

## 回帰式による P C 桁橋の設計法について

岩 松 幸 雄\*

### 1. ま え が き

土木構造物は有史以前から存在していたが、当時、その建設に当ってどのように計画し、どのように設計を行っていたかは知るよしもない。とはいえ、当時の人達も経験によって構造物の破壊については知見しており、その後のその理論化についての努力は、いろいろな文献（例えば、成岡昌夫著「構造力学要論」など）にみられるところである。しかし、われわれが知識・経験として力学的設計法を得たのは、比較的最近である。当然、それ以前の設計、例えば長崎の石造アーチ等は、設計図はあったとしても力学的設計を行った形跡はない。

構造物設計法の主軸モデルとして力学の導入は、近代の他の科学と同じく、決定論的な因果律から出発して組み立てられ、そして経験によって知られていた構造物の破壊に対する不確定性は安全率という概念で設定され、経験をもとに数値化された。そして、力学を主軸モデルとする構造計算は材料力学としても材料や部材の理論的解析を可能にし、初期の線形弾性理論からさらに近年の塑性論の発達によって、極限設計法という新しい力学的設計法まで発展した。他方、経験による総合的判断で設定していた安全率に対して、確率論の構造設計への応用によって、信頼性理論等による理論解の道が開かれてきた。

これ等一連の力学的安全性に関する理論の研究は、構造物の建造が職人の勘と経験のみで行われていたことを考えれば、いかに評価しても評価し過ぎることはない。しかしながら、土木構造物のほとんどが不特定多数の利用者を対象に公共施設として建設され、そして経済力の拡充にあわせて、いわゆる価値観の多様化時代を迎えた現状では、力学的安全性の理論的解析のみでは事業実施が困難になってきたことも事実である。すなわち、現今における欲求の多様化、価値観の変化の動向を受けて事業計画における意図の鮮明化、つまり、構造物の機能・効果に対する注文の顕在化によって、特殊な場合を除い

て強固で安全な構造物諸元を求めると同様に、要望にこたえる機能・効果を発揮する構造物諸元を求めることが重視される傾向が生じている。このことは、こわれない構造物の設置自体がもっとも重要な課題であった時代に比べて、また、経済性・低廉性が主要課題であった経済力不足時代に比べて、いまや利便性、景観性、環境適合性、経済性から独立した省資源性等々へと土木設計における設計条件となるべきもの（計画意図の重視すべき要素・側面）のウエイトに変動があることを示している。

他方、電子計算機の普及と大型化に伴って、時代の先端技術を駆使する大型で特殊な構造のみならず、一般的で類例の多い構造物についても、高級な力学モデルによる膨大な設計計算を行う傾向が生じている。しかし設計計算の精度の向上にもかかわらず、設計そのものの精度が本当に向上しているかについては、疑問なしとしない。本来、設計計算の精度の向上は設計そのものの精度の向上につながるべきはずのものであろう。設計には、その力学的な側面だけに注目した場合でも荷重およびその載荷の不確実性、材料強度のばらつき、さらに施工時の寸法誤差等の多くの誤差による不確実性をはらんでいる。これらの誤差の正確な評価は現状ではきわめて困難である。このような多くの不確実な誤差を容認した上で、設計計算にどれほどの精度を要求するかについては設計全体の精度という観点から決定されるべきであろう。もし、設計全体の精度に比べて設計計算の精度が極度に高すぎる場合には、技術者は設計計算の精度向上に用いている努力を構造物の設置による機能・効果の質・量・確実性等にかかわること、例えば先にも述べたように、経済性、利便性、環境適合（景観、自然保護）性、有効性、確実性等を含めたそれらの目的、設置意図との接近に向けられるべきかもしれない。

また、同様な観点からすれば、安全に存在しうることが第一義的に重要だとしても構造物の機能・効果の側面をも加味した設計が本来的な設計のはずであるが、それらを設計に組み込む場合の精度が力学的側面ほどでない

\* 工博 建設省土木研究所 システム課長

現在では、その全体の精度に見合った簡略な力学的設計計算の方法も開発されてしかるべきであろう。本設計法が以上のような問題のすべてに対して解答を与えるものではもちろんないが、現行の力学的厳密解を主軸とする設計法に対して、簡単な演算でなお工学的精度はそれほど落ちない設計法が提案されれば、その利用によって得られた演算時間等の余裕を、いまま少し力学的安全性以外の事業目的へのアプローチに振り向けられよう。

つまり、現状の設計の成果よりも、少しぐらいは精度が落ちてても、もしその誤差が常に安全側であることが保証され、計算機の容量を気にすることなく、場合によっては卓上計算機でも処理可能な設計法が提示できれば有効に活用できるのではないかとこの観点から、現在建設省で供用されているポストテンション方式PC単純桁橋の自動設計プログラムのアウトプットデータをサンプルとして統計処理して回帰式によって、主要構造物諸元を算定する簡略な設計システムおよびその設計例について以下に紹介する。

ここで提案する設計法は、精度がよいとはいえないが簡潔さを特長とする統計処理による設計である。この設計法は、結局、熟達した設計者の判断の内容を詳細に分析するという内容をその内容としている。熟達した設計者は設計のキーポイントとなる設計諸元について多くの条件から経験的にきわめて正確に推定することができる。

このような力学的安全性のみならず、機能的な側面も含めて条件から順射影的に主要な構造物諸元を指定する設計法を、従来の初期値設定の後、その変更（フィードバックによる）によって力学的安全性を確認する累積設計法に対して、ここでは直接設計法と呼ぶ。ここで提案する統計処理による設計法も、いわば過去の設計データを分析してきわめて簡略な形でキーポイントとなる構造物諸元を算定式によって設定し、それを中心に他の設計諸元も数値として設定する簡単な設計システムで、いわば先述の直接設計法のサブ・システムである。

以下、本設計法の中核をなす主要諸元（桁高、PCケーブル）指定の回帰式の設定、および図化を含む全体システムについて紹介する。

## 2. PC 桁橋の主要な構造物諸元算定式について

設計はその前段に行われる目的的条件（交通量、景観など）および環境条件（気象、地象など）等の設定にはじまり、施工のための行動指針の一部である作図によって終わる。したがって、設計計算の精度を論ずる場合、設計条件の設定の精度、モデルの実荷重作用時のレ

スポンズとの近似性、施工精度等との釣り合いで考えるべきで単に設定されたモデルのみによる厳密な計算を行うことにどれほどの意義があるかは疑問なしとしない。若干、精度の悪いモデルであっても、もしその誤差が常に安全側であることが保証されていれば有効に活用することができるのではないか、このことを検証するのが本報文のテーマでもある。

