

プレストレストコンクリートの 省エネルギー性について

宮 崎 義 成*

1. ま え が き

エネルギー危機が叫ばれ始めてすでに久しく、“省エネルギー”は今や世界的スローガンとなっているが、この間、我が国では果たしてどの程度の実効が現われているであろうか？ 産業部門を例にとってみると、幸か不幸かここ数年来の不況のため、減産によるエネルギー使用量に若干の減少があったとしても、これは“省エネルギー”とは申せない。省エネルギーは少なくとも在来の生産水準を低下することなく、エネルギーの効果的使用によって行われるべきものである。このためには、生産プロセスの改革あるいはエネルギー効率を向上せしめるための大規模の設備改良が必要となり、まことに言うは易く行うは難しというところであろう。

ところで、我々のたずさわる建設部門、特に構造物部門における省エネルギーはどのようにして達成されるかを考えてみよう。この部門においては、一般にばく大な材料が消費され、したがって使用エネルギーの大部分は材料に関するものであるから、省エネルギーは材料の選択にかかっている。すなわち鋼材のごときエネルギー多消費型材料をできるだけ少なく使用することであるといっても過言ではなからう。

建設材料の主流をなすものは、鋼とセメントコンクリートであって、これらはそれぞれ単独に、あるいは鉄筋コンクリートやプレストレストコンクリートのような混成材料として使用されている。近時プレストレストコンクリート技術の発達により、その利用範囲は鋼のそれと匹敵ないしはそれ以上に拡大されており、ほとんどの構造物はその使用目的に影響することなく、鋼あるいはプレストレストコンクリートのいずれかが自由に選択されるようになった。もちろん前記兩者の間では、耐久性、美観、建設費および保守費などにおいてそれぞれの優劣があるであろうが、国家および世界政策上の観点よりするならば、当然省エネルギー性を第一要素として両材料の選択が行われなければならないと考えられる。

構造物を鋼と、あるいはプレストレストコンクリートを使用して建設した場合、それぞれの消費エネルギーに

* 極東鋼弦コンクリート振興(株)

ついて、筆者が行った試算によると、プレストレストコンクリートの場合は鋼に比して40~60%となり、プレストレストコンクリートの省エネルギー性が極めて顕著であることが判明した。この点昭和52年6月セメント新聞紙上所見を公表したところ、その後、本記事に多くの関心と疑問を向けられましたので、本誌上をかりその論拠を明らかにする次第である。

2. 材料製造に要するエネルギー

各種材料の製造に必要なエネルギーを算出するために、便宜上各種エネルギーを石油換算量をもって表示することとし、下記のように仮定する。

(1) 熱 量

重油 1 l あたり発熱量は、9 070 kcal/l とする。

(2) 電 力

“電気事業審議会需給部会中間報告”(昭和49年8月22日)によると、昭和49年度の推定実績は、

火力発電量 2 724 × 10⁸ kWh

消費石油量 6 455 × 10⁷ l

よって、

電力エネルギーの石油換算原単位は、0.237 l/kWh

(3) 海上輸送による石油消費量

某船会社資料によると、鉱石輸送の場合で、

貨物船積載量 50 000 t

航行距離 360 mile/日

重油使用量 47 000 t/日

よって、石油比重を0.9とすると、鉱石1 t、航行距離1 000 mile あたり重油使用量は次のように算出される。

$$\begin{aligned} \text{重油使用量} &= \frac{47\,000}{0.36 \times 50\,000 \times 0.9} \\ &= 2.9 \text{ l/t/1 000 miles} \end{aligned}$$

(4) トラック輸送による石油消費量

10 t 車の場合、重油 1 l あたり平均走行距離を 4 km とすると、消費石油量は、

$$\frac{1}{4} = 0.025 \text{ l/t}\cdot\text{km}$$

2.1 鋼材の製造および輸送に要するエネルギー

(1) 形鋼、鉄筋等圧延鋼材

“鉄鋼協同研究会経済技術部編昭和50年度資料”によ

ると、一貫製鉄所における形鋼 1t あたり製造に要する熱量は次のとおりである。

$$\begin{aligned} \text{総熱量} & 5820000 \text{ kcal/t} \\ \text{石油換算} & \frac{5820000}{9070} = 642 \text{ l/t} \end{aligned}$$

