

PC用コンクリートについて

横 道 英 雄

1. PC用コンクリートの問題点

現在わが国のポストテンションング PC 桁の設計強度は $\sigma_{28}=300, 400, 500 \text{ kg/cm}^2$ としており、そのうち 400 kg/cm^2 のものが最も多い。これを戦前の RC 桁用コンクリートにくらべると非常な進歩である。例えば著者が担当した、わが国最長スパン 41 m 9 連を有する鉄筋コンクリート・ゲルバー十勝大橋(旧名河西橋)は昭和 9 年頃の設計であったから、当時の標準示方書による許容応力度の最大値 65 kg/cm^2 を採用し、設計強度を $\sigma_{28}=195 \text{ kg/cm}^2$ としたのであるが、これを見ても今昔の感にたえないものがある。このように橋に用いるコンクリートの強度は戦後急に高いものとなったのであるが、こ

のことはひとり日本だけでなく、欧米においてもほぼ同様なことがいえるのである。ただわが国では、戦前の設計に示方書の許容応力度の最大値を用いることが非常に少なく、大ていは $45\sim 50 \text{ kg/cm}^2$ 以下であったと見られるから、戦後において急に PC 用高強度コンクリートを施工することとなった時には大きな努力が払われた。と同時に、用心しすぎるほどの慎重さが要求されたのである。このことはコンクリート現場施工に対する信頼性を高めるのに、大いに役立ったのであるが、その反面には、高強度をうるためウォーカーピッチをぎせいにしてスランブは 0 に近い極硬練りコンクリートを用い、 σ_{28} の実績値の 1.0 kg/cm^2 あたり単位セメント量は 1.0 kg/m^3 以上となるというのが、PC 普及の初期時代にお

表-1 最近の PC 橋のコンクリート実績

No.	橋 名	単位セメント量 C kg/m ³	水セメント比 w/c	ポゾリス の 種 類	骨 材		スランブ cm	設計強度 σ_{28}^* kg/cm ²	実 績 σ_{28} kg/cm ²	摘 要
					最大寸法 mm	G/S又は 細骨材率				
1	嵐 山 橋	349	42.7	No. 8	25	1.9	3-5	300	426	本誌 Vol. 1/2 1959.4
2	大阪環状線八雲町 第2高架	460	36	No. 10	"	0.31	2-3	450	580	" Vol. 2/1 1960.2
3	" "	420	39	"	"	0.33	"	400	556	"
4	" 第1高架	420	39	"	"	0.33	3-4	"	603	"
5	" 第7高架	420	40	"	"	0.33	"	"	509	"
6	" 第6高架	460	37	"	"	0.31	"	"	499	"
7	" 第1南高架	420	39	"	"	0.33	"	"	576	"
8	" 弁天町 第8高架	380	41	No. 5	"	0.35	"	"	529	"
9	大 川 橋	470	39	—	"	2.0	3-5	450	546	" Vol.2/5 1960.10
10	上 糠 川 橋	440	37	—	"	2.0	"	400	—	"
11	吉 井 川 橋	380	36	No. 5 No. 8	40	0.30	5±1	"	444	" Vol.2/6 1960.12
12	猿 留 橋	380	36	No. 5	25	1.7	3-5	"	494	北海道開発局調査1960
13	盤 ノ 沢 橋	375	36.8	No. 5	"	1.94	3-5	350	—	"
設計強度 $\sigma_{28}^*=450$ のもの 2 橋		最大	460	36					546	$\alpha=1.25$ $\beta=1.03$ $\gamma=0.83$
		最小	470	39					580	
		平均	465					450	563	
同 $\sigma_{28}^*=400$ 9 橋		最大	380	36					444	$\alpha=1.32$ $\beta=1.04$ $\gamma=0.79$
		最小	460	41					603	
		平均	414					400	526	
同 $\sigma_{28}^*=350$ 1 橋			380	42.7					350	$\beta=1.08$
同 $\sigma_{28}^*=300$ 1 橋			349	36.8					300	$\alpha=1.42$ $\beta=1.16$ $\gamma=0.82$

ける状況であった。従って単位セメント量が 500 kg/m^3 をこえる例も多かったのである。その後、高強度コンクリート施工に関する経験の積み重ねと技術の発達およびセメントそのものの品質向上などにより、コンシステンシーも $2\sim 5 \text{ cm}$ 程度の硬練りが用いられるようになり、単位セメント量も漸次減少するようになった。しかし一般的に言えば、欧州に比較すると、まだまだ大きな値といわざるを得ない。