本章では、ポストテンション方式PC単純T桁橋の設計データをもとにそのキーポイントとなる構造物諸元として桁高およびPC主ケーブルを取り上げ、それぞれの算定式を設定する過程について以下記述する。なお、その他の構造物諸元の設定については 3.(1) で述べる。

### (1) 桁高算定式の提案

#### a) 桁高の決定に参画する要素およびその組み合わせ

桁高の決定に参画する要素を無制限に抽出すると、相当数になるが、ここではもっとも寄与をしていると思われる要素として、支間、幅員構成、主ケーブル本数および主桁本数を採用した。また、累積設計から得た桁高とそれに参画する要素の相関行列およびサンプルから要素の組み合わせを行うと次のようなモデル式が想定される。

$$H = f(L, NPC, N, W/N, W'/W, W/L) \dots (1)$$

$H$  : 桁高 (cm)     $NPC$  : 主ケーブル本数 (本)

$L$  : 支間 (m)     $N$  : 主桁本数 (本)

$W'$  : 本線幅 (m)     $W$  : 本線幅 + 歩道幅員 (m)

#### b) 統計処理に用いたデータの説明

統計処理に用いたサンプルは次の条件によるプログラムのアウトプットを用いた。

- ① 形式：道路橋単純PC桁橋
- ② 種別：ポストテンション方式T桁
- ③ 荷重：TL-20
- ④ 路面線形：直線
- ⑤ 支間：20~40 m
- ⑥ 斜角：90°
- ⑦ コンクリート強度 主桁： $\sigma_{ck} = 400 \text{ kg/cm}^2$   
横桁： $\sigma_{ck} = 300 \text{ kg/cm}^2$
- ⑧ 主ケーブル径：12  $\phi$  7
- ⑨ 主桁ケーブル配置：放物線配置
- ⑩ 荷重分配：Guyon Masonnet の方法

c) 要素の整理 回帰分析による桁高を推定するモデル式の設定は、より少ない説明変数により目的変数を最大限に説明することが最良とすれば、先に決めた要素の組み合わせから設定したモデル式を回帰分析および主成分分析を行い要素の整理を行う。

1) 式(1)のモデル式による重回帰分析：要素の組み合わせを独立変数にし、桁高をそれらの従属変数と考

表-1 重回帰分析の結果

項 目	係 数	切 片 (a)	重相関係数	平 均 値	標 準 偏 差	相 関 係 数	回 帰 係 数	t 値
(1)	L			31.00	5.76	0.978 183	0.732 290×10 <sup>4</sup>	25.853 1
(2)	NPC			9.85	1.88	0.962 834	-0.477 622×10 <sup>4</sup>	-7.077 6
(3)	N	-119.024 09	0.995 21	5.15	1.05	-0.065 280	-0.135 912×10 <sup>4</sup>	-1.666 4
(4)	W/N			1.82	0.11	0.164 606	0.553 759×10 <sup>2</sup>	20.085 8
(5)	W'/W			0.76	0.14	0.014 536	0.107 019×10 <sup>2</sup>	5.271 8
(6)	W/L			0.31	0.09	-0.663 150	0.572 884×10 <sup>4</sup>	0.453 8

え、桁高の回帰式を要素の組み合わせの1次結合で表わせば次式で表現できる。

$$H = a + b \cdot L + c \cdot NPC + d \cdot N + e \frac{W}{N} + f \frac{W'}{W} + g \frac{W}{L} \quad (1) \quad (2) \quad (3) \quad (4) \quad (5) \quad (6)$$

.....(2)

また式(2)の重回帰分析の結果は表-1のとおりである。

2) 主成分分析：重回帰式が成立するために必要な条件は、説明変数のおのおのが独立であることであり、設定した説明変数間に独立性があるかを調べるために式(2)について主成分分析を行い、その相関行列を示せば表-2のとおりである。

表-2 相 関 行 列

(1)	1.0					
(2)	0.985 69	1.0				
(3)	0.0	-0.004 97	1.0			
(4)	-0.0	0.033 23	-0.028 54	1.0		
(5)	0.0	-0.004 70	-0.653 98	-0.285 62	1.0	
(6)	-0.661 45	-0.641 48	0.701 38	0.172 05	-0.519 47	1.0

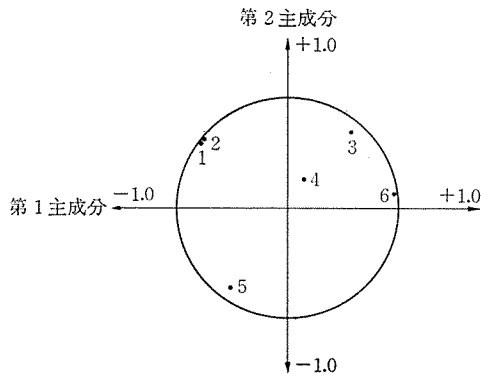


図-1 回帰式変数のグループ分け図

相関行列から L, NPC を除いてはおのおのの相関がそれほど高くない。したがって、回帰分析するにあたって説明変数として取り扱うことは、回帰係数の精度上は問題がないと思われる。

表-2 および 図-1 から L と NPC の相関はきわめて高くその結果から見る限りにおいてはどちらかの変数で代表させ得るが、ここでは式の利用(例えば PC ケーブルの増減)を考慮してそのままの形とした。なお、NPC については 2.(4) で説明する。

3) 分析結果による要素の整理：主成分分析の結果、つまり表-3の相関行列にみる対角要素と他の要素との関係、表-4の寄与率および 図-1 のグループ分け図の各変数の位置等から、当初設定した説明変数は同時に扱うことができる。ただし、L と NPC は表-2 の第1行にみれるようにきわめて相関が高く、実際にも NPC は L で説明可能であるが、ここではそれぞれが主要な構造物諸元であることから別々の説明変数として取り扱った。

しかし、重回帰分析の結果によると、N と W/L の t 値がきわめて小さく、回帰分析上有意でないとの判断から桁高算定式の説明変数からはずし、最終的には以下の提案式を設定した。

$$H = f(L, NPC, W/N, W'/W) = a + b \cdot L + c \cdot NPC + d \frac{W}{N} + e \frac{W'}{W} \quad \dots (3)$$

(2) 桁高算定のための提案式の検討

表-3 固有値と累積寄与率

主成分	固有値	累積寄与率
1	2.780	0.463
2	1.833	0.769
3	1.025	0.940
4	0.325	0.994
5	0.028	0.999
6	0.009	1.000