(内訳：石炭 33.5%，コークス 33.5%，電力 12.4%，重油 11.8%，その他 7.3%)

原材料の海上輸送に要するエネルギー

資源エネルギー庁“総合エネルギー統計”によると、
製鉄用輸入石炭使用量(昭和49年度) 60042000t
粗鋼生産量(昭和49年度) 110000000t

よって粗鋼 1t あたり輸入石炭は 0.55t
また粗鋼 1t あたり製造に要する鉄鉱石は 1.6t } 計 2.15t

海上輸送距離を往復で 8000 哩と仮定すると、原材料の海上輸送に要するエネルギーは 2. (3) により、粗鋼 1t あたりで、

$$2.97 \times 2.15 \times 8 = 49.8 \approx 50 \text{ l/t}$$

となる。

次に圧延鋼材は製鉄所より、問屋とか、加工工場あるいは直接現場に輸送されるが輸送距離を平均片道 200km としトラックによるものとすれば、これに要するエネルギーは 2. (4) により、

$$0.025 \text{ l} \times 400 = 10 \text{ l/t}$$

表-1 コンクリート材料に要するエネルギー

種 別	数 量	エネルギー原単位	
		電 力 (kWh)	石油換算 (l)
セメント	クリンカー製造	1t	102
	粉 砕	1t	31.4
	セメント運搬	100km×t	5
	計		138.4
骨 材	採 石	1t	1.9
	破 砕	1t	3.1
	運 搬	200km×t	5.0
	計		6.2

ただし、1kWh=石油 0.237l 運搬 1km あたり石油 0.025l

表-2 コンクリート製造に要するエネルギー

種 別	原単位石油 (l)	$\sigma_{28}=450 \text{ kg/cm}^2$		$\sigma_{28}=400 \text{ kg/cm}^2$		$\sigma_{28}=350 \text{ kg/cm}^2$		$\sigma_{28}=300 \text{ kg/cm}^2$		$\sigma_{28}=240 \text{ kg/cm}^2$	
		数 量	石 油	数 量	石 油	数 量	石 油	数 量	石 油	数 量	石 油
セメント	0.1384	400 kg/m ³	55.3	350	48.4	330	45.6	320	44.2	290	40.0
骨 材	0.0062	1900 kg/m ³	11.8	1920	11.9	1890	12.3	1900	11.8	1940	12.0
ミキシング	0.2	1 m ³	0.2	1 m ³	0.2	1 m ³	0.2	1 m ³	0.2	1 m ³	0.2
計			67.3		60.5		58.1		56.2		52.2

ただし、セメント、骨材の原単位は l/kg、ミキシング原単位は l/m³、セメント、骨材の数量単位は kg/m³

圧延鋼材が原料輸送からはじまり、組立て工場まで運搬されるまでの所要総エネルギーは次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \text{原材料輸送} & 50 \text{ l/t} \\ \text{製 鋼} & 642 \text{ l/t} \\ \text{陸上輸送} & 10 \text{ l/t} \end{aligned} \right\} \dots 702 \text{ l/t}$$

(2) PC 鋼材

圧延線材より PC 鋼材に加工するに要するエネルギーは某 PC 鋼材専門メーカーの資料によると、

$$1000000 \text{ kcal/t} = \frac{1000000}{9070} \approx 110 \text{ l/t}$$

よって、PC 鋼材 1t あたり総エネルギーは、
702+110=812 l/t

となる。

2.2 コンクリート

コンクリートの材料であるセメントと骨材の製造とプラントまでの運搬に要するエネルギーを“セメント年鑑 第 28 巻 昭和 50 年度統計資料”その他に基づいて算出すると表-1 のとおりとなる。ただしコンクリートプラントまでの材料運搬距離を片道 100km と仮定した。また骨材として碎石、川砂利、砂が使用されるが使用エネルギーとして少量であるので、碎石のみについて計算を行った。

コンクリートミキシングに要するエネルギーは、練り上り 30m³/h のとき所要電力を 24kWh とすると、コンクリート 1m³ あたり所要エネルギーは

$$\frac{24}{30} = 0.8 \text{ kWh/m}^3 = 0.8 \times 0.237 \text{ l} = 0.2 \text{ l/m}^3$$