いま最近の事情を知るため、例を本誌に発表されたポストテンション PC 橋について調べて見ると表 1 の No.1~11 のごとくである。これに昨年北海道で施工されたもののうちで代表的な 2 橋を追加したのが No.12 および 13 である。わが国で毎年施工される PC 橋はおびただしい数にのぼると見られるから、わずか 13 橋では資料としては不足であるかも知れない。しかし、この表にあげた例は、いずれもそのコンクリートの配合決定施工管理に関しては優秀であって、わが国における代表的なものといつてよいのである。ゆえに、これによって最近におけるわが国の上級の状況を判断しても大きなあやまりはなく、一般はこれよりやや下まわるものと考えられる。この表には、各設計強度別に集計して、その最大および最小値、平均値などを示してあり、さらに参考として

$$\alpha = \frac{\text{実績圧縮強度}}{\text{設計圧縮強度}} = \frac{\sigma_{28}}{\sigma_{28}^*}$$

$$\beta = \frac{\text{単位セメント量}}{\text{設計圧縮強度}} = \frac{c}{\sigma_{28}^*}$$

$$\gamma = \frac{\text{単位セメント量}}{\text{実績圧縮強度}} = \frac{c}{\sigma_{28}}$$

の値を示した。

表 1 によると、最も多い設計強度 $\sigma_{28}^*=400$ のものについていえば、単位セメント量は $C=380\sim 461 \text{ kg/m}^3$ 平均 414、水セメント比 $36\sim 41\%$ 、圧縮強度の実績値は $\sigma_{28}=444\sim 603$ 、平均 526 kg/cm^2 となっており、実績強度の単位当りのセメント使用量すなわち γ は 0.79 kg で、初期時代の 1.0 kg にくらべると相当減少していることがわかる。しかし欧州とくにドイツでは B 450 すなわち $\sigma_{28}^*=450 \text{ kg/cm}^2$ に対する単位セメント量は 350 kg が普通であり、従って $\beta=0.78$ であるから表 1 による $\beta=1.04$ に比していちじるしく小さく、前記の $\gamma=0.79$ とほぼ同じであることに注目しなければならない*。ドイツでは一般に PC 用コンクリートに用いるセメントは Z 325 である。一方最近の日本のセメントも、JIS 規格としては低い値を規定しているが、実績は決してドイツのセメントに劣らない圧縮強さを示しているのである

* ドイツ規格の B 450 がわが国の標準供試体による $\sigma_{28}=450$ に等しいことについては文末の文献 6) を参照せられたい。

から、その責任の大半はコンクリート技術者が負わなければならないと考える。

また PC 用コンクリートでは高強度が要求されるため、ややもするとウォーカービリチーをぎせいにした極硬練りの配合を採用する傾向があり、このことは PC 普及の初期時代においてとくにいちじるしかった。表 1 では、代表的な例であるだけに、この点については大いに改善されている。これは PC 工法が、プレキャストコンクリート材を運搬架設する工法だけでなく、連続桁やラーメンなど、場所打ちコンクリートのものも多く採用されるようになったことが、一原因であると考えられる。従って、今後は PC コンクリートも、従来のように極硬練りだけでなく、適当なコンシステンシーを有することが施工上要求されてくると思われる。もしスランプ 6 cm 内外のもので高強度のものが得られれば、施工が非常に楽になるに違いない。

以上のことから、PC 用コンクリートも結局は、なるべく少ない単位セメント量で、適当なウォーカービリチーを有し、かつ所要の強度が得られるような配合を必要とするという、鉄筋コンクリート材料としての本来の要求が満たされなければならないことになる。そしてこの問題こそは、コンクリートの専門家にとって最大の懸案事項であり、国の内外を問わず、その解決にたえざる努力を続けているものであって、幾多の未解決な問題を包含しているものである。

いまこのうち、骨材粒度に関する問題について考えて見よう。骨材全体の粒度組成は、いうまでもなく、最少の使用水量で、所要のコンシステンシーのコンクリートが得られることがまず要求される。一定のセメントに対しては、コンクリートの強度を最も強く支配するものは水セメント比であるから、セメントを節約するためにも同じことが要求されるのである。しかし一方では、使用水量の減少はコンシステンシーを悪くするものであるから、この相反関係をいかにして解決するかが問題となってくる。これはすでに周知のことである。