表-4 主成分の因子負荷量

成分 項目 固 有 値 変 数	第 1 主 成 分		第 2 主 成 分		寄 与 率	第 3 主 成 分		寄 与 率
	固有ベクトル	因子負荷量	固有ベクトル	因子負荷量		固有ベクトル	因子負荷量	
	2.780 326		1.833 015			1.024 552		
1	-0.475 125	-0.792 2	0.442 787	0.599 5	0.987	-0.061 689	-0.062 4	0.991
2	-0.469 946	-0.783 6	0.447 807	0.606 3	0.982	-0.030 000	-0.030 4	0.983
3	0.340 640	0.568 0	0.506 429	0.685 6	0.793	-0.366 927	-0.371 4	0.931
4	0.090 973	0.151 7	0.208 293	0.282 0	0.103	0.923 961	0.935 2	0.978
5	-0.307 286	-0.512 4	-0.539 928	-0.731 0	0.797	-0.071 805	-0.072 7	0.802
6	0.578 507	0.964 6	0.109 685	0.148 5	0.953	-0.042 417	-0.042 9	0.955

われわれが橋梁設計で設計計算に先立って行う初期値設定の桁高の値は、支間の 1/20 を目安とするように、この場合の提案式も線形の方がよりわれわれの感覚にフィットしようし、利用面からも得策であろう。とはいえ、本来、桁高算定に対して、各要素の指数がいくらの場合が最適かについての検討が必要であるとの認識から本節では、線形および非線形重回帰分析による相対誤差で検証した。

その結果、線形重回帰分析による相対誤差は 1.024 93、非線形による相対誤差は 1.003 28 となり、非線形にすれば式を繁雑にするだけで、それによる適用範囲（支間 20 m~40 m）内での卓越した有理性は見い出せなかった。したがって、桁高の算定式は線形によるものとした。その結果を以下に示す。

**a) 線形重回帰分析** 前節 2.(1)での検討結果をもとに提案式を線形で表わすと式(3)のようになり、その重回帰分析の結果は表-5である。なお、線形重回帰分析の残差の例を表-6に示す。

**b) 非線形重回帰分析** 非線形重回帰分析の要素の組み合わせ指数を式のように  $\alpha, \beta, r$  と考えた。(ただし、主ケーブル本数のみは考えない)。

$$H = a + b \cdot L^\alpha + c \cdot NPC + d \left(\frac{W}{N}\right)^\beta + e \left(\frac{W'}{W}\right)^r \dots\dots\dots (4)$$

そこで、式(4)の各指数を1を中心に増減量0.1ステップの全組み合わせについて解析し、もっとも重相関係数の高いケースの  $\alpha, \beta, r$  を求めたが、その結果は式(5)および表-7に示すとおりである。

$$H = a + b \cdot L^{1.1} + c \cdot NPC + d \left(\frac{W}{N}\right)^{1.7} + e \left(\frac{W'}{W}\right)^{3.6} \dots\dots\dots (5)$$

(3) 桁高算定式の設定

**a) 重回帰分析の残差による算定式の処理** 先の重回帰分析の結果より桁高算定式は線形としたが、この線形重回帰分析から設定した提案式によって算定される桁高(H)は、当然のことながら残差を含む。そしてこの残差の処理方法については桁高算定式の利用方法によって、次のようなことが考えれる。

- ① 道路計画の縦断線形の設定や累積設計成果の桁高検証に利用するために平均値で処理する場合

- ② 累積設計の桁高の初期値設定に利用する場合は、累積設計の特質であるフィードバックで桁高は増加しうるので、小さな値が算定できるような処理方式
- ③ 条件から直接諸元を指定する直接設計として利用する場合は安全側と考えられる大きめの値が算定できるような処理方式

したがって、ここでは平均値および信頼区間より求める次の2方式について示す。

1) 平均値による回帰式：誤差分布は正規分布と考えられ、平均値による回帰式は誤差平均が0で正負の誤差率が等しいと考えられるので回帰式そのものである。つまり 2.(2)節の a) より次式ようになる。なお、各変数の単位は 2.(1)節の (a) と同じである。

$$H = -128.16 + 7.0/L - 4.0/NPC + 55.78 \frac{W}{N} + 15.16 \frac{W'}{W} \dots\dots\dots (6)$$

2) 信頼区間による回帰式：誤差分布は同様に正規分布と考えられるので、正負の残差が生じる。正規分布の性質から知られるように残差領域全体から求めると、95% 信頼値では  $u \pm 1.64 \sigma$ 、97.5% の信頼値に対しては  $u \pm 1.96 \sigma$  の補正を行なえばよい。平均値  $u$  は0、標準偏差値は 2.(2)項の a) より 3.29 cm として式(6)に次の補正を行う。

- ① 95% の場合  $0 \pm 1.64 \times 3.29 \rightleftharpoons \pm 5.40$  cm
- ② 97.5% の場合  $0 \pm 1.96 \times 3.29 \rightleftharpoons \pm 6.45$  cm

**b) 施工誤差による桁高算定式の考察** 一般に物をつくる場合、それは設計寸法と多少異なって製作されるのが普通である。原則的には設計者は、現状の施工技術のレベルを認識して、その誤差を組み込んだ設計にすべきは論を待たない。

そこで、本研究でも筆者等が行ったPC桁の施工実態調査をもとにその誤差が応力度にどう影響するか、また、そのためには桁高算定式はどう補正すべきかについて検討したのが表-8であるが、桁高施工誤差の最大値をとっても先の残差による補正値におよばないこと、また、たとえ考慮してもその影響は統計処理上あらわれないことから施工誤差による算定式の補正は省略した。

**c) 桁高算定式の設定** 回帰分析による残差および施工誤差による検討を行ったが、次の回帰式による直接設計システムのために桁高算定式は次のように設定し

表-5 重回帰分析の結果(線形)

項 目	係 数	切片 (a)	重相関係数	平均値	標準偏差	相 関 係 数	回 帰 係 数	t 値
(1)	L			31.00	5.76	0.9794	$0.701 \times 10^1$	24.86
(2)	NPC	-128.2	0.995 2	9.84	1.89	0.9641	$-0.401 \times 10^1$	-4.65
(3)	W/N			1.84	0.12	0.1552	$0.558 \times 10^2$	21.61
(4)	W'/W			0.75	0.18	0.0152	$0.151 \times 10^2$	9.32

相対誤差 : 1.02%                      絶対誤差 : 1.64 cm                      標準偏差 : 3.29 cm

