[76]　棒貫入法によるコンクリートの流動性の測定

正会員　大岸佐吉　（名古屋工業大学工学部）
正会員　○柳橋　勇　（名古屋工業大学工学部）
正会員　小野博宣　（中部大学　工学部）
正会員　水谷且哉　（小原建設　建築部）

1. まえがき

まだ固まらないコンクリートの諸性質のうち特に流動性の判定方法の確立は，品質に対する多様な要求や次々に登場する工法への対応を決定する上で非常に重要である。

近年，この問題を究明するためにレオロジー理論に基いた数多くの研究がなされている。その結果，セメント分散体の流動性は骨材等の固体粒子の体積濃度などによって支配される事が明らかとなり，これを解明するいろいろな測定方法が提案されている。しかし，これらは測定法として未解決な点が多く，又測定装置の規模などの点から流動性の判断に広く用いるには問題が残されている。

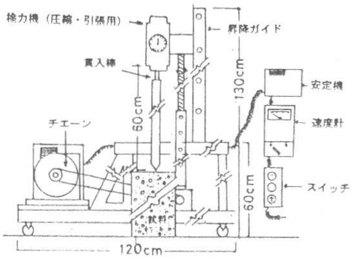
品質管理上，流動性を実務的に判定する方法としては測定が簡易，迅速かつ高精度で行えることが望ましい。

本研究は，既に開発した「棒貫入型流動性測定装置」[1]の特性実験を行った。次に，この装置を用いて水セメント比50，60及び70%のセメントペーストに細，粗骨材の体積濃度を組み合わせたモルタル及びコンクリートについて貫入速度と剪断応力を測定し，その結果から，貫入係数及び流動開始応力を求めた。特に骨材粒子の体積濃度，粒度分布，細骨材率などの影響を実験的に究明すると共に，コンクリートの塑性粘度及び降伏値との関連性について考察を加え，軟かさと分離抵抗性を分析すると同時にこの方法の実用性について検討した。

2. 棒貫入による流動性測定法の検討

2.1 棒貫入型流動性測定装置の構造と測定方法

A．測定装置の構造：正逆用リニアモーター（0～1500 r.p.m）の回転を，ラックピニオン方式で上下させる定速昇降装置に，検力機（圧縮，引張両用バネ，最大坪量：3 kg，5 kg，最小目盛：0.025 kg）と貫入棒を一体として取付けたものである。測定装置の概略図を図－1に示した。



図－1　棒貫入型流動性測定装置の概略図

B．棒貫入型流動性測定方法の原理：ビンガム基礎方程式を応用し,「棒貫入型流動性測定方法」(以下棒貫入法と呼ぶ）の関係式を以下のように求めた。

一定の寸法，形状を持つ棒を定速Vで垂直に試料中に貫入するときに受ける抵抗として，粘性抵抗D_fと慣性抵抗Dpがある。棒は定速で移動するため釣合いが成立し，荷重P，浮力Fgとすれば，式(1)で表わすことができる。

$$P - F_g - D_f - D_p = 0 \quad \cdots\cdots (1)$$

ここで，貫入棒と試料との間に均等な剪断応力τが働いているとすれば，その関係式は(2)で表わされる。

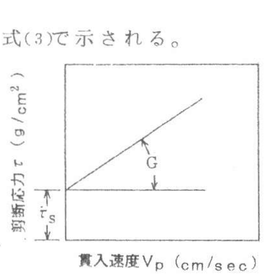
$$\tau = (P - F_g) / 2\pi r \ell = (D_f + D_p) / 2\pi r \ell \quad \cdots\cdots (2)$$

粘性抵抗は，貫入棒の速度Vpとコンクリートの塑性粘度ηと降状値τ_fに影響され，式(3)で示される。

$$D_f = 2\pi r \ell (\alpha \cdot \eta V_p + \gamma \tau_f) \quad \cdots\cdots (3)$$