いま AE 剤もしくはセメント分散剤などを用いない場合に限って考えると、まだ凝結のはじまらないコンクリート中の水は、セメントおよび骨材の表面に水膜となって密着する表面水と、これらの粒子間にある自由水とからなっている。前者の表面水についていえば、表面張力などの影響によって粒径の大きいものほど水膜の厚さも大きいと考えられる。しかし粒径の大きいものはその比表面積が小さいから、表面水の量としては、比較的小さい粒径のものの比率が大きいことになる。この表面水すなわち、セメントおよび骨材の表面を被覆するに必要な水量を基準水量と呼ぶことにすれば、この基準水量と全

報 告

使用水量との比が、コンクリートのコンシステンシーに大きな影響を与え、その間には一定の関係があるものと考えられる。基準水量の計算方法については、スイスの Solvey¹⁾、ウイーンの Tillmann²⁾ および日本の右田³⁾ 諸氏の研究がある。とくに Tillmann および Solvey の研究は、コンシステンシーと基準水量との関係について興味ある理論を発表しており、その発展は大いに注目されるものである。

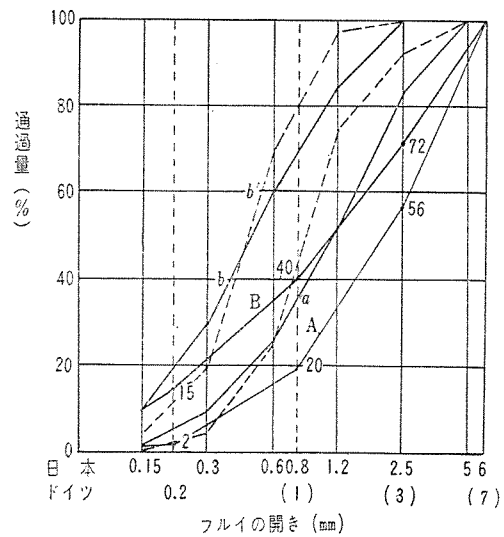
いずれにしても、骨材の程度は基準水量を最小ならしめるようなもの、すなわち表面積の合計を最小とすることが、使用水量の減少もしくはコンシステンシーの良好化をうることになるわけである。しかし、実際には、このように簡単なものではない。たとえば、骨材粒子の形状や表面の粗さ、セメントの化学成分や粒子組成など多くの因子による影響をうけるからである。またコンクリートの強度そのものも、水セメント比以外の多くの因子の影響を受けることも考えなければならない。しかし少なくとも、セメントおよび骨材の表面積についての考察が重要な要素となることには、変りはないものと考えられる。これはすでに Edward が Surface area theory (1918) として述べたことがあるものであって、その後あまり発展しなかったものであるが、新しい観点から再び注目されるようになってきたのである。しかし前述のように、まだ多くの未解決の事項があるので、なかなか容易なものではないといえる。従って、これらの理論的方法とは別に、骨材粒度に関する多くの実験が行われてきたのであるが、これについても各国によって、それぞれの異なった提案が行なわれている。

現在わが国の示方書に規定されている骨材粒度はアメリカの規定にならったものである。そして細骨材と粗骨材とに対してべつべつに示されているが、混合された全骨材に対しては規定されていない。通常は一種類の細骨材と一種類の粗骨材とを用い、粗細骨材比すなわち G/S によって全骨材の粒度を調整し、実験によってその適値を求めることが行なわれている。

いま粒度曲線を、フルイの孔径を2倍ごとに等間隔に横軸にとって画いて見ると、土木学会標準示方書による細骨材の限界粒度線は図-1の a, b のごとくになって、やや S 字形を呈している。わが国の天然産の砂の粒度は全国的調査の結果その限界線はほぼ破線 a', b' のごとくになって*、さらにいちじるしい S 字形をなしており、0.3~2.5 mm の範囲の傾斜が急となっている。しかるに欧州系とくにドイツ規格 DIN 1045 による粒度