表-6 重回帰分析(線形)による残差の

NO	サンプルの桁高 (cm)	推定値 (cm)
26	120.00000	124.83831
27	120.00000	122.20179
28	120.00000	117.95518
29	120.00000	115.52958
30	120.00000	124.03767
31	142.00000	139.48838
32	131.00000	127.86683
33	144.00000	141.81269
34	138.00000	137.77004
35	133.00000	132.05059
36	152.00000	152.19150
37	140.00000	140.01571
38	136.00000	136.82414
39	132.00000	131.95215
40	130.00000	129.06454
41	138.00000	138.86398
42	136.00000	136.22746
43	131.00000	131.98084
44	130.00000	129.55525
45	136.00000	138.06333
46	149.00000	149.49992
47	140.00000	137.87837
48	151.00000	151.82423
49	146.00000	147.78157
50	140.00000	142.06213
51	160.00000	162.20304
52	147.00000	150.02724
53	144.00000	146.83568
54	140.00000	141.96369
55	140.00000	139.07608

表-7 重回帰分析の結果(非線形)

項 目	係 数	切 片 (a)	重相関係数	平均値	標準偏差	相 関 係 数	回 帰 係 数	t 値
(1)	$L^{1.10}$	±60.0	0.9954	43.78	8.93	0.9793	$0.4641 \times 10^4$	25.63
(2)	$NPC$			9.84	1.89	0.9641	$-0.4564 \times 10^4$	-5.32
(3)	$(W/N)^{1.70}$			2.84	0.30	0.1563	$0.2189 \times 10^2$	22.45
(4)	$(W/W)^{3.60}$			0.44	0.35	0.0065	$0.7847 \times 10^4$	9.59

相対誤差=1.00%

絶対誤差=1.60 cm

標準偏差値=3.20 cm

一 例

絶対誤差 (cm)

-4.83831  
 -2.20179  
 2.04482  
 4.47042  
 -4.03767  
 2.51162  
 3.13317  
 2.18731  
 0.22996  
 0.94941  
 -0.19150  
 -0.01571  
 -0.82414  
 0.04785  
 0.93546  
 -0.86398  
 -0.22746  
 -0.98084  
 0.44475  
 -2.06333  
 -0.49992  
 2.12163  
 -0.82423  
 -1.78157  
 -2.06213  
 -2.20304  
 -3.02724  
 -2.83566  
 -1.96369  
 0.92392

相対誤差 (%)

-4.0  
 -1.8  
 1.7  
 3.7  
 -3.4  
 1.8  
 2.4  
 1.5  
 0.2  
 0.7  
 -0.1  
 -0.0  
 -0.6  
 0.0  
 0.7  
 -0.6  
 -0.2  
 -0.7  
 0.1  
 -1.5  
 -0.4  
 -0.5  
 1.1  
 -0.5  
 -1.2  
 -1.5  
 -1.4  
 -2.1  
 -2.0  
 -1.4  
 0.7

相関係数は 0.98521 である。一般にもたとえば建設省制定土木構造物標準設計の 13~17 巻を見ても幅員はほとんど関係なく、ある支間ごと（等ピッチでない）に主ケーブル本数は増加している。したがって、表-2 相関行列の結果等から主ケーブル本数の算定式の要素は支間のみとし、その一次結合として回帰分析を行った。

a) 主ケーブル本数と支間の回帰係数

$$NPC = a + b \cdot L$$

NPC: 主ケーブル本数

L: 支間

標準偏差:  $\sigma = 0.32$

支間(m)	a	b	t 値	相関係数	n
$2000 \geq L \leq 4000$	-0.155	0.32	69.93	0.9852	150

b) 主ケーブル本数算定式の設定

上記回帰係数を代入すると主ケーブル本数の算定式は次式のように書ける。

$$NPC = -0.155 + 0.32 \cdot L \dots\dots\dots (8)$$

式(8)に重回帰分析による残差補正值  $r$  を加えて整理して式(9)を設定した。

$$r = 1.64 \cdot \sigma = 1.64 \times 0.32 \approx 0.525$$

$$NPC = 0.370 + 0.32 \cdot L \dots (9)$$

ここで  $L$  は実数であるが、NPC は整数としているので小数点以下は切り捨てられて整数値となる。

3. PC 桁橋の現状データを処理した回帰式による設計システムについて

前章で設計のキーポイントとなる桁高と主ケーブル本数の算定式を提示したが、本章ではその他の構造物諸元の

設定について記述するとともに、ポストテンション方式 PC 単純 T 桁橋の現状データを処理した回帰式による直接設計法のプロセス、その設計例および累積設計との比較について以下記述する。

(1) 算定式による以外の構造物諸元の設定

桁高および主ケーブル本数以外の構造物諸元については適用支間 20~40 m 内では回帰分析しても意味がな

た。

$$H = -122.76 + 7.0/L - 4.0/NPC + 55.78 \frac{W}{N} + 15.16 \frac{W'}{W} \dots\dots\dots (7)$$

(4) 主ケーブル本数の算定式

先の主成分分析の項で述べたように、主ケーブル本数 NPC と支間 L とは相関が強く、表-2 に示すように

表-8 PCポステン桁の誤差の統計量(絶対誤差)

統計量	断面寸法							
	フランジ幅 $B_1$	ウェブ幅 $B_2$	下フランジ幅 $B_3$	桁高 $H_1$	フランジ高 $H_2$	ウェブ高 $H_3$	下ハンチ高 $H_4$	下フランジ高 $H_5$
最大値	14.000	20.111	10.667	34.000	9.667	5.333	8.667	18.667
最小値	-21.000	-5.556	-4.667	-25.667	-9.000	-20.333	-10.000	-1.500
平均値 $\mu$	7.808	2.766	1.979	4.311	2.234	-0.300	0.538	1.644
不偏分散 $\sigma^2$	12.922	8.372	4.610	13.594	3.986	10.298	3.222	3.322
不偏標準偏差 $\sigma$	3.595	2.893	2.147	3.687	1.996	3.209	1.795	1.823
ひずみ度	-1.958	2.326	0.468	0.458	-0.650	-3.174	-0.131	3.771
尖度	13.886	13.204	4.516	21.621	8.879	6.792	8.089	26.649
データ量	456	431	458	457	431	453	432	431

表-9 主桁本数と幅員の関係

支間 $l$	幅員 $W$ (cm)	主桁本数 $N$
$2000 \leq l \leq 4000$ (cm)	$750 \geq W$	4
	$950 \geq W > 750$	5
	$1200 \geq W > 950$	6
	$W > 1200$	7

表-10 支間と主桁断面寸法の関係

支間 $l$	$B_0$
$2000 \leq l < 2500$ (cm)	15 (cm)
$2500 \leq l < 3500$	16
$3500 \leq l \leq 4000$	18

支間 $l$	断面要素	$B$	$B_2$	$T_2$	$T_3$
$2000 \leq l \leq 4000$ (cm)		150(cm)	50(cm)	21(cm)	20(cm)