ここに，r：貫入棒の半径（cm），ℓ：棒の貫入長さ（cm），γ：棒固有の定数，
α：試料の流れに関する定数（1/cm）

従って　$$\tau = \alpha \cdot \eta V_p + \gamma \tau_f \quad \cdots\cdots (4)$$



図－2　剪断応力と貫入速度の関係

図－2より，τ－v直線の勾配G（以下貫入係数Gと呼ぶ）とτ軸切片の値τ_s（以下流動開始応力と呼ぶ）は，それぞれ式(5),(6)で表わすことができる。

$G = \alpha \cdot \eta$ ………………… (5)　　　　$\tau s = \gamma \cdot \tau f$ ……………… (6)

既知の流体からα，γを求めておけば，塑性粘度と降状値が求められる。

2.2　棒貫入型流動性測定装置の予備実験

A．測定項目，測定装置及び測定方法：棒貫入型流動性測定装置を使用して，貫入係数G及び流動開始応力τs（g/cm^2）の2項目を測定した。棒貫入法の測定方法は，アルミ製の貫入棒（直径R_2 1.2，2.2，3.5cm，頂角β 60°，90°，180°）にプッシュプルスケールを取りつけたものを定速昇降装置に固定し，貫入速度を3段階（約0.4，1.2，2.5cm/sec）とし，試料（試料容器直径R_1 10，15，20及び30cm，深さ60cm）に垂直に貫入する。貫入棒の貫入長さが7，14，21cm に達したときの時間と，貫入棒を試料に貫入するときの抵抗を測定する。各貫入速度に対する剪断応力を対応させてτ－V直線を描き貫入係数と流動開始応力を求める。

B．使用材料及び調合：使用したセメントは普通ポルトランドセメント，比重3.15，比表面積3180（cm^2/g）である。骨材は長良川砂と揖斐川砂利を使用した。物理的性質の概要は，それぞれ最大粒径（2.5，25mm），比重（2.51，2.64），吸水率（1.8，0.73％），単位容積質量（1440，1570 kg/m^3），粗粒率（2.52，7.09）である。使用水は上水道（名古屋市）を使用した。

対象としたモルタル（M_1，M_2，M_3）及びコンクリート（C_1，C_2）の調合は，図－3中に示した。但し，Cvs，Cvgはそれぞれ細骨材，粗骨材の体積濃度(全コンクリート中に占める骨材の容積百分率)を示している。実験室の環境は，恒温室（温度20°C±1°C，湿度65～75％）である。

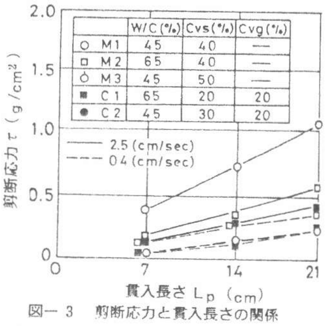
2.3　実験結果と考察

剪断応力と貫入長さ：図－3より，両者の間には，モルタル及びコンクリート共に比例関係が認められ，貫入長さが大きくなるほど剪断応力は大きくなる傾向にある。これは，貫入速度が速いほど大きくなる傾向を示している。この結果剪断応力は貫入棒の貫入長さが21cmについて測定する事とした。

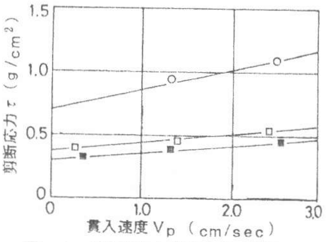
剪断応力と貫入速度：図－4より，モルタル及びコンクリート共に両者の間には直線関係が認められ，$\tau = \alpha\eta V p + \gamma \tau f$によく一致している。

棒の頂角と貫入係数及び流動開始応力：図－5より，モルタルにおいては水セメント比が65％のものは頂角による貫入係数の変化は認められないが，水セメント比が45％になると，頂角の増加に対して稍大きくなる傾向を示している。これは，試料の塑性粘度が大きくなると骨材の動きに対し頂角の影響が表われるものと思われる。図－6より，モルタル及びコンクリートにおいて棒の頂角による流動開始応力への影響は僅少である。しかし，容器径による流動開始応力への影響は非常に大きい。以上より，貫入棒の頂角は$\beta = 60°$を使用することとした。