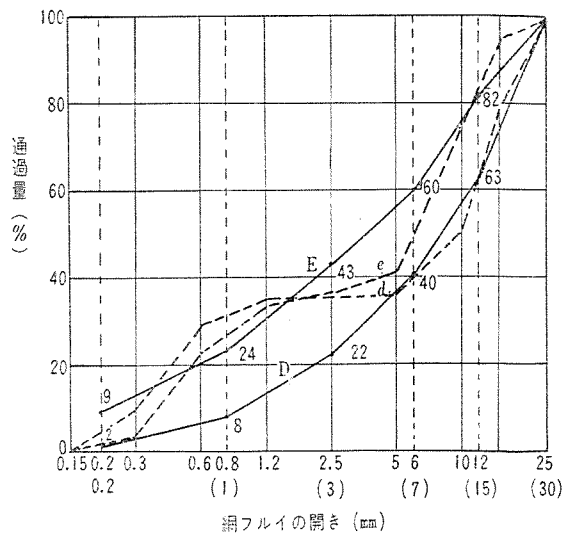
* ただし a, a' 線は 5 mm 通過を 100% となるように換算したものである。

図-1 細骨材の粒度曲線



() 内は板フルイの開き

図-2 全骨材の粒度曲線



() 内は板フルイの孔の径

規格のうち最良区域は図の A, B 線のごとくで大分異なっていることがわかる。ただしドイツ規格では 1 mm 以上は丸孔の板フルイを使用しているもので、これを角孔の網フルイに換算して記入した。この場合の換算方法は著者の実験値⁵⁾ によったものである。これによれば、土木学会の下限線とドイツ規格最良区域の上限線とは交差しており、一般に前者の範囲は後者の上方にそれる傾向を示している。

つぎに全骨材の粒度線については、土木学会の規定には示されておらないので、ドイツ規格の最良区域を示すと図-2の D, E 線のごとくになり、下方に弯曲した比較的一様な単一曲線の形を示している。これに対し、もしわが国の天然産の砂および砂利を G/S だけの調整によって全骨材をつくるものとするれば、砂および砂利の粒度線に存在する前述の S 字形の傾向は、そのまま持込ま

れることになるので図の d, e 線のごとく、二重のS字形を有する粒度線となり、ドイツ規格の範囲に入れることが困難となってくる。とくに 5 mm 以下の部分の形状が、いちじるしく異なったものとなっているのが目立つ。これは 1 種類の粒度の砂を使用したからであって、ドイツの規格でも、 σ_{28} が 300 kg/cm² 以上の高強度コンクリートの場合には 0/3 および 3/7 mm の 2 つの粒度に区分して使用することが規定されているのであって、これを網フルイ目に換算すると 0/2.5 および 2.5/6 mm となる。

アメリカ系およびドイツ系のうちいずれの骨材粒度線が適当であるかということは、両者いずれも、それぞれの実験研究の結果から得られたものであり、またおのおの環境条件による影響もあると考えられるから、一概にこれを決定することはできないと思われる。しかし前に述べたように表-1の結果からいって、従来の方法では、高強度コンクリートにおいて、これ以上の単位セメント量の節減あるいはウォーカビリチーの改善を期待するのは、なかなか容易でないと推定される。著者らは、昭和 32 年以來、砂および全骨材の粒度曲線がコンクリートのコンシステンシーと強度におよぼす影響について実験的研究を続けており、さきとその一部結果について発表した⁶⁾。この実験は連続粒度のもの 5 種類、2.5~5.0 mm の部分を除いた脱落粒度のもの 3 種類、合計 8 種類について行なったのであるが、このうち高強度コンクリートに相当と思われるものは連続粒度 3 種類および脱落粒度 2 種類であった。これに関しては現在なお実験を継続しているのであるが、ここに今までに得られた結果について述べ、参考に供したいと思う。

2. 骨材粒度に関する実験結果と高強度コンクリートの配合設計

図-3 は実験の結果、高強度コンクリートに適すると見られる砂の粒度曲線を示す。このうち粒度は 1, 2, 3 全骨材の連続粒度に用いるもので、粒度 2', 3' は脱落粒度用のものである。この粒度 2' および 3' はわが国の天然産砂が図-1 の a' および b' に示されるように 2.5 mm 以上の部分が一般に不足しているところから選んだものである。図-4 は全骨材に対するもので連続粒度は 1, 2, 3 の 3 種類、脱落粒度は 2', 3' の 2 種類である。

