

[11] コンクリート構造物に生じるコールドジョイントの 定量的評価法に関する研究

正会員 松 藤 泰 典 (九州大学工学部)

正会員 ○河上嘉人 (九州大学工学部)

1. まえがき

コンクリートが連続的に打設される場合の先打ちコンクリート打設後の経過時間が数時間までの打継ぎによつて生じる打継部の欠陥はコールドジョイントとよばれ、コンクリート構造物の初期欠陥として重要な問題となっている。コールドジョイントの生成程度の評価は多くの場合、ジョイント部の曲げあるいは引張強度によつて行なわれているが、コンクリートの引張強度は構造設計上無視される値であり、従つて、強度自体に評価基準としての意味は少なく、むしろ、ひびわれ発生の危険性に対する指標としての二次的な意味を持つものであると考える。コールドジョイントが問題となるのは強度性状よりも、気密性、漏水、鉄筋の発錆等、建築物としての使用上及び耐久性上、不都合が生じる場合にある。これらの問題は、いずれも欠陥部の透気性状と密接な関連がある。従つて、本研究では打継ぎ部の品質管理方法として透気試験の適用を試みた。方法は、打継ぎ部に対して透気試験を実施し、これにより得られる透気量を平行平板間隙から流出するものとみなして、平均値としての間隙幅を算定し、この間隙幅によつて打継ぎ部の劣化程度を判定するものである。

2. 透気試験方法

透気試験の概要を図-1に示す。測定手順は、真空ポンプによつてあらかじめタンク内の圧力を900gf/cm²程度に減圧しておき、その後コックを開くことによつて吸着パッドを介し、コンクリート試験体のジョイント部から空気を吸入する。タンク内の圧力は圧力変換器を介し、テープレコーダーに記録した。また、試験体と吸着パッドとの界面から空気が流入するのを防ぐためパラフィンによるシールを行なつた。

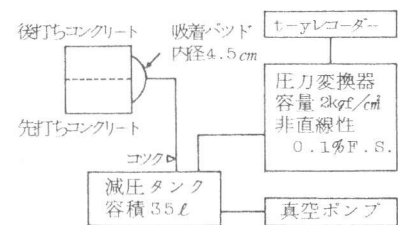


図-1 透気試験の概要

3. 平行平板間隙を流れる粘性流体の非定常流動

本試験法においては装置の簡略化を図るため、変圧法による実験を行なつた。従つて、空気の流れは非定常となる。ここでは、水平に置かれた平行平板間隙(間隙幅: D_0 、平板の幅: B 、平板の長さ: L)を流れる粘性流体(密度: ρ 、粘性係数: η)の非定常流動問題を、ベルヌーイの定理を非定常の場合に拡張することによつて求めた。仮定として、①平板の幅及び長さ比べて間隙幅は十分小さい。②流れは層流である。③非圧縮性流体である。の三つを用いると基本式は(1)式のようになる。

$$\frac{\partial u(t)}{\partial t} + \frac{12\eta}{\rho D_0^2} \cdot u(t) - \frac{g}{\rho} \cdot \frac{\Delta P(t)}{L} = 0 \quad (1)$$

但し、 $u(t)$: 流速、 t : 透気時間、 g : 重力の加速度

$P(t)$: 圧力差 $= P_0 - P(t)$ (P_0 : 入口側圧力 = 大気圧、 $P(t)$: 出口側圧力)

(1)式を解くためには $P(t)$ の関数形を決定する必要があるが、ここでは実験結果より決定した。図-2に結果の一部を示す。図-2は $P(t)$ を対数表示したものであるが、このように対数表示とした場合 $P(t)$ の経時変化はほぼ直線となり、いずれの場合も相関係数0.99以上の精度で $P(t)$ が(2)式で近似できることが確かめられた。

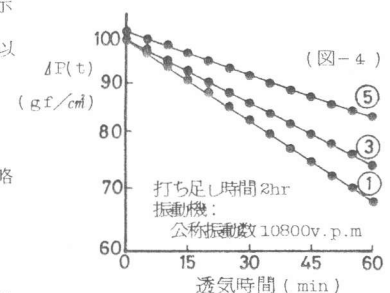
$$P(t) = a e^{-bt} \quad (2) \quad \text{但し、} a, b: \text{実験定数}$$

