

正会員 加賀秀治、○同 山本康弘（大成建設）

伊東靖郎（リブコンエンジニアリング）

1 はじめに

ブレバッドコンクリート工法はこれまで土木構造物のようなマッシブなコンクリートに施工されてきたが、一般建築構造物の施工やP C部材の製造に使用された例は少ない。この原因としては、部材が小さくなると注入性が悪くなり閉塞しやすい、注入性をよくするために加水量を多くするとブリージングや強度低下が大きくなる、骨材間の残存空隙や未充填個所が生じやすい、加熱養生を行うと表面に空気が集まり、あばたができるなどの事が挙げられる。我々はこれらの問題を解決するため、減圧注入によって残存空気を少なくする技術、および注入モルタルの新しい流動特性値を求めこれにより注入圧を制御する技術を開発した。また、これと併行して注入装置や積層型枠などコンクリートの新しい生産システムを確立した。本報告はこれらのうち、減圧の効果、注入モルタルの流動特性およびこの工法を用いて作ったコンクリートの物性について述べる。

2 減圧注入の効果

減圧ブレバッドコンクリート工法は図1に示すようなシステムで、全体を減圧状態にして注入するので、残存空気が少なくなり、密実なコンクリートが得られる。その効果を調べるため、 $1 \times 2 \text{ m}$ 12 cm 厚の型枠に4号碎石を詰め、大気圧、 -300 mm 、 -600 mm の3段階において $W/C = 45\%$ 、 $C/S = 1$ 、フロー21秒のモルタルを注入した。減圧注入したものはオーバーフロータンクにモルタルが充分でたのち大気圧に戻した。硬化後部材を切断し、全断面に対する残存空隙量の割合を調べると共に、コアボーリングにより圧縮強度を求めた。

結果は表1に示す如くで、減圧度が大きくなるにつれてその効果は著しくなり、大気圧下に比べて、 -600 mm では残存空隙は約1/6に、圧縮強度は約30%高い値になった。なお、型枠の2重シールなどによって、 -600 mm 程度の減圧は比較的容易に得られる。

3 注入モルタルの流動特性

3.1 流動特性値の測定方法： 従来、モルタルのレオロジー的特性値は回転粘度計によって調べ、注入性はPロートの値を基準としていた。しかし、ブレバッドコンクリートの実験を繰り返して行った結果、これらの値では不十分なことが分かった。そこで、図2に示すような装置を作り、骨材を詰めた通路に各種の流体を通して、その時の注入圧力 ΔP と空塔速度 U_f を測定した。この結果を図3（実線）に示す。

一般に、不規則空間を流体が通るときには(1)式の関係があるとされている。*伊藤四郎「化学者のための流体工学」

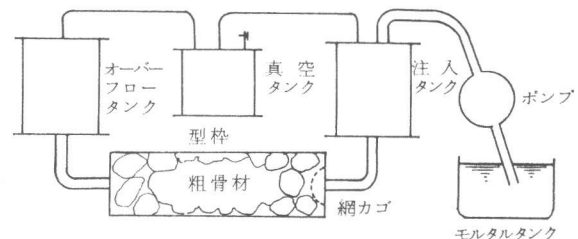


図1 減圧注入工法

表1 減圧注入と大気圧注入のコンクリートの比較

注入方法	空隙面積 (mm^2)	空隙率 (%)	圧縮強度 (kg/cm^2)	気圧 (kg/m^2)
大気圧下	1,293	1.18	312	1.0
-300 mmHg	653	0.59	358	0.6
-600 mmHg	223	0.20	414	0.2