表-1 とこの値を用いて各種強度のコンクリート製造に要するエネルギーを算出すると表-2 を得る。

3. 鋼とプレストレストコンクリート部材とのエネルギー比較

部材単体としてのエネルギー比較をするために、プレテンション JIS 桁と、JIS G 3192 による H 形鋼の中より桁として使用したとき活荷重に対する抵抗モーメントがほぼ等しくなるもの三例を選んだ。

プレテンション桁の寸法および断面諸性質はそれぞれ図-1 および表-3 に示されている。また H 形鋼の断面

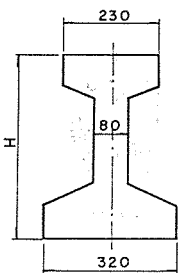


図-1 プレテンション桁の断面寸法

表-3 プレテンション桁の断面諸性質

	単位	S 108	S 110	S 113
スパン	m	8	10	13
桁長	m	8.4	10.4	13.5
桁高 H	mm	375	450	600
体積	m ³	0.55	0.78	1.39
重量	kg/m	163	188	257
抵抗モーメント	t·m	7.9	11.9	21.2
自重モーメント	t·m	1.3	2.4	5.2
活荷重抵抗モーメント	t·m	6.5	9.5	16.0

ただし抵抗モーメントはプレストレスに対してのみ計算した。

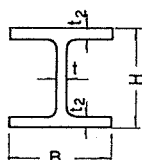


図-2 H形鋼断面

表-4 H形鋼の断面性質

	単位	300×150	350×175	400×200
H×B	mm	298×149	346×174	396×199
t ₁	mm	5.0	6.0	7.0
t ₂	mm	8.0	9.0	11.0
重量	kg/m	32.0	41.4	56.6
断面係数	cm ³	424	64.1	1010
抵抗モーメント	t·m	6.78	10.23	16.16
自重モーメント	t·m	0.26	0.52	1.20
活荷重抵抗モーメント	t·m	6.52	9.71	15.96

ただし抵抗モーメントの計算には許容引張応力度 $\sigma_{sa}=1600 \text{ kg/cm}^2$ とした。

表-5 PC 桁と H 形鋼桁のエネルギー

	材 料	エネルギー 原単位石油 (<i>l</i>)	S 108 $M_{RL}=6.5 \text{ t}\cdot\text{m}$		S 110 $M_{RL}=9.5 \text{ t}\cdot\text{m}$		S 113 $M_{RL}=16.0 \text{ t}\cdot\text{m}$	
			数 量	石 油	数 量	石 油	数 量	石 油
P C 桁	コンクリート $\sigma_{sa}=450 \text{ kg/cm}^2$	67.3 m ³	0.55 m ³	37.0	0.78 m ³	52.5	1.39 m ³	93.5
	PC 鋼 線	812 t	314 kg	25.5	53.4 kg	43.3	84.2 kg	68.4
	鉄 筋	702 t	12.3 kg	8.6	15.9 kg	11.6	19.4 kg	13.6
	計			71.1		107.0		175.5
H 形 鋼			300×150 $M_{RL}=6.5 \text{ t}\cdot\text{m}$		350×175 $M_{RL}=9.7 \text{ t}\cdot\text{m}$		400×200 $M_{RL}=16.0 \text{ t}\cdot\text{m}$	
	形 鋼	702 t	0.269 t	189	0.431 t	302	0.764 t	536
比 率	PC/H 形鋼 (%)		37.6		35.4		32.7	

ただし、 M_{RL} =活荷重抵抗モーメント、H形鋼の部材長は対応する PC 桁の長さと同しくした。

寸法および諸性質はそれぞれ 図-2 および 表-4 に示される。

プレテンション桁およびH形鋼の使用エネルギーはそれぞれ 表-5 に表わす。これにより、プレテンション桁の使用エネルギーはH形鋼の場合の大略 3 分の 1 程度となることがわかる。

4. 鋼橋および PC 橋における使用エネルギー

現場で構造物を構築する場合は、単に部材製造の場合と異なり、さらに部材の組立て、運搬、および架設などにエネルギーを消費するので、これらエネルギーをあらかじめ想定しておかなければならない。

