

◆ 報文 ◆

エアメータを利用したコンクリート単位水量迅速推定法

片平 博* 河野広隆**

1. はじめに

コンクリートの強度・耐久性は主にセメント水比によって決定される。このうち単位セメント量は生コンプレントの計量装置の精度が向上したことや、自動計量記録装置が普及したことでの比較的容易に確認できる。一方、単位水量は計量投入される水量に骨材の表面水を加えたものであるが、骨材の表面水量は変動しやすく、真の単位水量を精度良く推定するのは容易ではない。このため、単位水量を迅速かつ正確に求めるための試験法の確立が望まれている。

コンクリート研究室では、これまで提案された各試験方法¹⁾の中から、原理が比較的単純で誤差要因が少なく、現場への適応性が高いと考えられる方法について実験的検討を行ってきた²⁾。このうち、加熱乾燥法については Vol.41, No.12 で紹介した³⁾。

今回の報告では、加熱乾燥法よりも作業が単純で、現場の繁雑な品質管理への適応性が高いと考えられる方法として、エアメータを利用したフレッシュコンクリートの単位水量迅速推定法について検討した結果を述べる。

2. 実験方法

2.1 コンクリートの配合および材料物性

実験の目的は単位水量の変動を的確に推定できるかどうかを検討するものであり、コンクリートの配合の設定にあたっては、意識的に単位水量が適切でない配合を設定した。

最大粗骨材寸法を 20mm とし、単位水量 153 ~ 173kg/m³、セメント水比 1.5 ~ 4.0 の範囲で、まず基本となる 6 種類の配合を設定した。次にこの基本配合に対して、セメント水比が -0.125、-0.25、+0.125 だけ変化するように、水量だけを意識的に + α 、+2 α と添加、または - α と削減

した配合を設定した。この配合を 1m³ 当たりに換算した配合表を表-1 に示す。

またコンクリート材料の物性を表-2 に示す。この中で、セメントの密度については、JIS A 5201 に鉛油を使用した測定法が規定されているが、表-2 には鉛油の代わりに水を使用して測定した値を示している。これは実際の練り混ぜで水と混合されたときのセメントの比重は JIS A 5201 で得られる値とは若干異なるため、単位体積質量から単位水量を推定する場合の誤差要因となる。このため、実際の練り混ぜと同様に水と混合したときの比重を測定したものである。

2.2 エアメータによる単位水量推定法の原理

コンクリートの配合が変化すればその単位体積質量も変化する。この原理を利用して単位体積質量から単位水量を推定することができる。

表-1 のコンクリート配合の中で、単位水量が異なる配合同士(例えばケース I, II, IV の基本配合、またはそれぞれの配合に加水した + α 、+2 α の配合)を比較すると、単位水量が 10kg/m³ 変化するごとにコンクリートの単位体積質量は 13kg/m³ 程度変化している。これは水の密度が他の構成材料の密度より著しく小さいためであり、単位水量の変化はコンクリートの単位体積質量に反映される。

ただし、コンクリート使用材料の密度の有効桁は一般には 3 桁であるため、計算上求められるコンクリートの単位体積質量の有効数値の感度は 3kg/m³ と考えられる。

また、表-1 にはコンクリートの単位体積質量の値として、空気量を含む値と、空気量を除いた値の双方を示しているが、約 5% の空気量の有無でコンクリートの単位体積質量は約 120kg/m³ も変化し、空気量がコンクリートの単位体積質量に与える影響は非常に大きい。