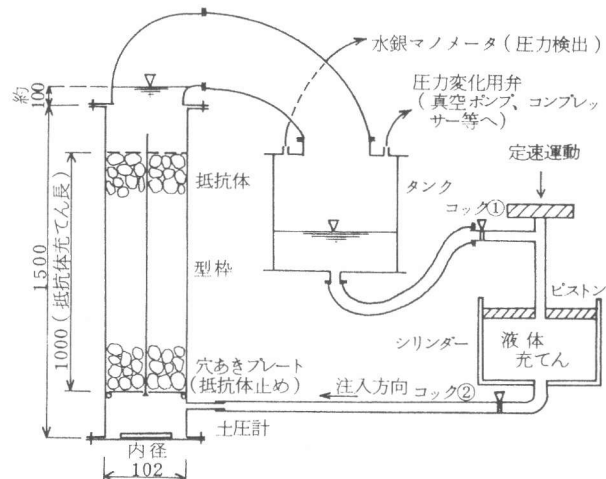


図2 不規則粒子空間の注入圧の測定方法

$$\mu_N = \frac{K \cdot \varepsilon^2}{L \cdot S_m^2 \cdot \rho^2 (1 - \varepsilon)^2} \cdot \frac{\Delta P}{U_f} \quad \dots\dots\dots (1)$$

μ_N : 粘度係数

K : 系数

S_m : 充填骨材の比表面積 L : 注入距離

ε : 充填骨材の空隙率 ρ : 流体の比重

回転粘度計から μ_N を求め、 $\Delta P/L$ と U_f の関係を推定すると図3の点線のようになる。すなわち、MC溶液のようにニュートン系流体に近いものは計算値と実測値がほぼ一致するが、モルタルのようなビンガム系流体になるにつれて大きくずれている。そこで、図4に示すようなL型試験装置を考案した。この片方に粗骨材を充填し、他方からモルタルを流した時のヘッド圧 P_v と流下時間 t を測り(2)式から λ を求めて、これを相対流動粘度係数とした。また、流れが止ったときのヘッド差 h を測り、(3)式から F_0 を求め、これを相対初期剪断応力降伏値とした。

$$\lambda = P_v / U_f \quad (g \cdot sec / cm^2) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$F_0 = \rho h / L \quad (g / cm^3) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{但し } P_v = \frac{(\ell_0 + \ell_1)}{2L} - F_0$$

$$U_f = (\ell_0 - \ell_1) / t_0$$

3.2 注入モルタルの閉塞性： 骨材空間にモルタルを注入してゆくと、砂やセメントペーストが次第に沈積して、通路が次第に狭くなる現象が観察された。すなわち、上記の試験装置で F_0 を測定した後、再度モルタルを通

過させると F_0 は大きくなる傾向がある。この差 ΔF_0 即ち $F'_0 - F_0$ を相対閉塞係数とした。

3.3 注入モルタルの配合と流動特性値： 以上のような流動特性値が注入モルタルの配合によってどのように変わるかを調べるため、C/Sを1 : 0.8 ~ 1.2、W/Cを33 ~ 46%に変えたモルタルで試験を行った。細骨材は粗粒率1.5程度の川砂とし、高性能減水剤を1%添加した。試験結果から単位水量と流動特性値との関係を調べると図5の如くなり、モルタルが分離しない単位水量の限界(限界単位水量値)が得られた。このほかPロートによるフロー値を測定したが、50秒以下では λ 値とほぼ直線的な関係にあることがわかった。