(1) 鋼構造の場合

製作に要するエネルギー (某橋梁会社資料による)

$$120 \sim 170 \text{ kWh/t, 平均 } 145 \text{ kWh/t}$$

$$\text{石油換算 } 145 \times 0.237 \text{ l} = 34.4 \text{ l/t}$$

運搬 (工場→現場 100 km)

$$0.025 \text{ l} \times 200 = 5.0 \text{ l/t}$$

架設

$$3.4 \text{ kWh/t} \times 0.237 = 0.8 \text{ l/t}$$

合計 40.2 l/t

よって構造物を現場で構築する場合の総エネルギーは、

$$720 + 40.2 = 760.2 \text{ l/t}$$

(2) コンクリート構造物の場合

生コンの現場までの輸送 (片道 30 km とする)

$$0.025 \text{ l} \times 2.2 \times 60 = 3.0 \text{ l/m}^3$$

架設に要するエネルギー (プレレストレストコンクリート建設業協会資料)

$$3.4 \text{ kWh/t}$$

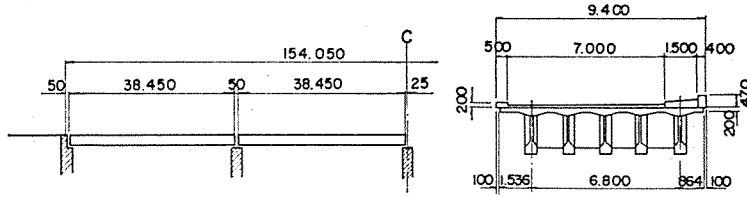
$$\text{石油換算 } 3.4 \times 0.237 \times 2.2 = 1.8 \text{ l/m}^3$$

