【土木学会論文集　第366号／V-4（ノート）　1986年2月】

プレパックドコンクリートにおける注入条件とグラウトの流動勾配との関係について

RELATIONSHIPS BETWEEN PERFORMANCE CONDITIONS OF PREPACKED CONCRETE AND GRADIENT OF MORTAR SURFACE

岩崎訓明*
By Noriaki IWASAKI

In order to produce the prepacked concrete of high quality, it is important to fill up the voids of preplaced coarse aggregate with mortar perfectly.

The author had proposed a theoretical method for predicting the process that the voids of the coarse aggregate were grouted.

As an example of practical application of the theory, relationships between the maximum gradient of mortar surface and performance conditions were calculated, and further, a procedure to decide the adequate grouting conditions was offered.

1. まえがき

プレパックドコンクリートの品質は，使用材料の性質，注入モルタルの配合，およびグラウトの塡充状態の良否によって定まる．そのため，プレパックドコンクリート工事においては，グラウトを確実に注入するための施工計画と施工管理がきわめて重要とされている[1]．

本四連絡橋基礎工事に関連して行われたカラーモルタルによる施工実験の結果[2]を調べてみると，良好な塡充状態が得られているのは，粗骨材層の中に吐出されたグラウトが，いったん注入管の近くで自由表面付近まで上昇した後，緩やかに流下して層状に塡充された場合であって，流動勾配が大きいとグラウトの流れが不均一になり，水によってグラウトが希釈されたり，未塡充部分が生じたりしている．したがって，良好な塡充状態を得るためにはグラウトの流動勾配をある程度小さく保つことが必要であって，その他の研究結果[3]も併せて考えると平均流動勾配は1/2以下，できれば1/4以下とすることが望ましい[4]．

著者は，先に，注入条件とグラウトの充塡状態との関係がグリーン関数によって表わし得ることを明らかにし，それを用いて注入状況を予測する方法について報告[5]したが，ここではさらに具体的に，注入時の諸条件とグラウトの最大流動勾配との間の関係式を導き，適切な流動勾配でグラウトを注入するための諸条件を図表を利用して求める方法について述べる．

* 正会員　工博　東洋大学教授　工学部土木工学科
（〒350　川越市鯨井中野台2100）

2. 注入条件と最大流動勾配との関係

（1） 長方形型枠の場合

Fig. 1のように，$L\times B$の長方形型枠の一隅Oを原点にしてx，y座標をとると，注入管が点P（x_p，y_p）にあるときの型枠内の任意の場所（x，y）におけるグラウト面の高さhは次式で推定できる[5]．

$$h=\frac{Q}{\varepsilon BL}(t+2s_x+2s_y+4s_{xy})\cdots\cdots(1)$$

ここで

$$s_x=\sum_{n=1}^{3}\frac{1}{a}\left(\frac{L}{n\pi}\right)^2\left[1-\exp\left(-\frac{an^2\pi^2}{L^2}t\right)\right.$$

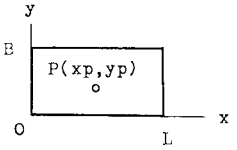

Fig. 1

$$\cdot\cos\frac{n\pi x}{L}\cos\frac{n\pi x_p}{L}\Big\}$$

$$s_y=\sum_{m=1}^{3}\frac{1}{a}\left(\frac{B}{m\pi}\right)^2\left\{1-\exp\left(-\frac{am^2\pi^2}{B^2}t\right)\right.$$

$$\left.\cdot\cos\frac{m\pi y}{B}\cos\frac{m\pi y_p}{B}\right\}$$

$$s_{xy}=\sum_{n=1}^{3}\sum_{m=1}^{3}\frac{1}{a\left\{\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2+\left(\frac{m\pi}{B}\right)^2\right\}}\left[1-\exp\left\{-\left(\frac{an^2\pi^2}{L^2}\right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left.+\frac{am^2\pi^2}{B^2}\right)t\right\}\right]\cos\frac{n\pi x}{L}\cos\frac{n\pi x_p}{L}$$