く、一般に累積設計でも直接的に指定されている。本システムでも建設省制定土木構造物標準設計および建設省土木研究所の自動設計プログラムを参考に以下のように設定した。

**a) 主桁本数の設定** 累積設計計算の結果や標準設計から幅員に対する主桁本数を処理して表-9のように設定した。

**b) 主桁断面寸法の設定** 主桁断面を構成する諸要素のうち自動設計プログラム内で一定としている要素について分類すると表-10のようになり、ここでもそれにならって設定した。

**c) 横桁本数の設定** 横桁はその間隔が 10 m 以下になるように設定している。

**d) 床版の各諸元の設定** 床版における床版厚、横締め間隔およびPC鋼線は、累積設計例から、次のように定めた。

床版厚： $T=18$  cm

横締め間隔：50 cm

PC鋼線：12φ5

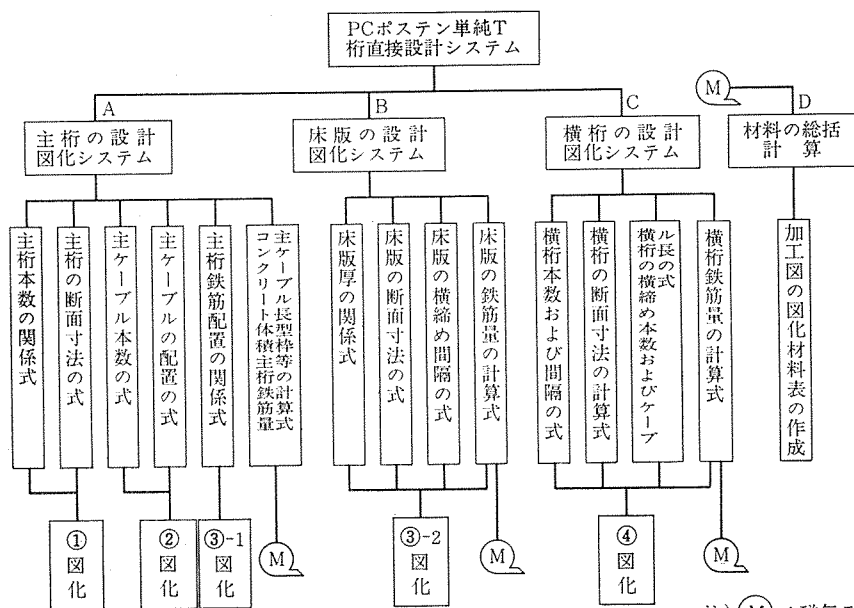
**e) 横桁の断面寸法の設定** 横桁のウェブ厚は、累積設計の場合、支間 20 m 以上については一律 25 cm を用いている。したがって、直接設計の場合も 25 cm とした。

(2) PC桁橋の直接設計システムのプロセス

PC桁橋の現状設計データを処理した回帰式による本設計システムは、従来の累積設計のモジュールとサブ・システムとがからみ合った複雑なシステムを簡素化し、図-2 に示すようにハイラルキー構造のプロセスフローになっている。したがって、インプットが簡単で逐次処理が可能のため中・小型の電子計算機、物によっては卓上電子計算機でも図化を含むシステムの処理が可能である。なお、図中で式と書いているのはプログラミング言語 ALGOL でいうブール式も含む代入文のことである。

(3) 直接設計システムによる設計例

本直接設計システムのアウトプットは図面 5 枚で構成される。図-2 のプロセスフローの図化①の部分に相当するアウトプットが図-3 に、図化②が図-4、図化③-1 および図化③-2 が図-5、図化④が図-6、図



注) (M) :磁気テープ

図-2 直接設計のプロセスフロー

化⑤が図-7に対応する。また、本設計例は次の条件のものである。

支間：35 m 総幅員：17 m 斜角：90°  
橋格：一等橋

(4) 累積設計と直接設計との材料比較

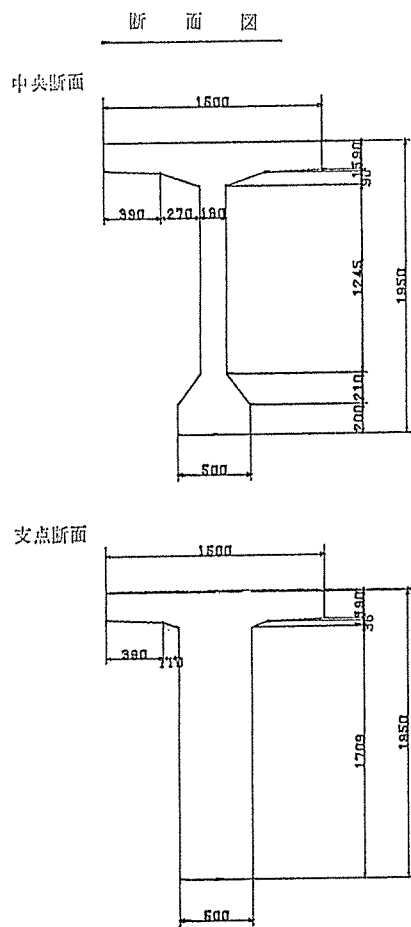
土木研究所で筆者等が開発した自動設計プログラムのアウトプットと本システムのアウトプットによる材料比較を表-11に示した。それに見る限り主要部材のほとんどが差はないといえよう。

(5) 桁高制限に対する本システムの適用性について

PC桁橋は同一支間のプレートガーダ橋に比較して一般に桁高は低い、それでも環境条件で桁高が制限される場合がある。本節はこのような桁高制限に対して本システムの適用性について検討した事項について述べるが、まず結論からいえば、桁高制限の設計データを使っていないので適用には限界がある。本システムを簡潔に設定し得た理由の1つが桁高を除く主桁断面寸法、ケーブル配置パターン等を固定化しているためでもあり、そ

表-11 材料比較

設計条件	支間	35.0 m				
	幅員	9.0	歩道幅員(左)2m, (右)2m			
	載荷重	1000台/日以下				
種別	単位	(A) 累積設計	(B) 直接設計	(B)-(A)	(B)/(A)	
桁高	cm	190	195	5	1.026	
主桁本数	本	7	7	0	1.000	
PC鋼線本数	〃	11	11	0	1.000	
コンクリート	m <sup>3</sup>	28.56	29.55	0.99	1.035	
PC鋼線	t	1.25	1.24	-0.01	0.992	
シースト	m	344.69	342.32	-2.37	0.993	
グラウト	m <sup>3</sup>	0.55	0.54	-0.01	0.982	
型枠	上突縁・側面および桁端面	m <sup>2</sup>	15.17	15.96	0.79	1.052
	横桁取付	〃	4.51	4.91	0.40	1.089
	その他	〃	158.48	179.73	21.25	1.134
定着具	主ケーブル用	個	22	22	0	1.000
	横締め用	〃	152	152	0	1.000
鉄筋	端桁	t	2.65	2.63	-0.02	0.992
	中桁	〃	2.51	2.49	-0.02	0.992