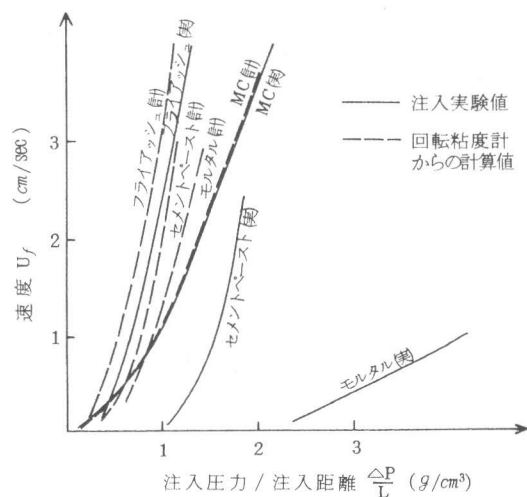


図3 不規則粒子空間での注入圧力と注入速度との関係

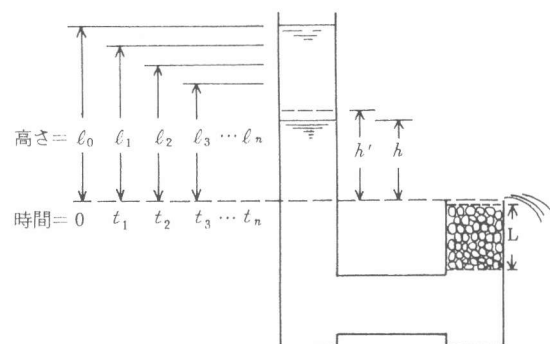


図4 流動性の試験装置

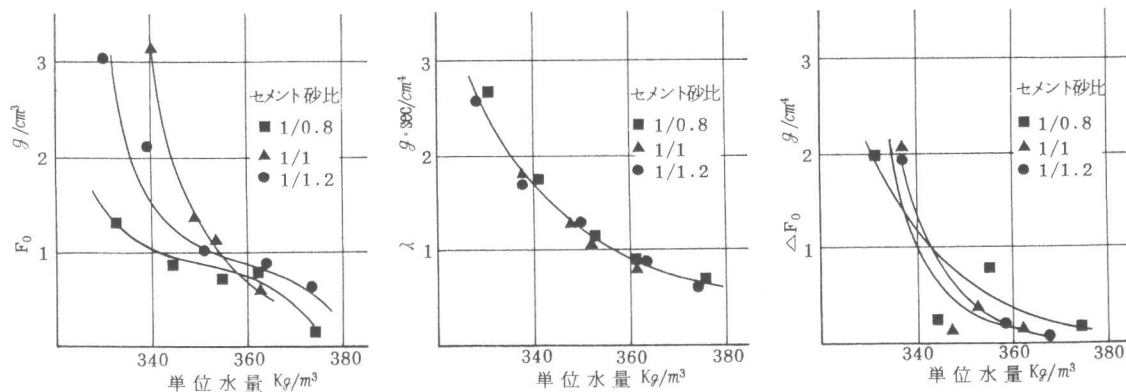


図5 (A) 相対初期剪断降伏値 (F_0) と単位水量

(B) 相対粘度係数 (λ) と単位水量

(C) 相対閉塞係数 (ΔF_0) と単位水量

3.4 注入圧力の推定方法： 注入モルタルの流動特性値から、注入時の圧力を推定する方法として(4)式を定めた。この場合、流動性測定装置には実際に使用する骨材を詰め、同一配合のモルタルを通して流動特性値を求めるようにする。

$$\Delta P = \frac{L_{max}}{L_{max} - L} (F_0 + \lambda \cdot U_f) + \rho h \quad \dots\dots (4)$$

L_{max} は注入圧が無限大となり閉塞するときの最大注入距離で、 ε 、 U_f 、 ΔF の関数として実験値から求める。実際の型枠に注入した時の注入圧の測定結果と、(4)式から推定した注入圧の関係の一例を示すと図6の如くであり、両者は実用範囲でよく一致している。

4 減圧注入によるコンクリートの物性

4.1 注入モルタル： セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は粗粒率1.65の川砂を用い、W/Cを35～55%、C/Sを0.8～1.3に変え、 F_0 が3以下になるように高性能減水剤の添加量を調整した。また、種類の半数にはアルミ粉を0.005～0.01%添加した。これらの配合を表2の前段に示す。

4.2 供試体の作成： コンクリート試験は圧縮強度、引張り（割裂）強度、曲げ強度、ヤング率、乾燥収縮率および鉄筋との付着強度について行った。粗骨材としては4号砕石（絶乾比重2.63、吸水率0.62%）を用いた。供試体の形状寸法は一般と同様になるようにしたが、モルタルの注入は図7に示すような減圧室を設けて行った。付着強度はD-16の異形鉄筋を鉛直にして調べた。養生は標準養生としたが、アルミ粉を添加したものは、注入後直ちに80℃で4時間の蒸気養生をしたものも調べた。