(2)式を(1)式に代入して $u(t)$ を求め、 $12\eta \gg \rho D_0^2$ の関係等を利用して式の簡略化を行なうと(3)式が得られる。

$$u(t) = \frac{g D_0^2}{12\eta L} \cdot \Delta P(t) \quad (3)$$

(3)式より間隙から流出する空気量を計

算し、又、タンク内へ流入する空気量をタンク内の圧力変化から求め両者を等

図-2 $\Delta P(t)$ の経時変化

値することで D_0 を求めると(4)式となる。本測定装置を使用するに際し、装置自身からの空気の漏れがいくらか認められ、この場合のタンク内の圧力上昇曲線も(2)式で近似できることが確認されたため、ここでは、実

$$D_0 = \left(\frac{127L}{g \cdot B} \cdot \frac{V}{P_0} \cdot b \right) \quad (4)$$

$$D_0 = (D_0^3 - D_0^3)^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

測値から計算される間隙幅 D_0 には装置からの漏れに相当する間隙幅 D_0' が含まれているものとみなして、これを(5)式のように補正した。本論文においては、(5)式によつて得られる D_0 を等価ひびわれ幅と呼び、以下これについて検討を行なつた。

4. 等価ひびわれ幅について

コンクリート表面で観察されるひびわれ幅と(5)式で計算される等価ひびわれ幅の関係について以下のような実験を行なつた。

直径10cm、高さ10cmの円柱型コンクリート試験体を圧裂することにより強制的にひびわれを生じさせ、上下平面のひびわれ幅を倍率20倍のルーペで測定した。ひびわれ幅は両面の各5箇所、計10箇所の測定

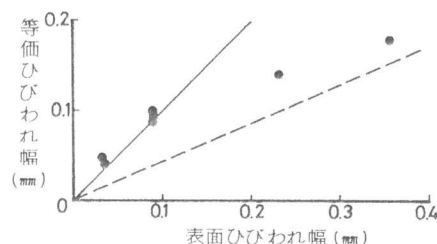


図-3 等価ひびわれ幅と表面ひびわれ幅の関係

値の平均値とした。その後、透気試験を実施して等価ひびわれ幅を算定した。両者の関係を図-3に示す。図中の実線は勾配1/1の直線である。ひびわれ幅が0.1mm以下の場合には両者はほぼ一致し、実線上に示される。しかし、ひびわれ幅がさらに大きくなると計算値の方が表面ひびわれ幅より小さい値となる。C.E.KESLER²⁾は加圧法

により透気試験を実施し、実験式として(6)式を提案している。筆者等の実験においては $\Delta P/P_2$ は0~0.1程度であるが、これを零と置くと(6)

$$Q = \frac{BD^3(2 + \Delta P/P_2)g}{3007L(1 + \Delta P/P_2)} \cdot \Delta P \quad (6)$$

式は(7)式のようになる。(3)式の右辺に間隙面積 $B \times D$ を乗じて流量とし、(7)式と比較すると、定常、非定常の違いを除けば、(7)式は(3)式に定数

但し、 Q ：流量、 P_2 ：出口側圧力

D ：ひびわれ幅

$1/12.5$ を乗じたものに一致する。このことは、見掛けのひびわれ幅に対し、それを $(1/12.5)^{\frac{1}{3}}$ 倍したものが実質的なひびわれ幅であるこ

$$Q = \frac{BD^3 \cdot g}{1507L} \cdot \Delta P \quad (7)$$

とを示すものである。KESLERは、これをコンクリート間隙表面の粗さに対する補正としている。図中の破線はこの関係を示したものであるが、ひびわれ幅が大きくなるに従い、測定点は破線に近付く傾向にある。

5. コールドジョイントに関する実験

先打ちコンクリートを打設後一定時間経過した後、後打ちコンクリートを打ち足すことにより試験体の作製を行なつた。打ち足し部の劣化程度を調べるため、透気試験、割裂試験、中性化深さ試験を実施した。