このため、コンクリートの単位体積質量から単位水量を推定する場合には、コンクリート試料の容積、質量に加えて空気量を精度良く測定する必

表-1 コンクリートの配合

番号	記号 ($W - \frac{C}{W}$ ± 水量)	単位水量 W (kg/m ³)	骨材最大寸法 (mm)	セメント 水比 C/W (%)	細骨材率 s/a (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)			コンクリートの 単位体積質量	
							セメント	細骨材	粗骨材	含 Air (kg/m ³)	除 Air (kg/m ³)
I-1	173-2.0	174	20	2.000	44	5.5	347	760	993	2,275	2,407
I-2	173-2.0+ α	183	20	1.875	44	5.4	343	751	982	2,260	2,390
I-3	173-2.0+2 α	194	20	1.750	44	5.4	339	742	969	2,244	2,371
II-1	163-2.0	164	20	2.000	44	5.5	328	778	1,017	2,286	2,419
II-2	163-2.0+ α	173	20	1.875	44	5.4	324	770	1,006	2,273	2,403
II-3	163-2.0+2 α	183	20	1.750	44	5.4	320	761	993	2,257	2,385
II-4	163-2.0- α	156	20	2.125	44	5.6	331	786	1,026	2,299	2,434
III-1	153-1.5	154	20	1.500	48	4.5	231	912	1,015	2,312	2,421
III-2	153-1.5+ α	165	20	1.375	48	4.4	227	899	1,001	2,293	2,400
III-3	153-1.5+2 α	179	20	1.250	48	4.4	224	884	985	2,272	2,376
IV-1	153-2.0	154	20	2.000	44	5.5	307	797	1,043	2,301	2,434
IV-2	153-2.0+ α	162	20	1.875	44	5.4	304	789	1,032	2,287	2,419
IV-3	153-2.0+2 α	172	20	1.750	44	5.4	301	780	1,020	2,273	2,402
V-1	153-2.5	154	20	2.500	42	5.5	384	735	1,042	2,315	2,449
V-2	153-2.5+ α	160	20	2.375	42	5.5	381	729	1,034	2,304	2,437
V-3	153-2.5+2 α	168	20	2.250	42	5.4	378	722	1,025	2,292	2,423
VI	高強度	160	20	4.000	43	2.0	640*	693	946	2,440	2,489
II'-1	163-2.0	164	20	2.000	44	4.5	327	790	1,033	2,314	2,423
II'-2	163-2.0+ α	173	20	1.875	44	5.4	324	770	1,007	2,274	2,405
II'-3	163-2.0+2 α	183	20	1.750	44	5.4	320	761	995	2,258	2,386

*はハイフローセメント、他の配合は普通セメント

表-2 コンクリート材料の物性

セメント	普通ポルトランドセメント		密度: 3.22g/cm ³ 比表面積: 3,320cm ² /g
	ハイフローセメント		密度: 3.21g/cm ³ 比表面積: 4,070cm ² /g
水	水道水		密度: 1.00g/cm ³
細骨材	大井川産河床砂		密度: 2.61g/cm ³ 吸水率: 1.06%
粗骨材	笠間産硬質砂岩	粒径 5-13mm	密度: 2.67g/cm ³ 吸水率: 0.72%
		粒径 13-20mm	密度: 2.67g/cm ³ 吸水率: 0.48%

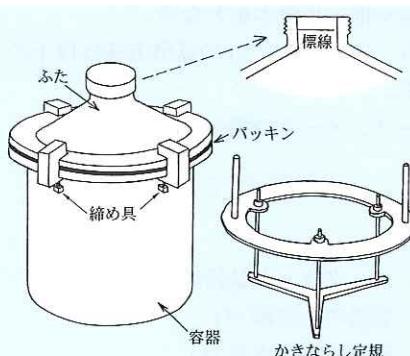


図-1 ローリンメータ

要がある。エアメータはこれら全ての測定に適した試験機器といえる。本来は空気量を測定するための装置であるが、容器の容積が既知であることから、これに加えて試料質量を測定するだけでコンクリートの単位体積質量を簡易に求めることが可能となる。

2.3 実験に使用したエアメータの種類と測定方法

空気量の測定法としては主に、①測定作業が大変なことから普及していないが、測定結果の信頼性が高い「容積による試験方法 (JIS A 1118)」と②作業性が良いことから広く普及している「圧力による試験方法 (JIS A 1128)」がある。

これらの測定に使用するエアメータが①ではローリンメータ(図-1)、②では圧力式エアメータ(図-2)である。これらを今回の実験に使用した。

単位水量を推定するための実験手順、すなわちコンクリート試料の容積、質量、空気量を求める手順を以下に述べる。

(1) ローリンメータによる測定方法

作業手順は、①容器に半ばまでコンクリート試料を詰め、表面をならし定規で平らに均す。②試料質量を測定する。③試料を乱さないように静かに標線まで水を投入し、投入水量の質量を測定す