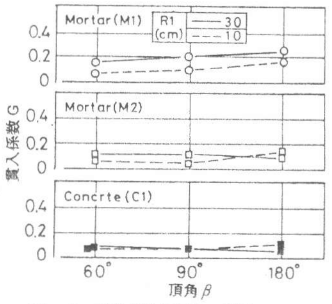
容器の直径と棒の直径との比と貫入係数及び流動開始応力：図－7，8より，容器の直径と棒の直径との比R_1/R_2が10以下のとき貫入係数にバラツキが見られるが，その値が10以上になると貫入係数に及ぼすR_1/R_2の影響は小さく無視できる。又，流動開始応力においては貫入係数と同様の傾向を示した。貫入棒の直径が，両者の結果に及ぼす影響については，直径が1.2 cmのものを除き有意差は認められなかった。以上より，棒貫入法による貫入係数と流動開始応力の測定には，貫入棒の直径を2.2 cm，試料容器の直径を30cmとした。



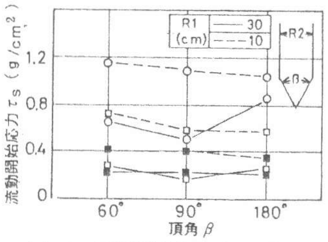
図－3　剪断応力と貫入長さの関係



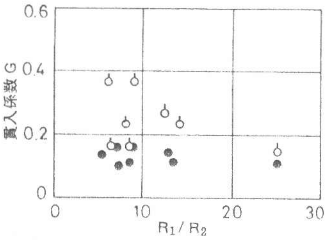
図－4　剪断応力と貫入速度の関係



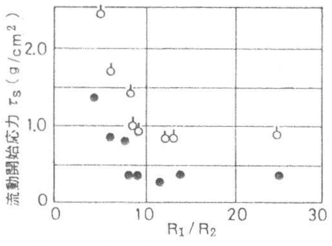
図－5　貫入係数と頂角の関係



図－6　流動開始応力と頂角の関係



図－7　貫入係数とR_1/R_2の関係



図－8　流動開始応力とR_1/R_2の関係

3. 棒貫入型流動性測定装置によるモルタル及びコンクリートの流動性の実験

3.1 実験方法

A. 測定項目・測定装置及び測定方法：測定項目は，貫入係数G，流動開始応力τs，モルタルの塑性粘度ηm (poise)，フロー値F（cm），スランプS（cm）の5項目である。測定装置は，棒貫入型流動性測定装置，フロー試験機，二重円筒型回転粘度計，スランプ試験装置を使用した。測定方法は，棒貫入型流動性測定装置の測定は2.2 Aに従った。但し，$\beta=60°$，$R_1=30$cm，$R_2=2.2$cm，貫入長さ21cmについて測定を行った。塑性粘度の測定は，内筒回転数が62.5 r.p.m について行った。フロー試験はJISR5201，スランプ試験はJISA1101によった。

B. 実験因子：水セメント比w/c（%），細骨材体積濃度Cvs（%），粗骨材体積濃度Cvg（%），細骨材率s/a（%）を採り上げた。

C. 使用材料及び調合：セメント及び細，粗骨材は2.2 Bと同一のものを使用した。本実験で対象とした調合は，水セメント比45，55及び65%，細骨材体積濃度が0，10，20，30，40，及び50%の合計18調合のモルタルと，水セメント比45，55及び65%，骨材体積濃度が0，10，20，30，40，50，60及び70%，細骨材率が0～83%の合計55調合のコンクリートである。

3.2 実験結果と考察

貫入係数及び流動開始応力と細骨材体積濃度：図−9より，細骨材の量が増加すると貫入係数は指数関数的な増加を示す。今，棒貫入によるモルタルの流れを層状に考えると，その各々の部分が違った速さの層をなして流れ，お互いにその接触面において力をおよぼし合っている。つまり貫入係数が大きい事は，各層のおよぼし合っている力が大きいことであり，モルタルの塑性粘度が大きい事を示している。これは骨材相互の粘着力を表わし，材料の分離の傾向を判定できる。又，流動開始応力は施工時におけるモルタルの軟かさを表わすものと考えられる。