合計 4.8 l/m³ が 表-2 の値に加算される。すなわち、

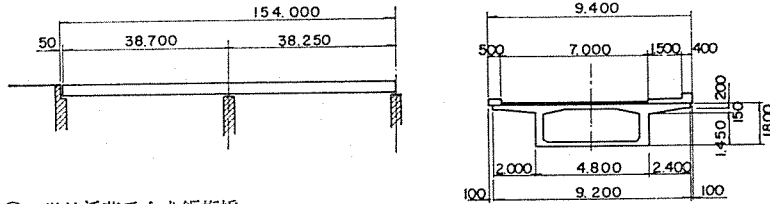
$$\sigma_{sa} = 450 \text{ kg/cm}^2$$

$$72.1 \text{ l/m}^3$$

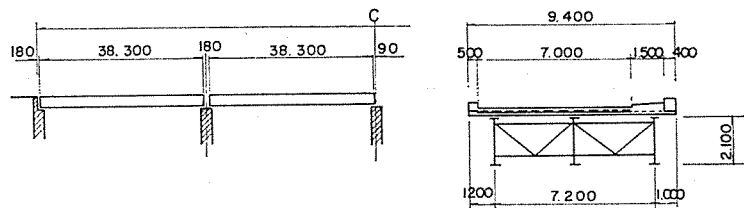
① ポストテンションPC単純T桁橋



② ポストテンションPC4径間連続両桁橋



③ 単純活荷重合成鉄桁橋



④ 4径間連続非合成鉄桁橋

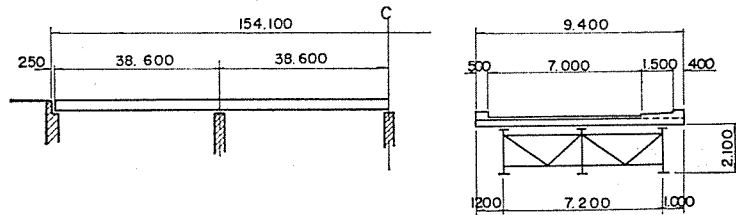


図-3

表-6 建設省標準設計一等道路橋

	材 料	石油換算 エネルギー 原単位	支間 30m		支間 35m		支間 40m	
			数 量	石油 (L)	数 量	石油 (L)	数 量	石油 (L)
P C	コンクリート $\sigma_{28}=450 \text{ kg/cm}^2$	72.1 l/m ³	128 m ³	9 101	161 m ³	11 608	205 m ³	14 781
	$\sigma_{28}=300 \text{ kg/cm}^2$	61 l/m ³	24 m ³	1 464	30 m ³	1 830	35 m ³	2 135
	鉄 筋	702 l/t	13 t	9 125	15.6 t	10 951	18.2 t	12 776
	PC 鋼 材	812 l/t	7.1 t	5 765	9.0 t	7 308	11.8 t	9 582
	計			25 455		31 697		39 274
鋼	コンクリート $\sigma_{28}=300 \text{ kg/cm}^2$	61 l/t	58 m ³	5 185	98 m ³	5 978	116 m ³	7 076
	鉄 筋	702 l/t	16.4 t	11 512	18.8 t	13 198	22.6 t	15 865
	形 鋼	742.2 l/t	44.1 t	32 731	60.5 t	44 903	81.4 t	60 415
	計			49 428		64 079		83 356
比 率	PC/鋼 (%)		51.5		49.5		47.1	

$\sigma_{28}=400$ // 65.3 //
 $\sigma_{28}=350$ // 62.9 //
 $\sigma_{28}=300$ // 61.0 //
 $\sigma_{28}=240$ // 57.0 //

(例 1) 建設省標準設計による一等道路橋
 車道幅 7.5m, 歩道 2×1.5m, 支間 30m, 35m, 40m
 比較設計 PC 単純T桁橋
 活荷重合成単純プレートガーダー橋
 エネルギー計算結果は 表-6 に示される。
 (例 2) 4径間一等道路橋 橋長 154m

上記のエネルギー原単位を使用して以下数種の橋梁について、PC と鋼とのエネルギー使用量を試算する。

表-7 4 径間一等道路橋

	材 料	石油換算 エネルギー 原単位	単 純 桁		連 続 桁	
			数 量	石油 (L)	数 量	石油 (L)
P C	コンクリート $\sigma_{28}=450 \text{ kg/cm}^2$	72.1 l/m ³	622.5 m ³	44 882	693.9 m ³	50 030
	鉄 筋	702 l/t	69.1 t	48 508	62.4 t	44 505
	PC 鋼 材	812 l/t	40.5 t	32 886	34.1 t	27 689
	計			126 276		122 224
鋼	形 鋼	742.2 l/t	195.5 t	145 100	185.3 t	127 530
	鉄 筋	702 l/t	77.9 t	54 686	79.9 t	56 090
	コンクリート $\sigma_{28}=360 \text{ kg/cm}^2$	61.0 l/m ³	354.2 m ³	21 606	363.1 m ³	22 149
	計			221 392		215 769
比 率	PC/鋼 (%)		57.0		56.6	

表-8 4 径間連続一等道路橋

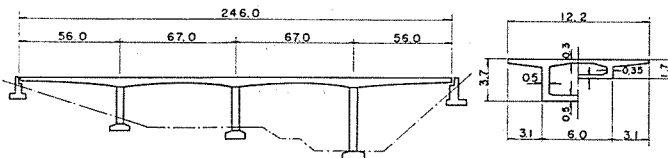
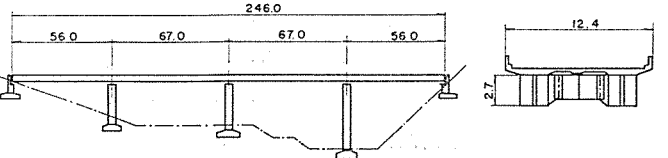
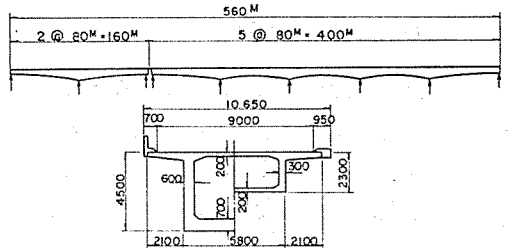
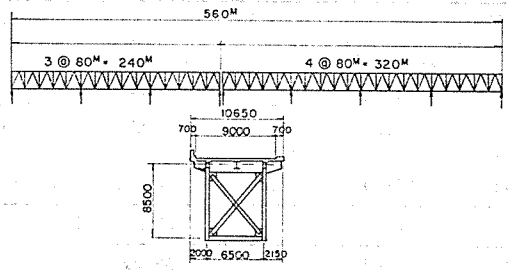
	材 料	エネルギー 原単位	数 量	石油 L
PC 連続ラーメン橋 	コンクリート $\sigma_{28}=400 \text{ kg/cm}^2$	65.3 l/m ³	2 121 m ³	138 501
	鉄 筋	702 l/t	258 t	181 116
	PC 鋼 材	812 l/t	114.7 t	94 136
	計			412 753
鋼連続鈹桁橋 	コンクリート $\sigma_{28}=240 \text{ kg/cm}^2$	57 l/m ³	895 m ³	51 015
	鉄 筋	702 l/t	220 t	154 440
	形 鋼	742.2 l/t	867 t	643 487
	計			849 842
	PC/鋼 (%)			48.6