設計条件

支間	CM	3500
車道巾	CM	1300
歩道巾	CM	2x200
総幅員	CM	1700
角度		90
橋格		1等橋
荷重		L-20 T-20
型式		T型ポストテンション

端断面の諸定数

		単位	総断面	
断面積		CM <sup>2</sup>	11781.83	
中立軸	上縁	CM	82.44	
	下縁	CM	-112.56	
PC鋼材圆心と中立軸との距離		CM	0.00	
断面二次モーメント		x100 CM <sup>4</sup>	437824	
断面係数	上縁	CM <sup>3</sup>	531054.62	
	下縁	CM <sup>3</sup>	-388983.56	
断面係数		PC鋼材圆心	CM <sup>3</sup>	0.00
回転二次半径		CM	60.96	
断面一次モーメント		CM <sup>3</sup>	316720.18	

中央断面の諸定数

		単位	総断面	純断面	PC鋼材換算断面	場所打ち換算断面
断面積		CM <sup>2</sup>	7376.50	7201.60	7492.16	8314.86
中立軸	上縁	CM	74.47	71.90	76.11	69.52
	下縁	CM	-120.53	-123.10	-118.89	-125.48
PC鋼材圆心と中立軸との距離		CM	-106.03	-108.60	-104.39	-110.98
断面二次モーメント		x100 CM <sup>4</sup>	354853	334714	367655	400669
断面係数	上縁	CM <sup>3</sup>	476485.31	465539.68	483057.87	576342.25
	下縁	CM <sup>3</sup>	-294417.62	-271899.31	-309238.81	-319306.93
断面係数		PC鋼材圆心	CM <sup>3</sup>	-334681.43	-308201.93	-352192.68
回転二次半径		CM	69.36	68.17	70.05	69.42
断面一次モーメント		CM <sup>3</sup>	232903.12	0.00	0.00	0.00

図-3 主桁断面寸法



PC鋼線曲げ上げ図

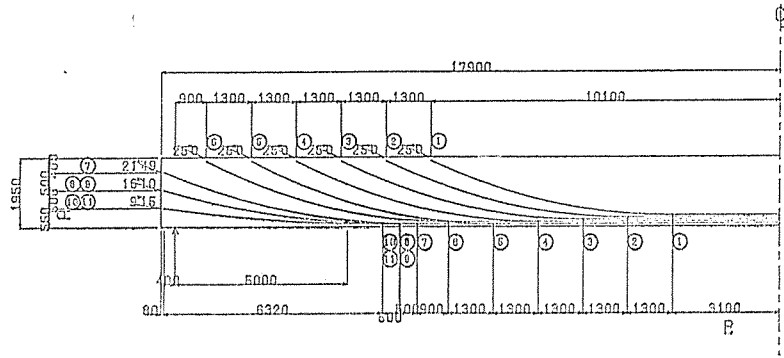
桁 高	195.0
-----	-------

ケーブル曲げ上げ諸値

PCケーブル本数	11
曲げ上げケーブル本数	6
端部定着ケーブル本数	5
曲げ上げ角	25.0
端部定着段数	3
定着間隔	50.0
A	55.0

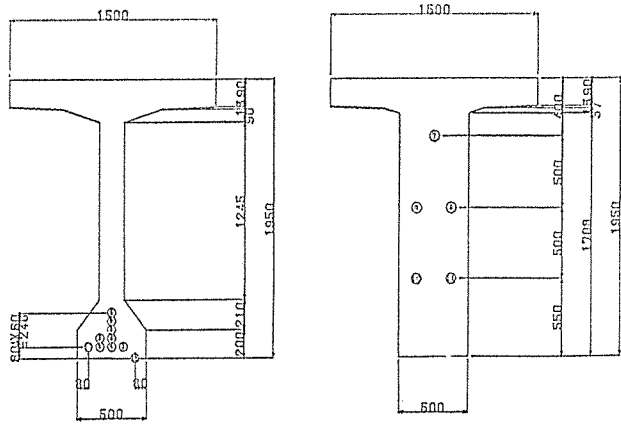
ケーブル配設諸値

B	310.0
放物線水平長	700.0
上総定着間隔	130.0



中央断面 配設図

支点断面

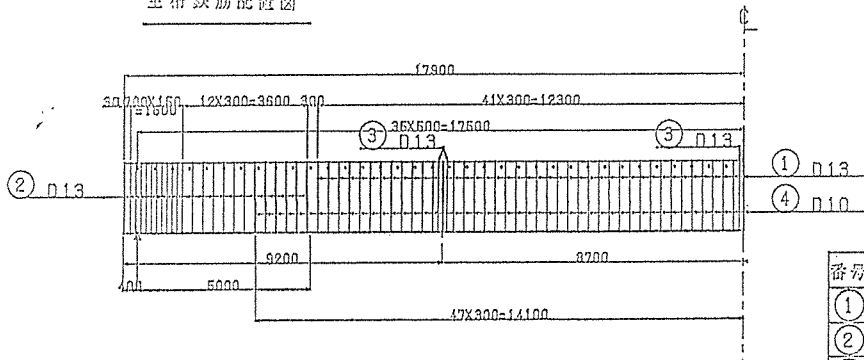


プレストレッシング (パーシャルプレストレス)

番号	出張 順序	張力 Top / Bottom	張力 kg / cm <sup>2</sup>	伸び (mm)	ケーブル長 (mm)
①	11	54.6	11813.2	111	20640
②	10	54.8	11874.5	125	23280
③	9	55.1	11935.9	139	25900
④	8	55.4	11997.3	153	28540
⑤	7	55.7	12058.7	167	31180
⑥	6	56.0	12118.6	181	33740
⑦	1	55.4	11996.0	193	36020
⑧	2	53.9	11682.2	190	35820
⑨	3	53.9	11682.2	190	35820
⑩	4	52.2	11299.5	188	35680
⑪	5	52.2	11299.8	188	35700