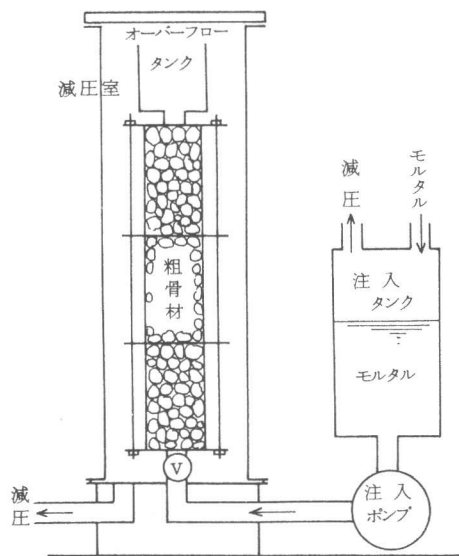


図7 供試体作製装置

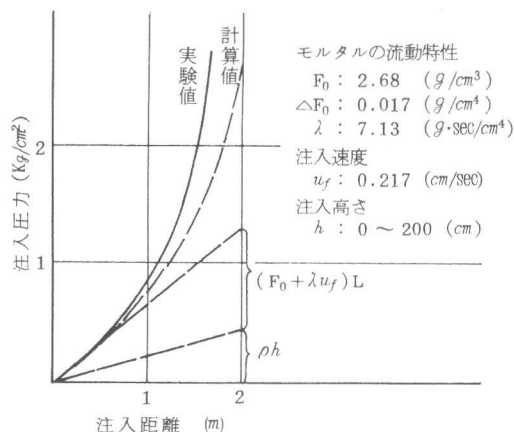
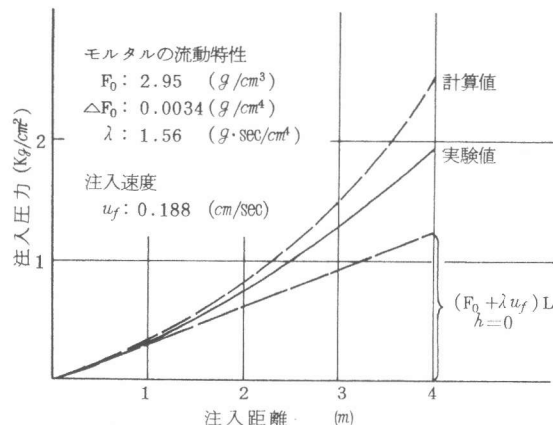


図6 プレバックドコンクリートの注入圧

4.3 減圧プレバックドコンクリートの諸物性： モルタルを注入した後のコンクリートの配合および圧縮強度試験の結果を表2の後段に示す。この結果から注入モルタルのC/Wとコンクリートの4週圧縮強度との関係を示すと図8の如くであり、アルミ粉を添加したものの方が大きくなっている。従来、プレバックドコンクリートは高強度のものが得られなかったが、本工法ではC/Wが2.5を越すものは500 kg/cm²以上の高強度が得られている。図8には参考までに既往のデータを併記した。また、蒸気養生をしたものは、4時間後の脱型強度が200 kg/cm²程度となっており、蒸気サイクルがかなり短縮されることになる。

圧縮強度に対する引張り（割裂）強度および曲げ強度の割合は普通コンクリートとあまり変わらない。ヤング率は高強度になると 40×10^4 kg/cm²以上となり、普通コンクリートよりもやや大きな値となっている。アルミ粉を添加しない場合、鉄筋との初期付着強度はやや低くなる傾向がみられるが、 $\delta = 0.025$ mmでは100 kg/cm²

表-2 プレバックドコンクリートの配合と物性

記号	注 入 モ ル タ ル					プレバックドコンクリート						
	W/C (%)	C : S	減水剤 (o/c.wt)	フロー (80C)	F ₂₈ (kg/cm ²)	単 重 (kg/ℓ)	セメント	砂	砕 石	F ₇	F ₂₈	F _{4時間*}
N-1	47	1:1	0.75	15	454	2.54	399	387	1.394	284	368	—
N-2	41	"	1.0	26	723	2.56	419	407	"	312	438	—
N-3	38	"	1.0	48	790	2.50	426	426	"	408	479	—
N-4	38	"	1.2	71	540	2.55	430	418	"	364	489	—
A-1	48	1:1.3	1.0	不 能	359	2.47	329	433	1.220	319	388	170
A-2	54	1:1	0	20	404	2.43	349	354	"	204	345	135
A-3	47	"	0.5	23	495	2.44	370	374	"	308	399	169
A-4	40	"	1.0	53	545	2.52	390	394	"	403	553	253
A-5	40	"	1.0	92	520	2.47	389	393	"	387	539	229
A-6	40	"	1.0	60	435	2.49	385	390	"	466	542	240
A-7	35	"	1.5	158	607	2.52	399	403	"	495	593	255
A-8	37	1:0.8	1.0	78	528	2.47	432	350	"	486	591	148