使用材料は、普通ポルトランドセメント、最大粒径20mm、絶乾比重2.70、吸水率0.90%の砕石、最大粒径5mm、絶乾比重2.57、吸水率2.32%の川砂、及びA E剤である。

コンクリートの調合は、水セメント比65%、細骨材率48.0% $\pm$ 1、単位水量186kg/ m^3 とし、A E剤をセメント重量の0.04%添加した。練り上り後のスランプ及び温度はそれぞれ、18cm及び22℃であつた。

試験体は、高さ40cm、厚さ15cm、長さ100cmの木製型枠を5台用意し、まず半層を打設した後、1時間おきに5時間まで上層を打ち足すことにより作製した。なお、上層を打設した後、棒状振動機を用いて締め固めを行なつた。方法は、振動機の先端が下層に10cm入るまで試験体の中心に鉛直に挿入し、10秒間加振した。振動機は、径40mm、長さ425mmの高周波バイブレーターで、表-1に示す二種類を使用した。表-1の振動数及び加速度は、試験体に挿入した状態で測定した値である。

表-1 振動機のパフォーマンス

公称振動数	振動数	加速度
10800v.p.m.	11300v.p.m.	10.7 g
14400v.p.m.	13600v.p.m.	24.8 g

試験体は打設後4日で脱型し、その後4ヶ月間、温度20℃、相対湿度80%の室内で養生した後、試験に供した。脱型後の試験体は、いずれも外観上の欠陥は見られず、打ち足し面にそつてレイタンスとみられる白い筋状の線が観察される程度であつた。

試験は、図-4に示す15箇所について行なつた。まず、透気試験を実施

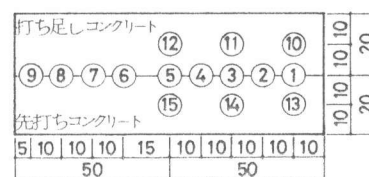


図-4 試験体 (単位: cm)

した後、直径3inのコアドリルでコアを抜き取り割裂試験を行なった。さらに、割裂試験後の破断面に対し中性化試験を行なった。従つて、中性化深さは、打ち足し境界面の値となる。以下に各試験結果を示す。なお、図-5の縦軸の割裂強度比は、一体打ちの試験体(図-4 №10~№15)の割裂強度に対する比を表わす。