$$\cdot\cos\frac{m\pi y}{B}\cos\frac{m\pi y_p}{B}$$

また，t＝注入時間

Q＝注入速度

ε＝粗骨材層の空隙率

k＝粗骨材層に対するグラウトの浸透係数

$$a=k/\varepsilon \quad\cdots\cdots(2)$$

注入管は型枠の中央に1本設置し，断面 $y=B/2$ におけるグラウトの表面勾配を考えると

$x_p=L/2,\ y_p=B/2,\ y=B/2$

であるから

$$s_x=\frac{1}{a}\left(\frac{L}{\pi}\right)^2\left[1-\exp\left(-\frac{a\pi^2}{L^2}t\right)\right\}\cos\frac{\pi x}{L}\cos\frac{\pi}{2}$$

$$+\frac{1}{a}\left(\frac{L}{2\pi}\right)^2\left\{1-\exp\left(-\frac{4a\pi^2}{L^2}t\right)\right\}\cos\frac{2\pi x}{L}$$

$$\cdot\cos\pi+\frac{1}{a}\left(\frac{1}{3\pi}\right)^2\left\{1-\exp\left(-\frac{9a\pi^2}{L^2}t\right)\right\}$$

$$\cdot\cos\frac{3\pi x}{L}\cos\frac{3}{2}\pi$$

$$=-\frac{1}{a}\left(\frac{L}{2\pi}\right)^2\left\{1-\exp\left(-\frac{4a\pi^2}{L^2}t\right)\right\}\cos\frac{2\pi x}{L}$$

同様に

$$s_y=\frac{1}{a}\left(\frac{B}{2\pi}\right)^2\left\{1-\exp\left(-\frac{4a\pi^2}{B^2}t\right)\right\}$$

$$s_{xy}=-\frac{1}{a\left\{\left(\frac{2\pi}{L}\right)^2+\left(\frac{2\pi}{B}\right)^2\right\}}\left[1-\exp\left\{-\left(\frac{4a\pi^2}{L^2}\right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left.+\frac{4a\pi^2}{B^2}\right)t\right\}\right]\cos\frac{2\pi x}{L}$$

勾配は

$$\frac{dh}{dx}=\frac{d}{dx}\left\{\frac{Q}{\varepsilon BL}(t+2s_x+2s_y+4s_{xy})\right\}$$

$$=\frac{2Q}{\varepsilon BL}\left[\frac{1}{a}\left(\frac{L}{2\pi}\right)\left\{1-\exp\left(-\frac{4a\pi^2}{L^2}t\right)\right\}\sin\frac{2\pi x}{L}\right.$$

$$+\left(\frac{2\pi}{L}\right)\frac{2}{a\left\{\left(\frac{2\pi}{L}\right)^2+\left(\frac{2\pi}{B}\right)^2\right\}}\left\{1-\exp\left(-\frac{4a\pi^2}{L^2}t\right.\right.$$

$$\left.\left.\left.-\frac{4a\pi^2}{B^2}t\right)\right\}\sin\frac{2\pi x}{L}\right]$$

勾配の最大を考えるから

$$\exp\left(-\frac{4a\pi^2}{L^2}t\right)=0,\ \exp\left\{-\left(\frac{4a\pi^2}{L^2}+\frac{4a\pi^2}{B^2}\right)t\right\}=0$$

として

$$\left(\frac{dh}{dx}\right)_{\max}=\frac{2Q}{a\varepsilon BL}\left(\frac{L}{2\pi}\right)\left(1+\frac{B^2}{B^2+L^2}\right)\sin\frac{2\pi x}{L}$$