つぎに図-5 および図-6 はそれぞれ連続粒度および脱落粒度に対するスランプ、水セメント比、単位セメント量との関係を示す実験結果である*。これによれば、一般に粒度番号の若いものほどコンシステンシーはよくなり、同じ水セメント比に対し所要のスランプをう

* 実験の詳細については文献 6) を参照せられたい。

図-3 細骨材の粒度曲線

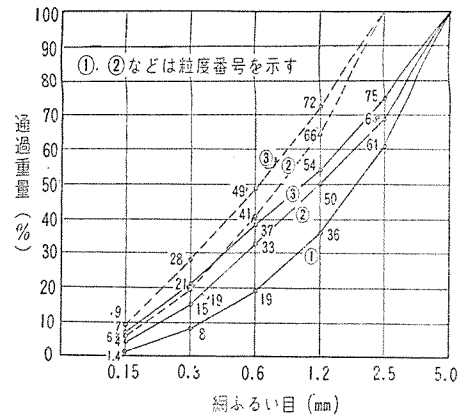


図-4 全骨材の粒度曲線

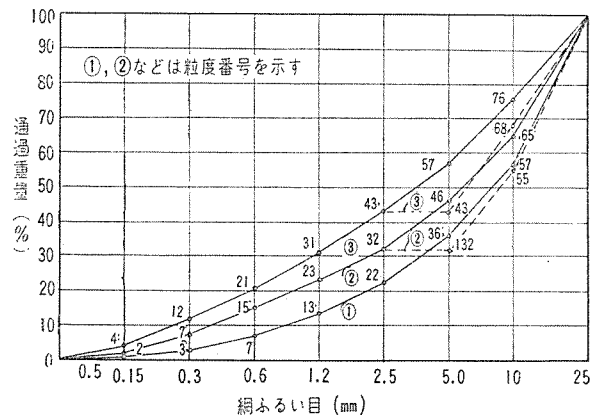


図-5 標準粒度(図-3,4)に対するスランプと水セメント比および単位セメント量との関係図

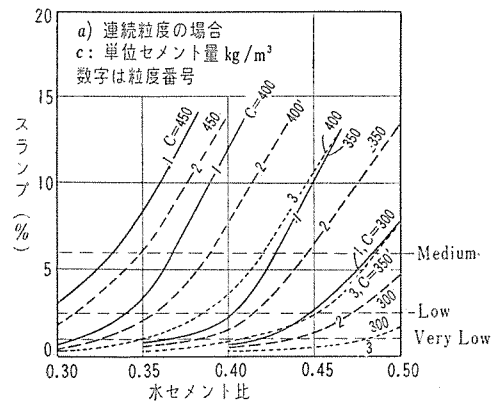


図-6 同 上

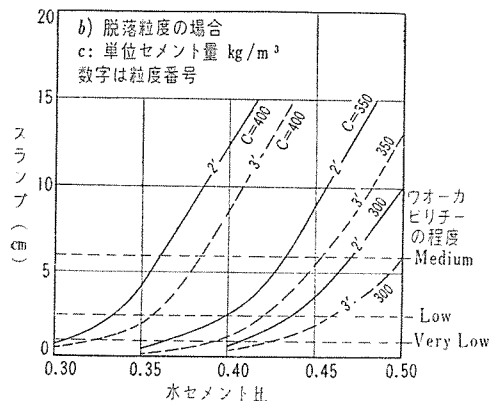


図-7

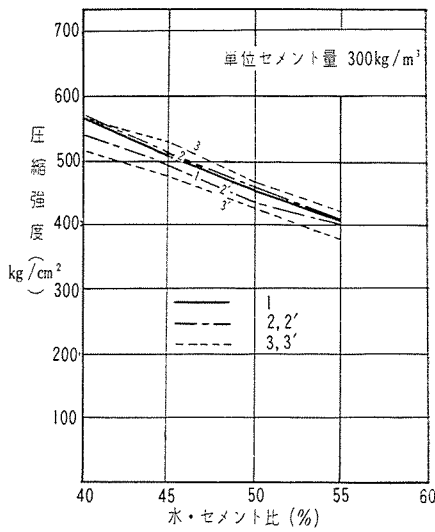


図-8

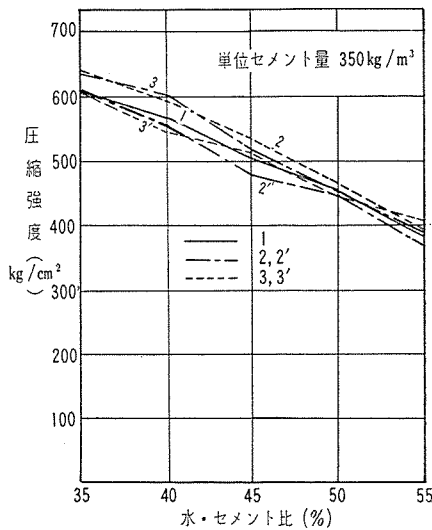
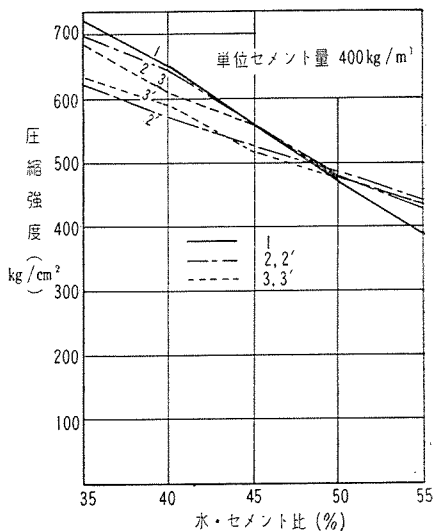


図-9



るための単位セメント量は減少する。いまウォーカーピリチーをスランプで表わすものとし、 1 ± 1 cm のものを極硬練り (Very Low), 2.5 ± 1.5 cm を単に硬練り (Low) 6 ± 3 cm を中庸 (Medium) と呼ぶものとするれば、その平均値は 図-5 および 図-6 に破線で示すごとくになる。この図により所要のウォーカーピリチーと水セメント比に対する単位セメント量を、おのおのの粒度について求めることができる。