主桁鉄筋配設図

図-4 PC鋼線配置図



鉄筋表

番号	径	長さ(mm)	本数	単位重量 (kg/m)	1本当りの 重量 (kg)	重量 (kg)
①	D13	4250	83	0.995	4.229	351.0
②	D13	4300	48	0.995	4.278	205.4
③	D13	4300	12	0.995	4.278	51.3
④	D10	2150	95	0.559	1.202	114.2
⑤	D13	2650	131	0.995	2.637	345.4
⑥	D10	1000	95	0.559	0.559	53.1
⑦	D13	36950	14	0.995	36.765	514.7
⑧	D13	5300	4	0.995	5.273	21.1
⑨	D10	900	70	0.559	0.503	35.2
⑩	D13	800	262	0.995	0.796	208.6
⑪	D10	700	121	0.559	0.391	47.3
⑫	D10	1650	121	0.559	0.922	111.6
⑬	D10	1300	70	0.559	0.727	50.9
⑭	D13	800	524	0.995	0.796	417.1
⑮	D13	36950	10	0.995	36.765	367.7
主桁鉄筋重量				端 桁	2.633	
				中 桁	2.492	
⑮	D10	36950	10	0.559	20.655	206.6

断面図

中央断面

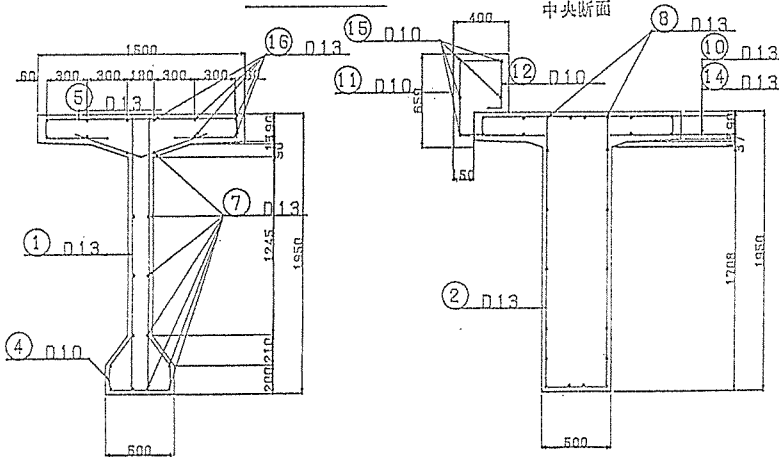
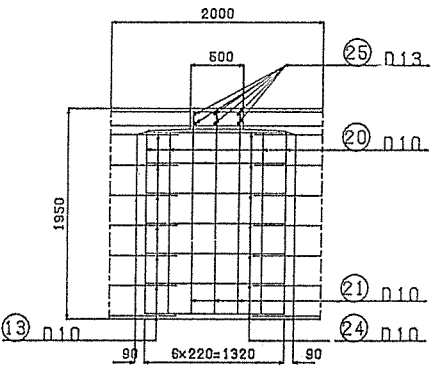
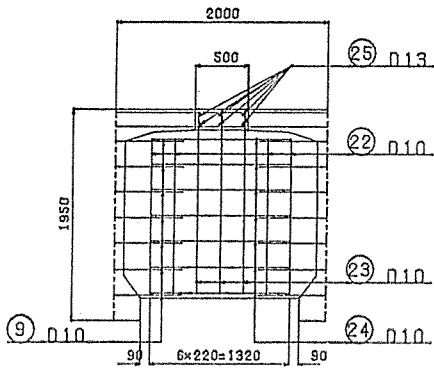


図-5 側面図

横 桁



横桁プレストレスング(フルプレストレス)

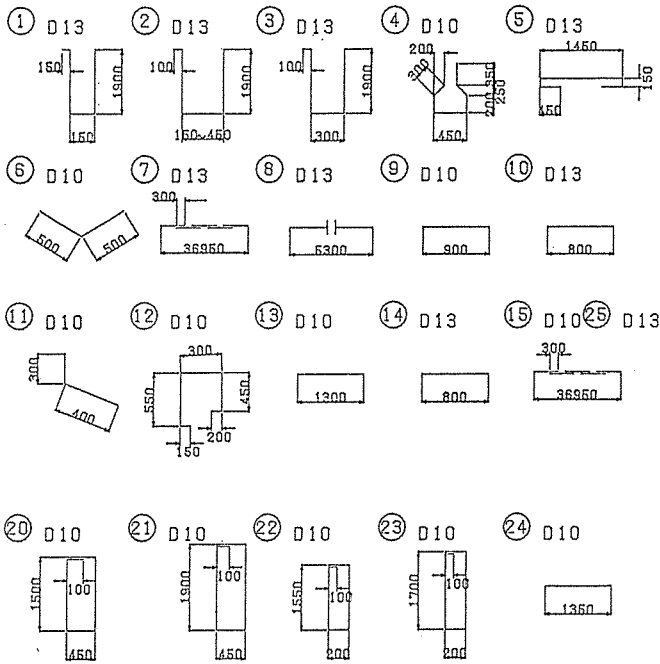
種 別	設計作業時の応力		伸び(mm)	ケーブル長(mm)	本数	重量(kg)
	Ton/CABLE	kg/mm <sup>2</sup>				
横 桁	30.7	130.5	62	12400	5	114.6
床 版	30.7	130.5	87	13400	71	1758.2
合 計				1013400		1.873

鉄筋表

番号	径	長さ(mm)	本数	単位重量(kg/m)	1本当り重量(kg/本)	重量(kg)
②①	D10	4000	48	0.559	2.236	107.3
②②	D10	4800	36	0.559	2.683	96.6
②③	D10	3600	24	0.559	2.012	48.3
②④	D10	3900	18	0.559	2.180	39.2
②⑤	D10	1350	420	0.559	0.755	317.0
②⑤	D13	36950	36	0.995	36.765	1323.5
合計重量 (t)						1.932

図-6 横桁の設計

主桁・横桁鉄筋の加工図



横桁床版の材料表

種 別	仕 様	単 位	1連当り数量	摘 要
主 桁				
床 版	コンクリート	$ck = 300 \frac{kg}{cm^3}$	m <sup>3</sup>	48.6
	P.C 鋼線	1.2φ	t	1.873
	シ ー ス	φ35	m	1013.4
	グラウト		m <sup>3</sup>	0.976
横 桁	型 枠		m <sup>2</sup>	218.5
	鉄 筋	SDB30, D10, D13	t	1.932
橋 面 工 事	舗 装	車 道	m <sup>2</sup>	322.2
		歩 道	m	143.2
	地 覆	コンクリート	m <sup>3</sup>	55.8
		型 枠	m	109.5
	鉄 筋	t	0.207	
支 承				