であり，その位置は $d^2h/dx^2=0$ より

$$\cos\frac{2\pi x}{L}=0,\ \text{すなわち}\ x=\frac{L}{4},\ \frac{3}{4}L$$

$$\therefore\left(\frac{dh}{dx}\right)_{\max}=\frac{1}{2\pi}\frac{2Q}{a\varepsilon B}\left(1+\frac{2B^2}{B^2+L^2}\right)$$

式（2）により $a\varepsilon=k$，また $L/B=\varphi$ とおくと

$$\left(\frac{dh}{dx}\right)_{\max}=\frac{1}{\pi}\frac{Q}{k}\frac{1}{B}\left(1+\frac{2}{1+\varphi^2}\right)\quad\cdots\cdots(3)$$

L，B に cm，Q に l/min，k に cm/s を用いると

$$\left(\frac{dh}{dx}\right)_{\max}=\frac{50}{3\pi}\frac{Q}{k}\frac{1}{B}\left(1+\frac{2}{1+\varphi^2}\right)\quad\cdots\cdots(4)$$

となる．このことから，最大流動勾配は，注入速度に比例，浸透係数に反比例，L/B が一定ならば B に反比例すること，型枠の寸法が大きいほど小さくなること，などがわかる．なお，

$$\alpha=\frac{50}{3\pi}\frac{1}{B}\left(1+\frac{2B^2}{B^2+L^2}\right)\quad\cdots\cdots(5)$$

とおくと

$$\left(\frac{dh}{dx}\right)_{\max}=\alpha\left(\frac{Q}{k}\right)\quad\cdots\cdots(6)$$

で，α は型枠の寸法によって定まるから，最大勾配を設定すれば Q/k の最大限度が求まる．

グラウトの注入状況を観測する実験は，従来かなり行われているが，注入速度 Q が一定でかつ浸透係数 k が測定されているものは，わずかに港湾技術研究所で行われたものがあるにすぎない．しかし，その研究報告[6]には粗骨材の粒径と注入速度を3通りに変えた実験におけるグラウトの表面形状が示されているので，その図からグラウトの最大勾配を読み取り，式（4）による計算値と比較した．Table 1 はその結果を示したものである．勾配の読み取りは主観的判断によるものであるが，両者はかなりよく一致しているといえる．

（2） 円筒形型枠の場合

半径 R の円筒形型枠の中心に注入管がある場合，注入時間 t において中心からの距離 r の点におけるグラウト面の高さは次式で推定できる[5]．

$$h=\frac{Q}{\pi R^2\varepsilon}\left[t+\sum_{n=1}^{3}\frac{J_0(\mu_n r)}{a\mu_n^2J_0^2(\mu_n R)}\{1-\exp(-a\mu_n^2t)\}\right]$$

Table 1 Comparison between calculated and experimental results.

Aggr (mm)	k(cm/s)	Q(ℓ/min)	experiment	calculation
10～15	1.99	4.36	0.62	0.59
20～30	8.96	11.52	0.33	0.35
30～40	15.37	4.83	0.15	0.09

$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(7)$$

ここに，μ_n は $J_1(\mu_n R)=0$ の正の根

この場合には dh/dr の最大値を求めることが長方形型枠の場合ほど容易ではないので，R を m 等分し $\Delta r=R/m$ とおいて $r_{i-1}=(i-1)\Delta r$ と $r_i=i\Delta r$ におけるグラウト高さ h_{i-1}，h_i を求め，勾配 G_i を

$$G_i=|(h_i-h_{i-1})/\Delta r|=|\Delta h/\Delta r|$$

で計算する．

$(i-1)\Delta r=r$ とおくと

$$\frac{\Delta h}{\Delta r}=\left|\frac{Q}{\pi R^2\varepsilon}\left[t+\sum_{n=1}^{3}\frac{J_0\{\mu_n(r+\Delta r)\}}{a\mu_n^2J_0^2(\mu_nR)}\{1-\exp(-a\mu_n^2t)\}-\frac{Q}{\pi R^2\varepsilon}\left[t+\sum_{n=1}^{3}\frac{J_0(\mu_n r)}{a\mu_n^2J_0^2(\mu_nR)}\{1-\exp(-a\mu_n^2t)\}\right]\right|\Big/\Delta r$$