つぎに 図-7, 8 および 9 はそれぞれ単位セメント量 $C=300, 350, 400$ kg/m³ に対する圧縮強度と水セメント比の関係を示すものである。これによれば、脱落粒度が連続粒度よりやや低い値となっており、とくに $C=400$ の場合に少しいぢるしくなっているが、一般にはその差は小さいものである。また各粒度別に見ると、圧縮強度と水セメント比はほぼ直線関係となっている。いまこの実験結果を、粒度種類および単位セメント量の区別にかかわらず、一緒にまとめると 図-10 のように平行な二直線 C, E の間にほぼ分布することがわかる。このように水セメント比 50% 以下の高強度コンクリートの圧縮強度が水セメント比と直線関係にあるということは、すでに著者らの実験結果によって知られていることである⁷⁾。図-10 の C, E 線およびその平均値を与える D 線は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \text{C線} \quad \sigma_{28} &= 930 - 1100 w/c \\ \text{D線} \quad \sigma_{28} &= 980 - 1100 w/c \\ \text{E線} \quad \sigma_{28} &= 1030 - 1100 w/c \end{aligned}$$

以上の結果を用いると高強度コンクリートの配合を設計することができる。

いま例として、比較のため表-1 の $\sigma_{28}^* = 400$ の場合の実績強度 $\sigma_{28} = 530$ kg/cm² について設計して見よう。D線を使用しうるとすると所要の水セメント比は

$$w/c = (980 - 530) / 1100 = 0.41$$

となる。この水セメント比に対し 図-5 および 図-6 を

図-10 提案された骨材粒度を用いた高強度コンクリートの圧縮強度と水セメント比との関係

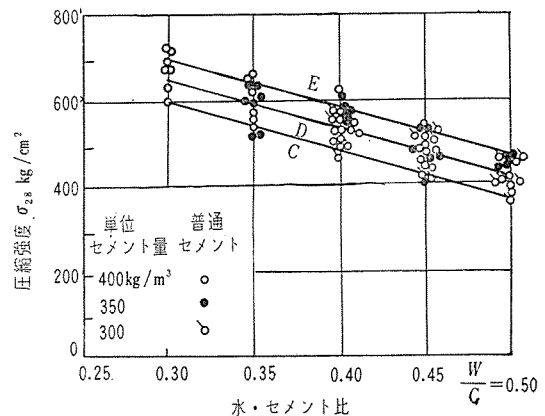


表-2 $\sigma_{28}=500 \text{ kg/cm}^2$ に対する所要単位セメント量
 $C(\text{kg/m}^3)$, カッコ内の数字は $r=C/\sigma_{28}$ の値を示す