表-9 7 径間一等道路橋

	材 料	エネルギー 原単位石油 L	数 量	石油 L
PC 連続桁橋 	コンクリート $\sigma_{28}=400 \text{ kg/cm}^2$	65.3 l/m ³	8 683 m ³	567 000
	鉄 筋	702 l/t	818 t	574 236
	PC 鋼 材	812 l/t	681 t	552 972
	計			1 694 208
鋼連続トラス 	コンクリート $\sigma_{28}=240 \text{ kg/cm}^2$	57 l/m ³	3 606 m ³	205 542
	形 鋼	742.2 l/t	3 759 t	2 789 930
	鉄 筋	702 l/t	902 t	633 204
	計			3 628 675
	PC/鋼 (%)			46.7

報 告

車道 7.00 m, 歩道 2×1.5 m, 径間約 38 m

比較設計 (図-3)

- ① PC 単純 T 桁
- ② PC 4 径間連続函桁
- ③ 単純活荷重合成鉄桁
- ④ 4 径間連続非合成鉄桁

エネルギー計算結果は 表-7 に示される。

(例 3) 4 径間一等道路橋 橋長 246 m

橋 長 56+67+67+56=246 m

比較設計 PC 函桁連続ラーメン橋

活荷重合成鉄桁橋

表-8 に示される。

(例 4) 7 径間一等道路橋

橋 長 7@80 m=560 m

比較設計 PC (2+5) 径間連続函形桁橋

鋼 (4+3) " トラス橋

表-9 に計算結果を示す。

5. 円形構造物

円形構造物も PC が最も有利に応用される分野である

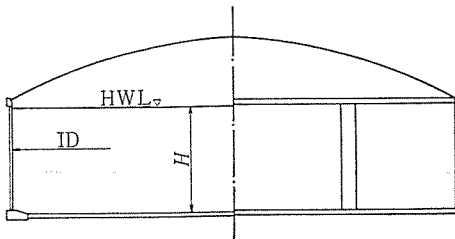


図-4 タ ン ク

表-10 貯水槽寸法

容 量 (m³)	PC タンク		鋼製タンク	
	ID (m)	H (m)	ID (m)	H (m)
10 000	38.0	9.1	35.7	10.0
15 000	43.0	10.6	43.7	10.0
20 000	46.0	12.3	48.2	11.0

表-11 鋼製および PC タンクの使用エネルギー

種 別	材 料	石油換算 エネルギー 原 単 位	V=10 000 m³		V=15 000 m³		V=20 000 m³	
			数 量	石 油 (l)	数 量	石 油 (l)	数 量	石 油 (l)
PC	コンクリート $\sigma_{28}=400 \text{ kg/cm}^2$	65.3 l/m³	437 m³	28 340	713 m³	46 559	967 m³	63 145
	$\sigma_{28}=240 \text{ kg/cm}^2$	57.0 l/m³	215 m³	12 255	314 m³	17 898	368 m³	20 976
	PC 鋼 材	812 l/t	25.35 t	20 592	39.5 t	32 074	65.23 t	52 968
	鉄 筋	702 l/t	52.25 t	36 680	66.5 t	46 683	77.01 t	54 061
	計			97 867		143 214		191 150
鋼	鋼 材	742 l/t	323 t	239 666	465 t	345 030	590 t	437 730
	PC/鋼 (%)			40.8		41.5		43.7

から、我が国で最も実績の多い円形貯水槽について、PC の場合と、鋼の場合とについてエネルギー比較を行って みた。比較上用いた貯水槽はいずれもドーム付きで、寸 法は 表-10 のとおりである。