る。④容器を激しく転がし、コンクリート中の空気を完全に追い出す。⑤再び標線まで水を投入し、投入水量の質量を測定する。

⑤での注水量(=体積)が空気量であり、コンクリート試料の質量と容積も正確に求めることができる。

(2) 圧力式エアメータによる測定方法

この方法には注水法と無注水法がある。注水法の作業手順は①容器のフランジ上端すりきり一杯までコンクリート試料を詰め、質量を測定する。②ふたを締め、排気口から水が出るまで注水口から水を注入し、注水質量を測定する。③空気室の空気圧を上昇させ、作動弁によって容器内に圧力を開放する。このときの圧力の低下量によって空気量を表示する。

②の作業を省略したのが無注水法である。無注水法の場合は、コンクリート試料の容積=容器の容積と解釈するが、注水法では注水量から試料容積を補正することで精度を高めることができる。また、空気量の測定値も注水法のほうが高いとされている。このため、今回の実験では注水法による測定を実施した。

上記の測定法により、表-1に示す20配合のコンクリートに対し、練り上がり直後、1時間経過後、2時間経過後に測定を実施した。

また、測定終了後のコンクリート試料は、5mmフルイ上で洗い出しを行い、粗骨材を取り出すことで、粗骨材のサンプリング量のバラツキの影響についても調査した。

2.4 単位水量推定式

エアメータの方法はコンクリートの単位体積質量の違いから単位水量を推定するものであり、材料の比重および配合が既知でなければならぬ。なお、試料中の空気量は変動するので空気量を除いた試料の単位体積質量を対象に推定式を検討した。

以下に、粗骨材のサンプリング量のバラツキを考慮しない場合の計算式を示す。

いま空気量を除いたコンクリート試料の単位体積質量を γ_0 として、この配合の水量が本来の単位水量より W' だけ多かったとする。このときの γ_0 は次式で表される。

$$\gamma_0 = \frac{\gamma_c + W'}{1,000 - Air + W'} \times 1,000 \quad (1)$$

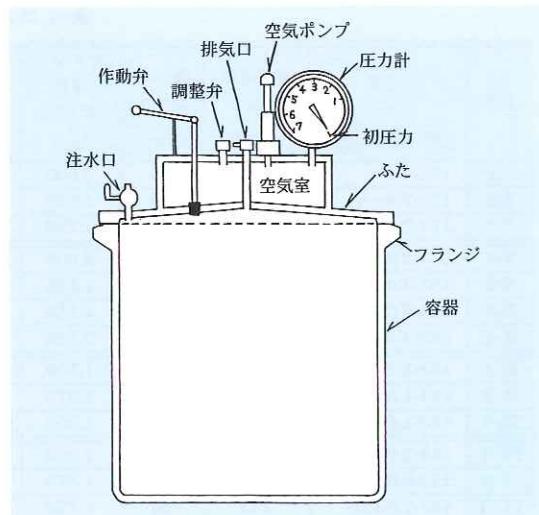


図-2 圧力式エアメータ

ここに、

γ_0 : 実験から得られる空気を含まない試料の単位体積質量 (kg/m^3)

γ_c : コンクリート配合上の 1m^3 当たりの質量 (kg/m^3)

Air : コンクリート配合上の空気量 (ℓ/m^3)

W' : 余剰水量 (kg)

上記の式から、余剰水量を求める式を導くと次の式となる。

$$W' = \frac{\gamma_0(1,000 - Air) - 1,000\gamma_c}{1,000 - \gamma_0} \quad (2)$$

したがって式(2)の値に配合上の単位水量を加えた値が推定単位水量となる。

なお、式(2)中の γ_0 の算出方法は以下のとおりである。

ローリンメータの場合

$$\gamma_0 = \frac{M_1}{V_a - W_1 - W_2} \quad (3)$$

ここに、

M_1 : コンクリート試料の質量 (g)

V_a : 容器の全容積 (ℓ)

W_1 : 最初の投入水量 (ℓ)

W_2 : 2回目の投入水量 (ℓ)

圧力式エアメータの場合

$$\gamma_0 = \frac{M_1}{V_1(1 - Air_1/100)} \quad (4)$$

または、

$$\gamma_0 = \frac{M_1}{(V_a - W_1)(1 - Air_1/100)} \quad (5)$$

ここに、

M_1 : コンクリート試料の質量 (g)

V_1 : 試料を充填した容器の容積 (ℓ)

V_a : 蓋をかぶせた状態での容器の全容積 (ℓ)

W_1 : 注水量 (ℓ)

Air_1 : 測定空気量 (%)