(1) Aシリーズはアルミ粉入り (2) *印は蒸気養生

程度あり、最大荷重は普通コンクリートよりもやや大きくなっている。乾燥収縮率の試験結果は図9に示す如くである。プレバックドコンクリートは粗骨材がセッティングするので当然乾燥収縮率が小さくなることが考えられるが、材令13週で0.03%程度であり、普通コンクリートの約半分値である。

このほか、粗骨材として軽量骨材を用いたプレバックドコンクリートについても試験してみたが、従来の軽量コンクリートより良好な物性を示した。

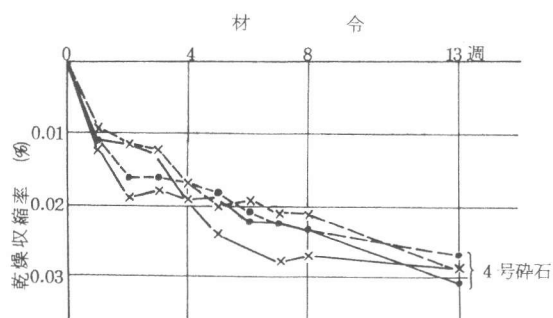


図9 乾燥収縮率

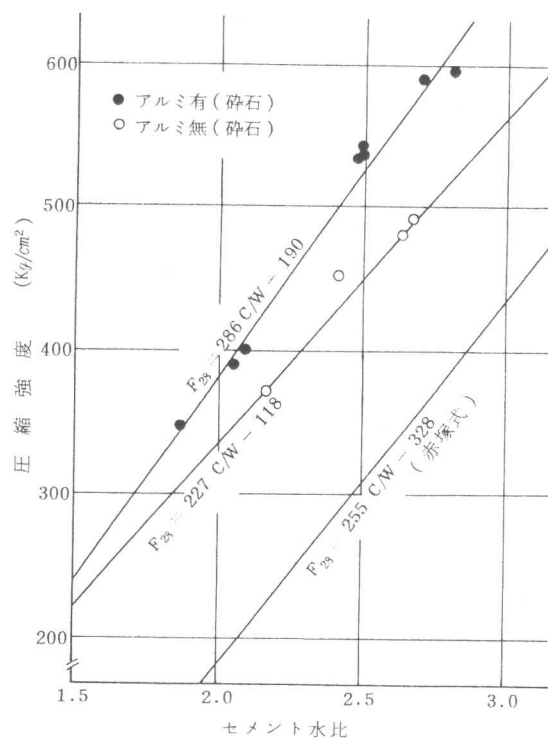


図8 セメント水比と圧縮強度

5 むすび

以上は「高性能・高品質コンクリートの生産技術に関する一連の研究」における第1段階の報告であり、更に検討すべき多くの点が残されているので、引続き研究を進めている。現在では、分離・ブリージングが少なく、しかも流動性のよいコンクリートを作る技術が確立されており、蒸気養生で2時間脱型ができるようになった。これらはまた次回に報告する予定である。なお、本研究は大成建設KKとリブコンエンジニアリングKKとの共同で行われ、両社の多くのメンバーで研究開発が進められているが、同時に建築では岸谷教授、土木では樋口教授、長滝教授などの御指導を仰いでいるので、心から感謝の意を表する次第である。

(註) 本工法の実施権はリブコンエンジニアリングKKが保有しており、既に数社がライセンスを受けて実施段階に入っている。また、国内外において多くの特許が確立されている。