比較結果は 表-11 に示すとおりである。

6. 鉄筋コンクリートと PC との比較

本項目については、本論の主目的とするところではな いが、一応 RC と PC 構造について、普遍的に使用さ れているコンクリート 1 m³ あたりに使用されている材 料比率を用いて比較する。

鉄筋コンクリート 1 m³ あたりの材料を次のとおり仮 定する。

コンクリート	$\sigma_{28}=240 \text{ kg/cm}^2$	1.0 m³	
鉄 筋		150 kg	
石 油	$57 \text{ l} \times 1.0 = 57 \text{ l}$		} 162 l
"	$702 \text{ l} \times 0.15 = 105 \text{ l}$		

PC 1 m³ あたりの材料を次のとおり仮定する。

コンクリート	$\sigma_{28}=400 \text{ kg/cm}^2$	1.0 m³	
鉄 筋		80 kg	
P C 鋼 材		47 kg	
石 油	$65.3 \text{ l} \times 1.0 = 65.3 \text{ l}$		} 159.7 l
"	$702 \text{ l} \times 0.08 = 56.2 \text{ l}$		
"	$812 \text{ l} \times 0.047 = 38.2 \text{ l}$		

よって、両者ともコンクリート 1 m³ あたりのエネル ギーは、ほぼ同一である。しかしながら、一般に PC 構 造物では PC に比して、全コンクリート容積はその 60 ~70% になることが常識となっているから、PC の場合 はその容積比だけ、すなわち 60~70% のエネルギー使 用量となる。

7. あとがき

上述の計算に用いたエネルギー原単位の算定に利用し た資料の多くは昭和 49 年度のもので、いささか古いと いうらみもあるが、生産におけるエネルギー効率の改 善速度から見て大差はないものと考えられるし、こと

に、鋼と PC との使用エネルギー比率の点より見るならば、計算誤差はなおさら少ないものであろう。使用エネルギー比較に用いた設計は、建設省標準設計のほかに、日本構造橋梁(株)、そのほかコンサルタンツ会社より提供をうけた資料のうち、ごく一般的なものを取り上げて比較した。特殊な設計で、桁高に制限をうける場合とか、ことに鉄筋を多量に使用する必要がある場合とかでは、PC の場合の使用エネルギーが増加することはもちろんである。しかしながら従来行われている普通的设计理念に基づき設計が行われる場合については、PC 構造は鋼構造に比して、エネルギー使用量は約半分になるといえる。

一方プレテンション桁はH形鋼に比して使用エネルギーは約3分の1程度になることを実証したが、一般に

桁、矢板、床版等 PC 部材の場合は、構造物の場合と異なり、一般に鉄筋の使用量が少ないので、省エネルギー効果は構造物の場合よりさらに大きい。以上を要約すると、構造物分野にあつては、鋼にかえて PC を使用することにより、きわめて効果的に省エネルギー成果をあげることができる。

終りに本編では単に橋梁、小型タンクおよび小部材についてのみ試算を行ったものであるが、原子力発電用 PCCV、海洋石油タンク、さらに進んで LNG 用バージポンツーン、タンカー等大型構造物の設計にあたっては使用材料もばく大な量となるので、その設計にあたっては、ぜひとも“省エネルギー”の観点より検討を加えることが必要であると考えられる。

会員増加についてお願い

会員の数はその協会活動に反映するもので、増加すればそれだけ多くの便益が保証されています。現在の会員数は 2400 余名ですが、まだまだ開拓すべき分野が残されており、お知合いの方を一人でも多くご紹介下さい。事務局へお申し出下されば入会申込書をすぐお送りいたします。

freyssinet

METHODS

■ 営業種目 ■

- ★フレシネー工法の調査・設計・技術指導
- ★シングルストランド工法の調査・設計・技術指導
- ★フロンテジャッキング工法の調査・設計・技術指導
- ★プレストレストコンクリート用機器・材料の製造販売・機器賃貸
- ★ゴム支承・伸縮継手・フラットジャッキ等関連機器の製造販売

F.K.K. 極東鋼弦コンクリート振興株式会社

取締役社長・工学博士 藤田 亀太郎

本社 〒104 東京都中央区銀座 6 丁目 2 番 10 号 電話：東京 03(571)8651(代)
 機材センター 〒254 神奈川県平塚市代官町 37 番 31 号 電話：平塚 0463(21)4756(代)