主桁材料表

種 別	仕 様	単 位	1連当り数量
主 桁	コンクリート	$ck = 400 \frac{kg}{cm^3}$	m <sup>3</sup>
	P.C 鋼線	1.2φ	t
	シ ー ス	φ35	m
	グラウト		m <sup>3</sup>
横 桁	型 枠	上突縁側面及び桁端部	m <sup>2</sup>
		横 桁 取 付 部	m
		そ の 他	m
定 着 具	主ケーブル用	1.2φ	個
	横桁め用	1.2φ	個
鉄 筋	SDB30	端 桁	t
	D10, D13	中 桁	t

図-7 鉄筋加工図・材料表

表一12 桁高制限の設計例

支 間 (L) (m)	車道 +歩道 (W) (m)	車 道 (W') (m)	主桁本数 (N) (本)	主ケーブル 本数 (NPC) (本)	上フラン ジ幅 (B) (cm)	桁 高 (H)	
						累積設計 (cm)	回 帰 式 (cm)
22.0	12.50	8.50	8	7	135	99	95.5
24.0	9.50	7.50	6	8	140	109	108.3
26.0	9.50	5.50	6	8	140	121	119.2
28.0	9.50	7.50	6	9	140	131	132.4
30.0	8.50	8.50	6	9	130	141	140.3
32.0	10.50	6.50	7	10	145	144	149.2
34.0	13.50	7.50	8	10	145	171	172.7
36.0	9.50	7.50	6	11	140	179	180.4
38.0	7.50	7.50	5	12	140	184	189.0
40.0	10.50	6.50	7	13	130	192	193.2

れらも変化させた場合は、回帰モデルがきわめて複雑となる。そこで主桁本数  $N$  を増して桁高を低減することとして、現行の自動設計プログラムのアウトプットを比較したものが表一12である。この場合、上フランジ幅  $B$  は 150 cm の制限をはずしてある程度自由に变化するように改良した。桁高を 5 cm ごとにまるめるとすれば、両者の差はほとんどなく、また桁高を制限しない場合との差は支間によって異なるが、10~20 cm 程度の制限は可能である。

(6) 図化システムのパターン化

本システムは先に記述したように、その第1目的は、類例の多い構造物の力学的設計業務の省力化を図ることであった。したがって、その利用の対象は計画または設計担当者つまり、土木専攻の技術者である。一般に土木設計の成果である図面によって物を建造する場合、われわれは図面の線の長さをスケールアップして利用することはなく、図面に記入してある数値をもとに物を造り、検査を行う。また、力学モデルによる厳密な理論解による自動設計でも、その設計計算と図化のための座標計算とは、後者が数倍のラン・タイムを要する。

そこで、簡略な設計計算式を中心とする本システムでは、その特長を生かすべく図化システムもパターン化を行い、座標計算は省略した。

4. あとがき

先に直接設計は熟練した設計者の判断の内容を詳細に分析することを内容としていると述べたが、本報文で紹介したのはその力学的な側面を重視した現状の設計データを統計処理した主要諸元算定式を中心とする設計法であり、したがって、直接設計システムのサブ・システムである。

ここでいう直接設計法とは、力学的安全性、耐久性、経済性、景観適合性、振動、騒音等の評価を含んだ計画条件と、構造物の建設地先の環境条件（地耐力、住居地域等々）とをパラメータとする回帰式によって設計諸元（桁高、主ケーブル数等）を直接算定できる設計法のことである。

ところで計画策定段階（それが道路計画のみに限ったとしても）では、従来の技術的可能性（Technical feasibility）や物理的存在性の確認にとどまらず、事業目的の面からも多種多様な検討や代替案の準備がなされるのが常態になりつつある。それらの代替案策定時に道路の一部である橋梁の設計が、現在のように膨大な設計計算を要するようでは正確な計算は行わないのが普通である。しかし、本設計法のように小型計算機で図化まで可能な簡略な設計システムの利用が可能になれば、道路計画の策定時に経済的な側面等から計画全体の成否を左右することの多い構造物の設計が、他の手段要素（例えば土工など）以上に簡単にそして明確に行なえるので便利であり、また計画全体の精度向上につながることも論を待たない。

他方、設計の面についても本設計法は、現在の力学的設計体系の成果をデータとするために、少なくとも現行の安全性の本質を失っていないので、そのまま実施設計としての利用も可能である。また、桁高算定式等に見られるように回帰式は筆算でも可能なほど簡単なので、設計の初期値設定や設計結果の検証に使うて便利であることも明白である。

以上、ポストテンション方式によるPC単純T桁橋を例に回帰式による設計法について紹介してきたが、この種の設計法は1種類だけではさしたる有用性はないので、今後続けて他の構造物についても回帰式のみでも開発する所存である。

参 考 文 献

- 1) 永井, 岩松, 吉川, 五十嵐: 土木計画学シリーズII, 土木計画学の領域と構成, 第3章, 土木学会編, 1976.
- 2) 岩松幸雄: 設計あれこれ—現行設計法についての自省, 橋梁と基礎, Vol. 9, No. 7, 1975.
- 3) B.W. Bolch and C.J. Hung (中村慶一訳): 応用多変量解析, 森北出版, 1976.
- 4) 岩松幸雄: 設例による電子計算入門, 全日本技術協会, 1976.
- 5) 岩松, 工藤, 藤田: PCげたの施工実態調査とその解析, 土木研究所資料第1008号, 1975.

1976.12.13・受付

# 重要構造物にはマイテイ

日本は、現在コンクリートの高強度化で世界の最先端を行っています。すでに設計基準強度  $800\text{kg}/\text{cm}^2$  という超高強度マイテイコンクリートを用いたPCトラス鉄道橋が施工されているのです。

マイテイを添加するとどうして高強度コンクリートが作れるのでしょうか!?

1919年D・A・Abramsにより提唱された水セメント比説(アブラムの理論)を思い出して下さい。「清浄で強硬な骨材を用いる場合、そのコンクリートがプラスチックでワーカブルであるならば、コンクリートの強度はセメントペーストの水セメント比によって定まる」という理論です。つまり生コンクリートがプラスチックでワーカブルであるならば混練水が少なければ少ない程そのコンクリートの強度は高くなるという訳です。マイテイは、この50年も前の夢を今実現し世界の最先端をゆく超高強度コンクリートを作り上げたのです。山陽新幹線岩鼻PCトラス橋のコンクリートは水セメント比=23%、スランプ=12cmという理論水和水量近傍の高強度マイテイコンクリートです。

高強度コンクリート用減水剤

# マイテイ

説明書、技術資料をご請求ください。

花王石鹼株式会社 建設資材事業部

本社 東京都中央区日本橋茅場町1-1 ☎103 ☎東京(03)665-6322(代)