最大勾配を考えるときは $\exp(-a\mu_n^2t)=0$ として

$$\left(\frac{\Delta h}{\Delta r}\right)=\frac{Q}{\pi R^2a\varepsilon}\left|\sum_{n=1}^{3}\frac{J_0\{\mu_n(r+\Delta r)\}}{\mu_n^2J_0^2(\mu_nR)}-\sum_{n=1}^{3}\frac{J_0(\mu_n r)}{\mu_n^2J_0^2(\mu_nR)}\right|\Big/\Delta r$$

式（2）により $a\varepsilon=k$ であるから

$$\left(\frac{\Delta h}{\Delta r}\right)=\frac{1}{\pi R^2}\cdot\frac{Q}{k}\left|\sum_{n=1}^{3}\frac{J_0\{\mu_n(r+\Delta r)\}}{\mu_n^2J_0^2(\mu_nR)}-\sum_{n=1}^{3}\frac{J_0(\mu_n r)}{\mu_n^2J_0^2(\mu_nR)}\right|\Big/\Delta r\cdots\cdots\cdots\cdots(8)$$

これを $r=0$ から $R-\Delta r$ まで計算してその最大値を求めれば最大流動勾配が得られる．

なお，この式から，最大流動勾配は型枠の半径の2乗に反比例，注入速度に比例，浸透係数に反比例することがわかる．

3. 注入条件の選定方法

施工条件として，型枠の半径 R(m)，グラウト面の平均打上がり速度 V_h(m/h)，注入速度 Q(l/min)，粗骨材の空隙率 ε，浸透係数 k(cm/s) を考え，これらと型枠の中心に注入管を設置した場合の最大流動勾配 G_m との関係を2.（2）の方法によって計算した．

なお，注入管1本当たりの受持面積 s(m^2) が設定されている場合には

$$R=\sqrt{\frac{s}{\pi}}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(9)$$

とする．

Fig. 2，Fig. 3 は

流量空隙率比　$Q_\varepsilon=\dfrac{Q}{\varepsilon}$　(l/min)$\cdots\cdots\cdots\cdots(10)$

流量浸透係数比　$Q_k=\dfrac{Q}{k}$(l/min)/(cm/s)$\cdots\cdots(11)$

を用いて計算結果を図示したものである．

これらを利用することにより，設定した流動勾配以下でグラウトを注入するための条件を次のようにして定めることができる．

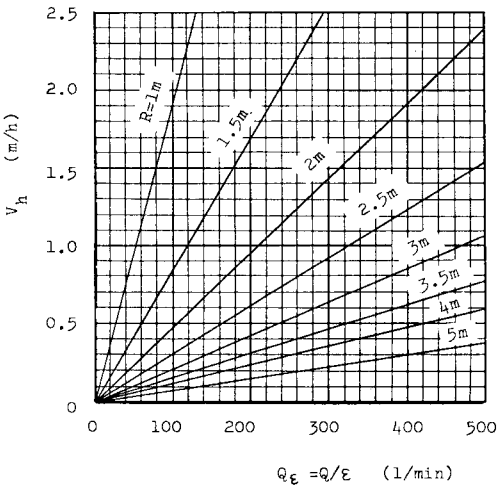

Fig. 2　V_h vs Q_ε.