貫入係数と骨材の体積濃度：図−10より，骨材の体積濃度の増加に伴い貫入係数が増加し，両者の関係は式(7)で表わされる。

$$G=K^{Cva}\cdot Gp \qquad (7)$$

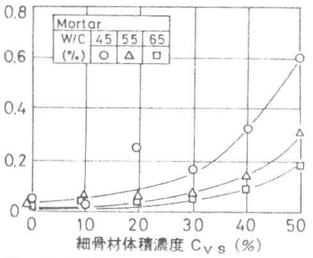
ここに，G：貫入係数，K：実験定数，Cva：骨材体積濃度（%）

Gp：セメントペーストの貫入係数

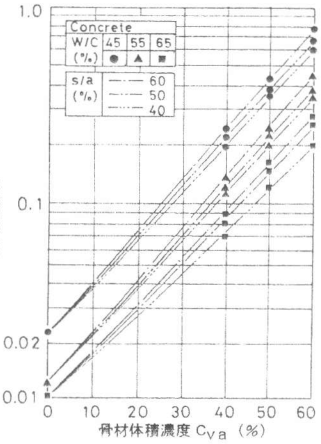
貫入係数と流動開始応力：図−11より，流動開始応力が大きくなると貫入係数は大きくなっている。又，これにより流動開始応力及び貫入係数は，骨材の配列状態に影響をうけ，骨材の充塡が密になる程大きな流動開始応力と貫入係数を示すことが判る。細骨材率40，50，60%，骨材の体積濃度が40～70%の範囲にある試料について，流動開始応力と貫入係数の関係を検討してみると，骨材の体積濃度の増加に従い，両者は相対的に大きくなっている。又，これらは同一細骨材率の場合直線的傾向を示して変化している。この事は細骨材率をパラメーターとして，貫入係数と流動開始応力は骨材の体積濃度が変化しても，同じ割合で変化することを示している。

スランプと貫入係数：図−12より，次の関係式を得た。

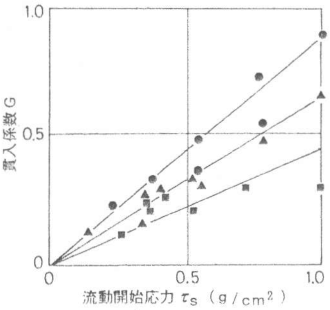
$$S(cm)=e_2/(G+e_1) \qquad (8)$$



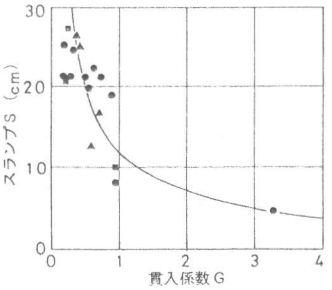
図−9　貫入係数と細骨材体積濃度の関係



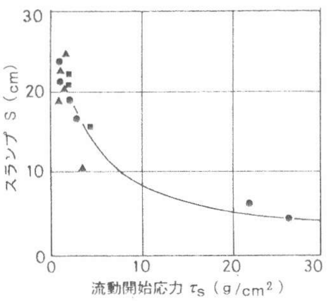
図−10　貫入係数と骨材体積濃度の関係



図−11　貫入係数と流動開始応力の関係



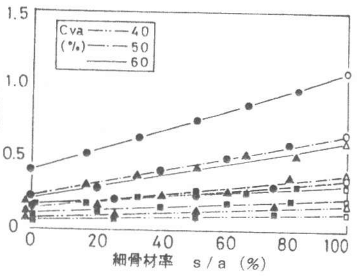
図−12　スランプと貫入係数の関係



図−13　スランプと流動開始応力の関係

但し，$e_1 = 0.26$，$e_2 = 14$

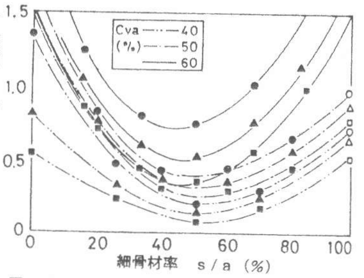
スランプと流動開始応力：図－13の結果より，スランプが小さいときは流動開始応力は大きな値を示すが，スランプが増大すると流動開始応力は著しく減少する。スランプはコンクリートの軟かさの程度，つまりコンシステンシーである。流動開始応力はコンクリートが流動を開始するときの応力であり，軟かさの程度の指標になり得る。