実際の実験結果の計算では、粗骨材のサンプリング量のバラツキを補正(以下、粗骨材補正という)する計算と補正しない計算、圧力式エアメータについては試料容積=容器の容積とした計算と注水量から容積を補正(以下、注水補正という)した計算の双方について推定単位水量を算出した。

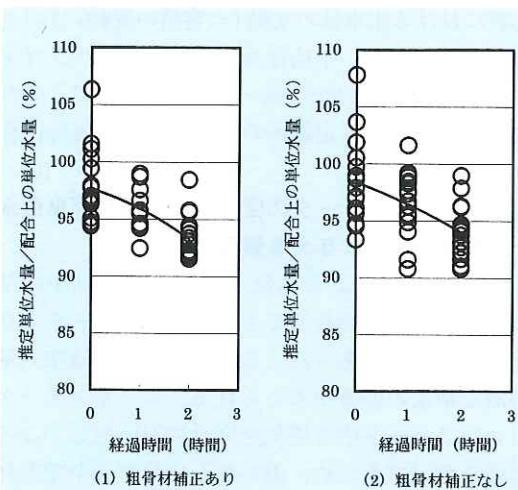


図-3 ローリングメータの試験結果

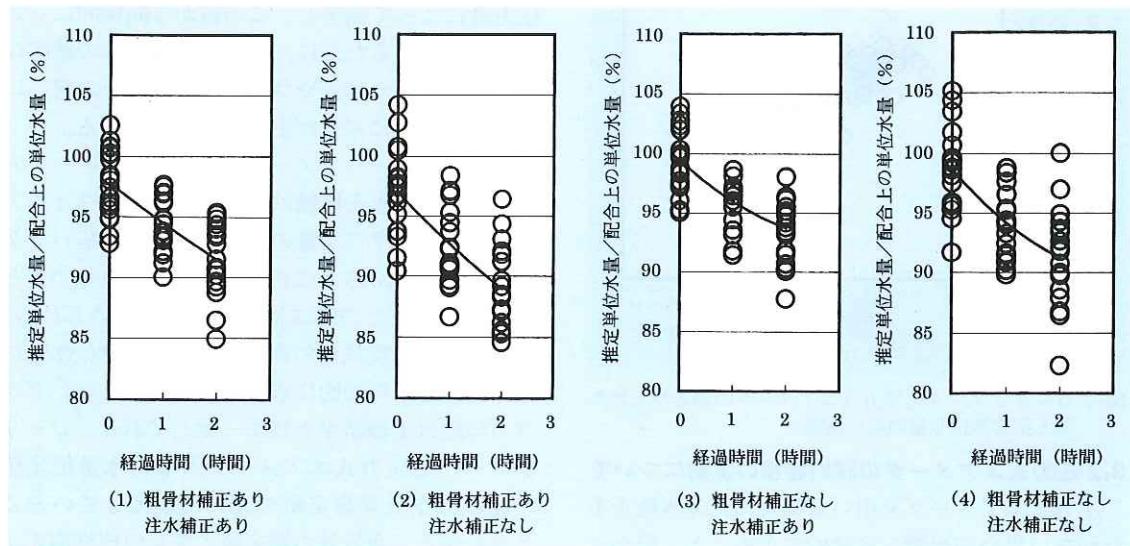


図-4 圧力エアメータの試験結果

3. 実験結果と考察

3.1 単位水量推定結果の比較

各実験および計算式から得られた推定単位水量を真の単位水量に対する百分率で示した結果を図-3, 4 に示す。いずれのケースでも単位水量の推定値は練上りからの時間の経過に伴って徐々に低下していく傾向を示している。この原因について過去の研究成果⁴⁾から推定すると、放置中の水分蒸発の影響と考えられる。そこで練上り直後の推定百分率と、各経過時間毎の標準偏差の平均値を整理し、その結果を図-5 に示した。

これらの図から、まず粗骨材補正ありのケースでローリングメータと圧力式エアメータの結果を比較すると、推定精度はローリングメータのほうがやや高いようである。

粗骨材のサンプリング誤差の影響は小さく、ローリングメータで粗骨材補正をしないとデータのバラツキの標準偏差がわずかに 0.6% 増加したが、圧力式エアメータでは有意な差が認められなかった。これは各エアメータの容積が骨材寸法に対して十分に大きい(ローリングメータは 6 リットル、圧力式エアメータは 7 リットル)ためと考えられる。