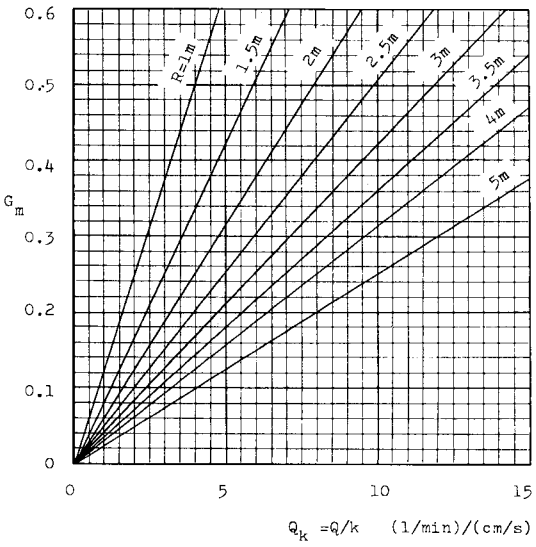

Fig. 3　G_m vs Q_k.

1）型枠，または受持面積の半径 R と平均打上がり速度 V_h とから，Fig. 2 を用いて流量空隙率比 $Q_\varepsilon=Q/\varepsilon$（$l$/min）を求める．

2）粗骨材の空隙率 ε と Q_ε とから，注入速度 $Q=\varepsilon Q_\varepsilon$（$l$/min）を計算する．

3）R と最大流動勾配の設定値 G_m とから，Fig. 3 を用いて流量浸透係数比 $Q_k=Q/k$（l/min)/(cm/s) を求める．

4）Q と Q_k とから，所要の浸透係数 $k=Q/Q_k$(cm/s) を計算する．

計算例として

型枠または受持面積の半径　$R=1.5$ m
設定平均打上がり速度　$V_h=0.5$ m/h
設定最大流動勾配　$G_m=0.25$
粗骨材の空隙率　$\varepsilon=44.0$ %

の場合の Q および k を求めると次のようである．

1）$R=1.5$ m，$V_h=0.5$ m/h より，Fig. 2 を用いて $Q_\varepsilon=59$ l/min

2）$Q=\varepsilon Q_\varepsilon=0.44\times59=26.0$ l/min

3）$R=1.5$ m，$G_m=0.25$ より，Fig. 3 を用いて $Q_k=3.0$（l/min)/(cm/s)

4）$k=Q/Q_k=26.0/3.0=8.67$ cm/s

すなわち，浸透係数が 8.67 cm/s 以上となるように粗骨材の粒度とグラウトの流動性を選べばよいことがわかる．

これとは逆に，注入条件から最大流動勾配を求める場合には Fig. 3 を用いればよく，また，Fig. 2 によって打上がり速度も容易に推定できる．

4. あとがき

注入管を狭い間隔で配置し，これらを用いて順次グラウトを注入すれば，単独の注入管を用いる場合よりも流動勾配は小さくなる．このような場合の注入状況は文献5)に報告した方法で推測することができるが，ここでは，隣接する注入管の影響を受けない，すなわち流動勾配が最も大きくなる場合について注入条件と流動勾配との関係を求めた．

実際の工事においては，注入速度は常に変動していて，設定速度，すなわち平均注入速度より必ず大きくなる場合があり，また局部的な流動勾配は場所によって相違するので，注入条件の選定にはこれらのことも考慮に入れる必要がある．

参考文献

1）鉄筋コンクリート標準示方書，土木学会．
2）日本鉄道建設公団：本四連絡調査　プレパックドコンクリート実験（その2）報告書概要，1967-3.
3）武川恵之助：大黒埠頭連絡橋橋脚工事における鉄骨プレパックドコンクリートの施工，コンクリートジャーナル，Vol. 12，No. 11，pp. 14～24，1974-11.
4）岩崎訓明：プレパックドコンクリート（最新コンクリート技術選書7），山海堂，1981.
5）岩崎訓明：プレパックドコンクリートにおけるグラウトの注入状況の予測方法，土木学会論文集・V，第360号，1985-8.
6）木庭・有吉：プレパックドコンクリート工法における粗骨材空隙中のモルタルの流動と粗骨材の粒径について，運輸省技術研究所報告，Vol. 11，No. 5，pp. 15～26，1961.

（1985. 2. 5・受付）