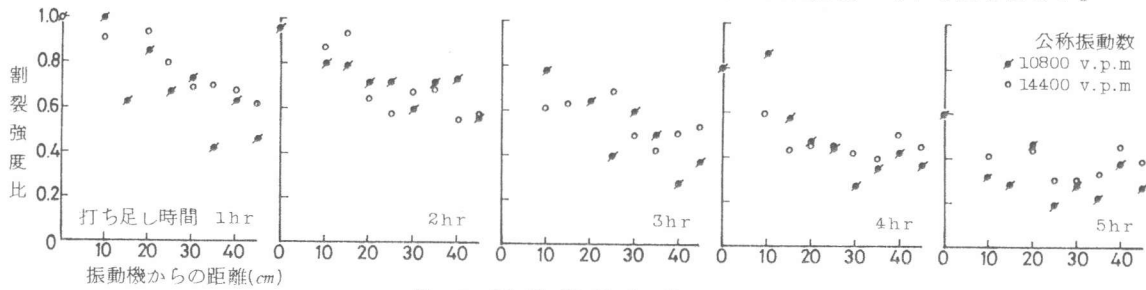


図-5 割裂試験結果

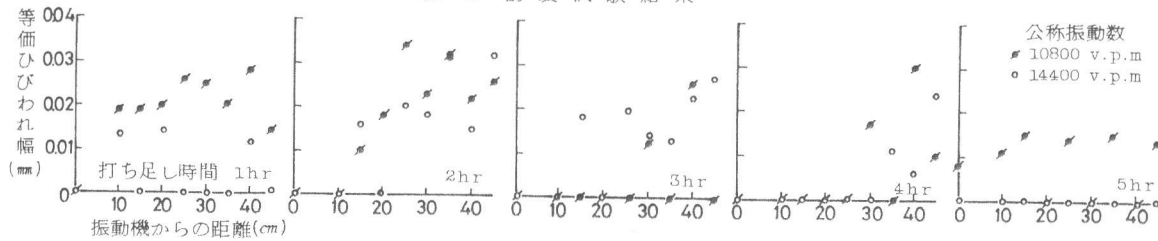


図-6 透気試験結果

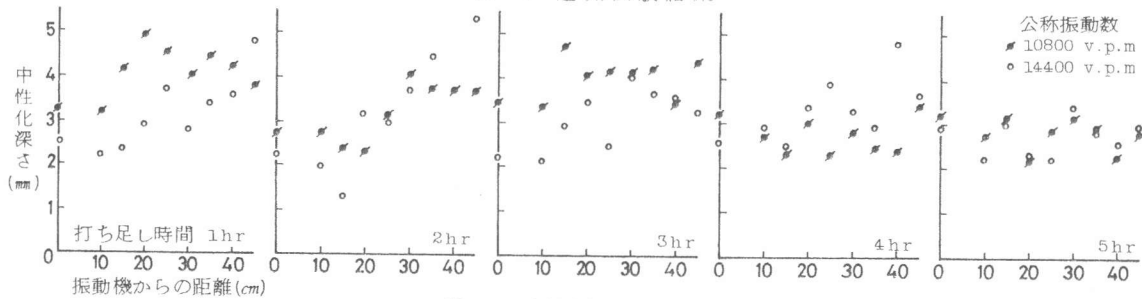


図-7 中性化深さ試験結果

6. 考察

基本式を誘導する際に三つの仮定を用いたが、〔仮定①〕は実際上問題ないと思われるので、〔仮定②〕及び〔仮定③〕について検討を行なう。

〔仮定②〕：流体の流れが層流となるか乱流となるかの一応の目安は(8)式に示す Reynolds 数で示され、

$$Re = UD/\nu \quad (8) \quad \text{但し、}\nu\text{：動粘度}$$

平板間隙を流れる二次元ポアズイユの流れに対しては、低臨界 Reynolds 数として $Rec=1900$ が与えられている。 Re は、(8)式に示すように、間隙幅及び流速に比例する量であるが、コールドジョイントに関する本実験の範囲においては、最大の等価ひびわれ幅及び流速はそれぞれ、 0.034 mm 、及び 0.4 m/sec であり、この場合の Re は 0.9 となる。これは、 Rec と比較しても十分小さい値であり、従つて、層流の仮定が通用する領域である。しかし、大きなひび割れを有する試験体に関しては以下に述べるように注意を要する場合が生じる。図-9 は表面のひびわれ幅が 0.34 mm の試験体を例として圧力差 P と単位時間当りの流量 Q の関係を示した

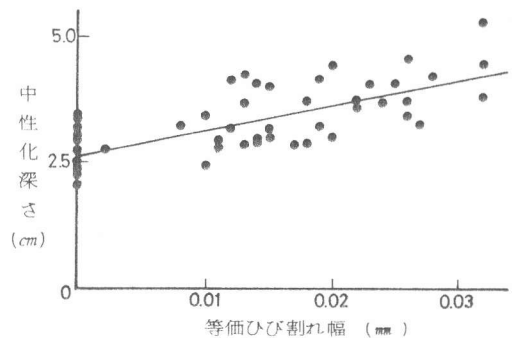


図-8 中性化深さと等価ひび割れ幅の関係

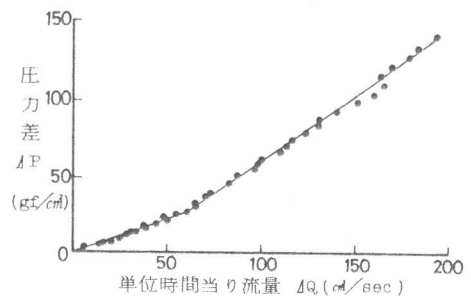


図-9 $\Delta P - \Delta Q$ 関係

ものである。(ΔQは間隙面積で除せば流速となる。)この場合、 $\Delta P - \Delta Q$ 関係は、ΔQが約60 ml/secを境界として二つの領域に区分することができ、ΔQが大きい領域においては乱流による圧力損失が生じていることがうかがわれる。この境界に対応するReは150程度であり、Recの1割以下の値であるが、この理由としては、本実験におけるようにコンクリート試験体のひびわれを対象とする場合、流路の不規則性、間隙表面の粗さ等により乱流が生じやすい条件下にあることが考えられる。従つて、試験に当つては加える圧力差の上限には十分注意が必要である。