圧力式エアメータにおける注水補正の有無による影響はやや大きく、データのバラツキの標準偏差で 0.9% の差が生じている。

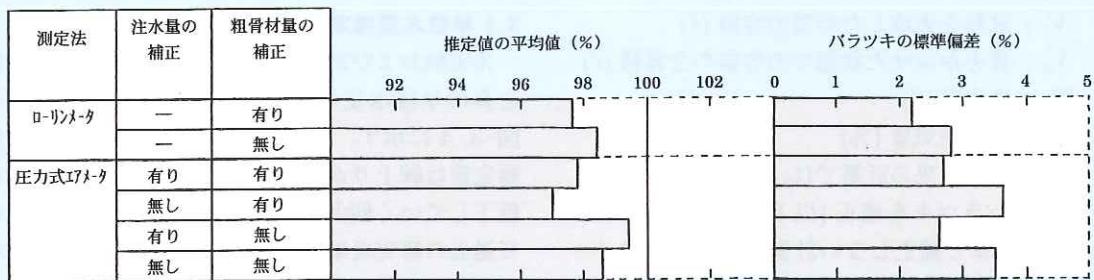


図-5 推定平均値と標準偏差

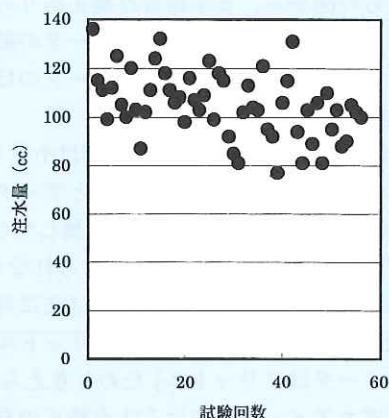


図-6 圧力式エアメータの注水量の変動

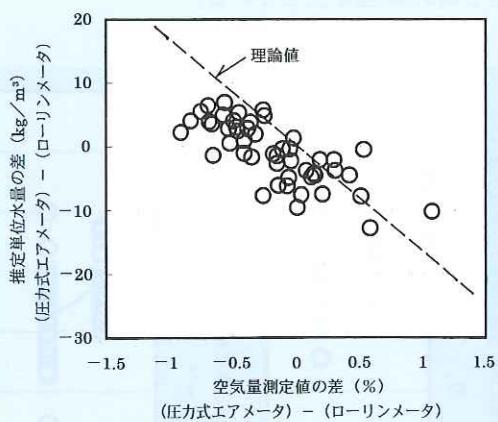


図-7 ローリンメータと圧力式エアメータの測定空気量の差と推定単位水量の差の関係

3.2 圧力式エアメータの試料容積の変動について

圧力式エアメータを用いる場合に、注水補正を行わない場合の影響を理論的に求めると、配合によって多少異なるが、容積が 10cc 異なると単位水量推定値は約 $2.2\text{kg}/\text{m}^3$ 程度変化する。今回の

実験における注水量の変動(=容積の変動)は図-6 のとおりであり、平均注水量は 105cc、バラツキの標準偏差は 13.4cc であった。したがって、これによる単位水量推定誤差の標準偏差は $3\text{kg}/\text{m}^3$ 程度と考えられる。

3.3 圧力式エアメータの空気量測定精度が単位水量推定結果に与える影響について

エアメータによる単位水量推定精度は注水量による容積補正を行っても、ローリンメータより若干劣るものであった。この理由としては空気量の測定精度の影響が考えられる。ローリンメータはコンクリート中の空気を完全に追いだし、この容積を測定するため、追いだし作業が完全であれば測定値に誤差が生じる可能性は低い。これに対して圧力式エアメータでは、減圧量をブルドン管圧力計によって測定し、この値から間接的に空気量を求めていたために、ブルドン管自体の精度に加えて、材料の品質やコンシスティンシーの違いによって測定値にズレが生じる可能性がある。

そこで、ローリンメータと圧力式エアメータの測定空気量の差を横軸に、ローリンメータとエアメータの推定単位水量の差を縦軸にして描いたグラフを図-7 に示す。この図から測定空気量の差と推定単位水量との間には負の相関が認められる。図中の破線は空気量の測定誤差が推定単位水量に与える影響を理論的に求めたものであるが、グラフの勾配は実験結果と良く一致しており、ローリンメータと圧力式エアメータの単位水量推定値の違いは空気量測定値の違いに起因していることがわかる。空気量の測定値のズレの標準偏差は 0.4%程度であり、これによって生じる推定単位水量の推定誤差は約 $7\text{kg}/\text{m}^3$ となる。