図－14　貫入係数と細骨材率の関係

3.3　棒貫入法に関する実験結果の総合的考察

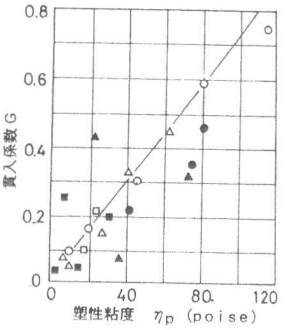
貫入係数と細骨材率：図－14より，貫入係数は流動開始応力の増加と共に大きくなることが判った。又，同一細骨材率では骨材体積濃度が大きい程貫入係数の値は大きくなる。これは，細粒骨材の増加により骨材の個数が増加する。このためセメントペーストとの接触面積が増加し，骨材の移動，再配列が困難となり大きな力が必要となるためである。この影響は，水セメント比が大きくなるとセメントペーストの粘度が小さくなることにより小さくなる。この事から，材料分離の傾向を判定することができる。



図－15　流動開始応力と細骨材率の関係

流動開始応力と細骨材率：図－15の結果より，骨材体積濃度及び水セメント比によって流動開始応力の値が最小となる細骨材率の値が存在している事が判る。これを「最適細骨材率」と呼ぶ。又，コンクリートが流動し易い状態の細骨材率の範囲は，流動開始応力の最小値に対して±10％程度であり，それ以上の場合には流動開始応力は大きな値を示している。つまり，流動開始応力は小さく貫入係数が大きい値を示すのが良好なコンクリートである。

貫入係数とモルタルの塑性粘度及びコンクリートの塑性粘度：図－16は，貫入係数とモルタルの塑性粘度及び「文献[2]の式(3),(4)」より求めたコンクリートの塑性粘度との関係を示したものである。同図より，モルタルとコンクリートの結果は，はっきりとした差が認められず，この両者の貫入係数と塑性粘度とは比例関係にある。モルタルとコンクリートの差は，そこに使用される細骨材と粗骨材の粒径の差のみと考え，コンクリートをセメントペーストと細・粗骨材からなる二相構造として，貫入係数と塑性粘度の結果について両者の関係を求めた。その関係は次式で表わされる。



図－16　貫入係数とモルタル及びコンクリートの塑性粘度の関係

$$\eta p = (1/\alpha) \cdot G \quad \cdots\cdots (9)$$

但し，αは実験定数であり，本研究では$\alpha = 7.14 \times 10^{-3}$

4.　結論

1）コンクリートの貫入係数は，セメントペーストの貫入係数と骨材の体積濃度及び細骨材率の三つをパラメーターとして表しうることを示した。(7)式

2）骨材の体積濃度が一定で，かつ一定の水セメント比のコンクリートでは，流動開始応力を最小とする細骨材率が存在することを棒貫入法により明らかにした。この方法によれば，良好な流動性を得るための最適細骨材率を決定することができる。

3）モルタル・コンクリートの塑性粘度（固体粒子の表面積係数を考慮した計算値）と貫入係数は直線関係にあり，この結果から，棒貫入法を用いて塑性粘度を求める実験式を示した。(9)式

4）棒貫入型流動性測定方法は，貫入係数Gと流動開始応力τsからコンクリートの塑性粘度と降伏値を知るものであり「分離性」と「軟かさ」の両性質を定量的に表わしうることを明らかにした。

5）棒貫入法は，簡単な機構のもとにモルタルやコンクリートの流動性を，簡便にしかも精度よく測定し，工事への適否を評価できるものである。

〔参考文献〕　1）柳橋　他：日本建築学会大会学術講演梗概集　昭和53年9月，PP.161～162

2）柳橋　勇：日本建築学会大会学術講演梗概集　昭和56年9月，pp.231～232