ウォーカーピリチー	スランプ (cm)	連続 粒 度			脱 落 粒 度	
		1	2	3	2'	3'
VL	1±1	305(0.58)	313(0.59)	350(0.66)	300(0.57)	320(0.60)
L	2.5±1.5	335(0.63)	355(0.67)	370(0.70)	333(0.62)	358(0.68)
M	6±3	365(0.69)	380(0.72)	—	366(0.69)	382(0.72)

用いて、粒度の各種類およびウォーカーピリチーのおおのについて単位セメント量を求めれば表-2のごとくになる。

すなわち 図-4 の全骨材粒度線を用いれば、現在わが国で施工されているスランプ 1~4 cm に対し、 $C=333\sim370$, $r=C/\sigma_{28}=0.62\sim0.70$ となり、単位セメント量の減少を期待でき、さらにスランプ 6±3 cm の中庸練りに対しても $C=365\sim382$, $r=0.69\sim0.72$ となって表-1 の結果より有利となることが期待される。

参 考 文 献

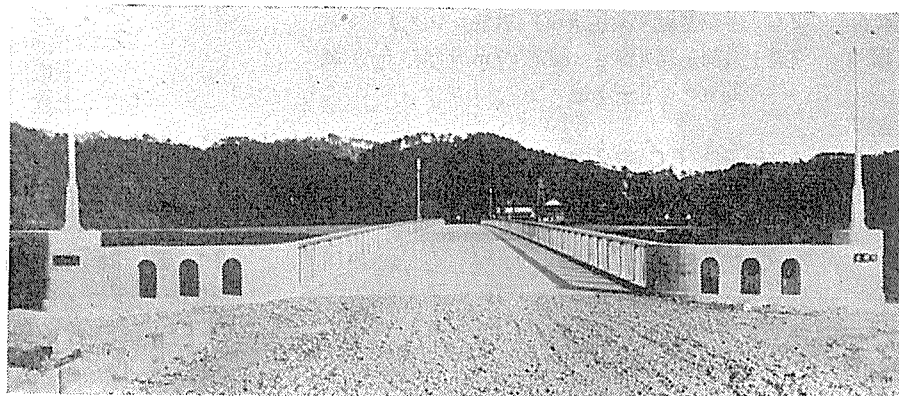
1) O.R. Solvey : Neue Rationelle Betonherzeugung, 1949

- 2) Rudolf Tillmann : Stand und Entwicklungsrichtung der Betontechnologie, Österreichische Bauzeitschrift, Heft 1/3 1948
- 3) 太田誠一郎 : 室蘭工大研報 1 卷 3 号 1952
- 4) コンクリート骨材特集号, セメントコンクリート No. 129 昭 32.10
- 5) 横道英雄 : コンクリートにおよぼす骨材性質の影響, 同上
- 6) 横道・藤田・松井 : 高強度コンクリートの配合設計について, セメント技術年報 XIII 1959
- 7) 横道・一木・林 : 高強度普通コンクリートの配合および圧縮ひずみ, セメントコンクリート No.105, 昭 30.11 (筆者 : 工博 北海道大学教授, 工学部)

1961.2.25・受付



清水山橋 (福井県)



竣工 : 34年10月 長さ 180 m 有効巾員 6 m 荷重 TL-14

ピーエスコンクリート設計施工並に製作

日本ピー・エス・コンクリート株式会社

顧問 加賀山之雄 顧問 稲浦鹿蔵 取締役社長 有馬義夫

本社 福井県敦賀市泉125号2番地 電話(敦賀)代表 1400番
 東京営業所 東京都千代田区大手町1丁目4番地 (大手町ビル3階327号室)
 大阪営業所 大阪府北区堂島上2丁目39番地 (毎日産業ビル3階)
 名古屋営業所 名古屋市中区南呉服町2丁目18番地 (呉服町ビル3階4号室)
 福岡営業所 福岡市上辻の堂町26番地 (ナショナルビル5階)
 電話 和田倉 (201) 4530番
 電話 大阪 (36) 7797番
 電話 名古屋 (24) 7516番
 電話 東◎代表 4134番