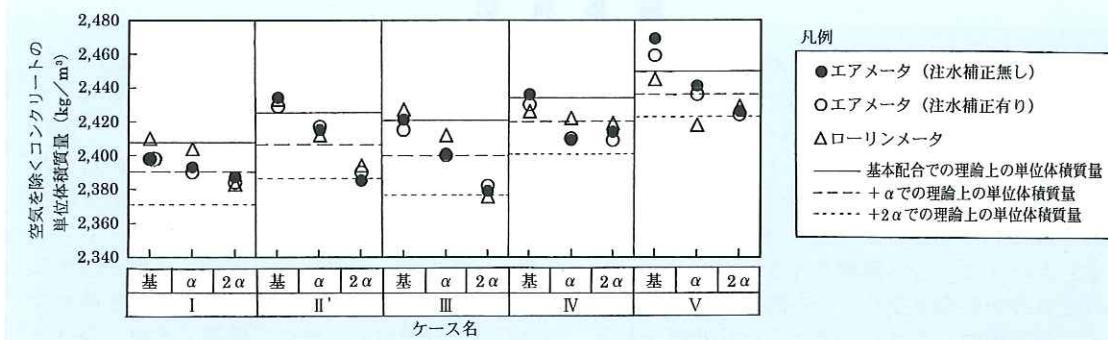


図-8 実験結果から得られるコンクリート密度

4. 現場施工管理への適応性について

エアメータによる単位水量推定法は単位体積質量から単位水量を推定する方法であるが、コンクリート質量の大半は骨材が占め、単位水量の占める割合はわずかであることから、骨材の密度が厳密に把握されていなければ、単位水量の推定精度は低下する。

このため、現場での施工管理法としては、単位水量の絶対値を求めるのは得策ではなく、むしろバッチ間の変動を相対的に捉える方法として有効と考えられる。

図-8は今回の各試験方法によって得られるコンクリートの単位体積質量(空気を含まない単位体積質量)を示した例である。バラツキはあるものの、各試験法ともに単位水量の変動による単位体積質量の変化を概略的に捉えているといえる。

現場での空気量測定法としては、作業の簡便さから圧力式エアメータを用いた無注水法が一般的である。測定精度からいえばこれまで述べてきたように、①ローリングメータ法、②圧力式エアメータの注水法、③圧力式エアメータの無注水法の順となるが、③の方法は現状での空気量測定作業に、品質測定というごく単純な作業を追加するだけで、単位水量の変動を概略ではあるが推定することが可能であり、最も現場に普及しやすい方法と考えられる。

5. まとめ

エアメータを用いたフレッシュコンクリートの単位水量迅速推定法について実験的検討を行った結果、以下のことが明らかとなった。

(1) ローリングメータと圧力式エアメータとでは

ローリングメータのほうが推定精度がやや高い。

- (2) 圧力式エアメータの方法では、注水法によつて測定し、注水量から試料容積を修正することで比較的良好な推定精度が得られる。
- (3) 圧力式エアメータの方法では空気量の測定誤差が単位水量推定精度に影響を与える。
- (4) ローリングメータを用いる方法、圧力式エアメータを用いる方法とともに、粗骨材のサンプリング誤差の影響は小さい。
- (5) 現場での施工管理への適応性を考えた場合には、コンクリート密度の変化を相対的にとらえることを念頭におき、また作業の簡便性からエアメータの無注水法で質量を測定する方法が最も普及しやすい方法と考える。

参考文献

- 1) コンクリートの早期迅速試験方法集、(社)日本建築学会、1985年
- 2) 片平博、河野広隆：フレッシュコンクリートの単位水量迅速推定法に関する実験的研究、土木研究所資料第3657号、1999年7月
- 3) 片平博、河野広隆：加熱乾燥法によるコンクリート単位水量迅速推定法の特性、土木技術資料、Vol.41, No.12, 1999年12月
- 4) 河野広隆、森濱和正、高橋弘人：コンクリートの品質管理に関する調査試験報告書(2)、土木研究所資料第2979号、1991年3月

片平 博*



建設省土木研究所材料
施工部コンクリート
研究室研究员
Hiroshi KATAHIRA

河野広隆**



同 コンクリート研究室長
Hirotaka KAWANO