〔仮定③〕：非圧縮性流体の仮定が成立しなくなるのは、流れの速度が音速に近づく範囲からとされている。本実験の範囲では、最大流速は1 m/sec程度であり、また、加える圧力も100g/cm²以下と小さいため、仮定③については問題はない。

割裂強度比は、打ち足しまでの時間が3時間程度までは振動機からの距離が速くなるに従い直線的に低下する。しかし、4時間以降では振動による効果はあまり見られず、概して小さな値を示す。振動の効果は、ブリージング水の拡散、レイトンス層の攪乱、及び、先打ちコンクリートの凝結を解除し、上下層の機械的ななみ合いによる一体化を行なう点にあると考えられるが、これらの効果は加える振動エネルギーが大きい程大きいと予想される。このことにより、打ち足しまでの時間が短い場合の現象が説明される。一方、打ち足しまでの時間が長い場合は、先打ちコンクリートの凝結が進んでいるため本実験で使用した振動機では、もはやこれを解除するには至らず、境界面に結合力の小さいレイトンス層が形成されることによると考えられる。

等価ひびわれ幅と中性化深さは、ほぼ同じような傾向を示す。すなわち、打ち足しまでの時間が短い場合は、振動機の有効域では上下層の一体化が行なわれ、そのため等価ひびわれ幅及び中性化の進行は小さいが、有効域外では両者共大きくなる。一方、打ち足しまでの時間が長い場合は、振動の効果が無くレイトンス層が形成されることを述べたが、この場合、レイトンスの主成分である水酸化カルシウムの結晶が成長することにより空隙を埋め、その結果、等価ひびわれ幅及び中性化深さが小さな値として観察されたものと考ええる。しかし、打ち足しまでの時間が長い場合は、割裂強度の低下に裏付けられるように、打ち足し部が外力あるいは熱応力や乾燥収縮応力等の内部応力を受ける場合、容易にひびわれを生じることから、実施構造物においては結果は違つたものになると予想される。しかし、いずれにしても、図-8に示すように、等価ひび割れ幅と中性化深さの間には、ばらつきは多いものの一定の比例関係にあることが認められ、劣化程度の定量的評価に関する等価ひびわれ幅の有効性が認められる。なお、図-8に示した結果は、いずれも目視によつて表面ひびわれが観察されない試験体に関するものであるが、この場合のばらつきの一因としては、吸着パッドの面積(約16cm²)が粗骨材寸法等に比べて小さかつたことが考えられる。但し、ひびわれを有する試験体については、ひびわれからの透気量がコンクリート自身からの透気量に比べて著しく大きいため、本試験法で使用した吸着パッドで十分である。

7. まとめ

本研究では、コールドジョイントの生成程度の評価試験法として透気試験を採用し、打継ぎ時間が5時間までの試験体に対し同試験を実施した。これにより得られる結果を、評価基準として試験装置及び試験の諸条件に依存しない統一的な表現とするため、等価ひびわれ幅を導入し、これについて検討を行なつた。さらに、基礎的研究として、打継ぎ部における等価ひびわれ幅と中性化深さとの関係について検討を行なつたが、両者の間に一定の比例関係が認められ、本方法の有効性を確認した。

謝辞：本研究の遂行に終始協力いただいた大学院生の半田啓一君に感謝の意を表わします。

文献

- 1) 建築学便覧 II 構造 日本建築学会編 P.752
- 2) CONCRETE FOR NUCLEAR REACTORS AIR PERMEABILITY OF CONCRETE (ACI C.E.KESLER)