間 支 点	15	1	1		1		2	2	1	3	3	1
			中央径間中央	10					2		2	1		5	
			変 曲 点	12	1					2				9	
			側径間中央	*1 5				1	1		1	1			1
	小 計			57	2	1	0	3	2	7	7	9	7	3	16
鉄道橋	単 純 桁	I 型桁 箱 桁 槽状桁	支 間 中 央	32	1			3	6	15	1	2	2	2	
				4			1	1				2			
				7							1			6	
	連 続 桁	箱 桁	中 間 支 点	*2 11	1	1	2	1	2	1	1	2			
			中央径間中央	12					1	2	1	4	1	2	1
変 曲 点			3								2			1	
			側径間中央	3				3							
	小 計			72	2	1	3	5	12	18	3	13	3	4	8
合 計				129	4	2	3	8	14	25	10	22	10	7	24

*1 1.6以下（1個），*2 1.6以下（1個）

の図心位置か桁断面の図心に近く配置されているような特別な場合である。

したがって、FIP-CEB 国際指針が提案した荷重係数を用いた場合には、現行のものとほぼ同じ安全度または若干安全側の安全度を与えるものと思われる。

なお、表—6に示されるようにコンクリートの圧縮応

力度の分布を矩形とした場合の抵抗モーメントの差はわずかに 1～2% であるので、実用上は矩形分布として差し支えないと考えられる。

なお、この報告に用いた資料は、建設省、日本道路公団、首都高速道路公団、日本国有鉄道より提供をうけ、昭和 47 年度吉田賞研究奨励金により解析を実施したも

表—5 安全度（荷重係数）の頻度表（B₁）

種 類	構造形式	断面形状	検 討 断 面	検討数	安 全 度 (荷重係数)										
					1.4～ 1.5	1.5～ 1.6	1.6～ 1.7	1.7～ 1.8	1.8～ 1.9	1.9～ 2.0	2.0～ 2.2	2.2～ 2.4	2.4～ 2.6	2.6～ 3.0	3.0～
道路橋	単 純 桁	I 型桁	支 間 中 央	15						1	1	4	2	4	3
	連 続 桁	箱 桁	中 間 支 点	*1 12			2			1	2	1		1	5
			中央径間中央	10							2			7	
			変 曲 点	*2 11			1							10	
			側径間中央	*3 5				1			2		1		1
	小 計			53	0	0	2	2	0	2	5	6	4	6	26
鉄道橋	単 純 桁	I 型桁	支 間 中 央	*4 31						1	4	6	13	4	3
		箱 桁		4					2			1	1		
		槽状桁		7							1		6		
	連 続 桁	箱 桁	中 間 支 点	*5 11	2	1	1	1			3			2	1
中央径間中央			12				1					2	3	6	
変 曲 点			3											3	
			側径間中央	3							3				
	小 計			71	2	1	1	1	1	3	7	9	17	10	19
合 計				124	2	1	3	3	1	5	12	15	21	16	45

*1 1.4以下（3個）, *2 1.4以下（1個）, *3 1.4以下（1個）, *4 1.4以下（1個）, *5 1.4以下（1個）

表—6 抵抗モーメント比の頻度表（A₁）

種 類	構造形式	断面形状	検 討 断 面	検討数	α (%)										
					$\left. \begin{matrix} \sim \\ -3.0 \end{matrix} \right\}$	$\left. \begin{matrix} -3.0 \\ \sim -2.0 \end{matrix} \right\}$	$\left. \begin{matrix} -2.0 \\ \sim -1.0 \end{matrix} \right\}$	$\left. \begin{matrix} -1.0 \\ \sim 0 \end{matrix} \right\}$	$\left. \begin{matrix} 0 \\ \sim 1.0 \end{matrix} \right\}$	$\left. \begin{matrix} 1.0 \\ \sim 2.0 \end{matrix} \right\}$	$\left. \begin{matrix} 2.0 \\ \sim 3.0 \end{matrix} \right\}$	$\left. \begin{matrix} 3.0 \\ \sim 4.0 \end{matrix} \right\}$	$\left. \begin{matrix} 4.0 \\ \sim 5.0 \end{matrix} \right\}$	$\left. \begin{matrix} 5.0 \\ \sim 6.0 \end{matrix} \right\}$	$\left. \begin{matrix} 6.0 \\ \sim \end{matrix} \right\}$
道路橋	単 純 桁	I 型桁	支 間 中 央	15	1		4	7		1	2				
	連 続 桁	箱 桁	中 間 支 点	15				4	2	4	4	1			
			中央径間中央	10			3	7							
			変 曲 点	12				4	3	1	3				1
			側径間中央	6			2	3		1					
	小 計			58	1	0	9	25	5	7	9	1	0	0	1
鉄道橋	単 純 桁	I 型桁	支 間 中 央	32				8	5	4	15				
		箱 桁		4					1		3				
		槽状桁		7					2	3	1	1			
	連 続 桁	箱 桁	中 間 支 点	12				1	1	6	4				
			中央径間中央	12				2	3	2	3	2			
			変 曲 点	3				1	1	1					
			側径間中央	3				1		2					
	小 計			73	0	0	0	13	10	18	25	6	1	0	0
合 計				131	1	0	9	38	15	25	34	7	1	0	1

$$\alpha = \frac{\text{Case 2} - \text{Case 1}}{\text{Case 2}} \times 100 (\%)$$

(Case 1, Case 2 は 図—1, 2 を参照)

のである。

(文責 百島 祐信)

1974.1.6・受付