

論文 飽和モルタルの透気特性について

廣永 道彦^{*1}・田中 雄司^{*2}

要旨: 地中に埋設され、保守・補修の困難なコンクリート構造物の長期耐久性を評価できる技術を開発するためには、コンクリート中に浸入していく各種化学物質の移行を支配する気液の挙動について評価することが必要である。本研究では、その評価手法の開発の一環として、水で飽和されたモルタルを用いて透気試験を実施し、飽和モルタルの透気メカニズムについて、実験に基づき考察したものである。

キーワード: 飽和モルタル、透気試験、耐久性

1. はじめに

昨今、欧州等でセメントのような高アルカリ環境下で水と反応した金属類が腐食により、水素ガスを発生するという現象に関する研究[1]が行われている。一方、コンクリート構造物は地中および地下空間で建設・利用されることが増えており、この場合、当然地中ということで、コンクリート構造物には地下水が浸入し、鉄筋等と反応して水素ガスが発生することが、長期に渡っては考えられる。一般に、地中・地下空間に建設するということは、その構造物の維持・管理という面で地上構造物のように簡易に保守・補修ができないため、このような構造物を設計・建設するためには、その構造物の供用期間を考慮しながら、設計時には外部荷重に対する断面力照査と併せて、供用期間中に構造物に作用し、その機能を損失させると考えられる劣化現象を適切に抽出するとともに、その劣化進行の状況とメカニズム、および構造物の機能に対する影響を評価することが重要となる。

コンクリートおよびモルタルの透気に関する研究[2,3]は従来より行われているが、そのほとんどが不飽和のコンクリートおよびモルタルを用いたものであり、飽和された状態での透気現象については研究されていないのが現状である。

そのため、本研究ではこのように地中に埋設され、地下水で飽和されたコンクリート構造物を想定し、その透気メカニズムを把握するために、飽和されたモルタル供試体を用いて透気試験を実施したものである。

2. 試験概要

2.1 供試体の製造

本研究で、想定した構造物は地中に埋設され、地下水に完全に冠水してしまうものであり、モルタルはこの中で、水素ガスを発生する可能性のある金属類を覆うものである。一方、地下水で飽和されても発生したガスの蓄圧により構造物に影響を与えないように透気抵抗が小さい材料を想定する必要がある。このため、実験に用いたモルタルの配合は表-1に示す通りとした。

本試験に供したモルタルの配合は、その供用目的から透気抵抗を小さくする必要から既往の研

*1 (財) 電力中央研究所、原燃サイクルプロジェクト部処分チーム主査研究員 (正会員)

*2 日本原燃(株)、環境整備部埋設建設課主任 (正会員)

究 [2]に基づき、透気性に対して最も影響を与えると考えられるので、石粉を多量に使用して水セメント比を270%と大きくし、ガス圧の作用により、排水、脱水、透気現象が確認しやすい配合とした。

供試体の練り混ぜは、地耐力に劣る地盤の改良等に適用される人工軟岩で用いられるソイルモルタルの製造方法[4]に従い、所定の水量を先に投入したミキサーの中に細骨材、石粉、セメントの順に投入していき、約3分間練り混ぜ、 $\phi 15 \times 30$ cmの型枠に打ち込み、28日間標準養生を行った。養生終了後、コンクリートカッターで $\phi 15 \times 5$ cmに切断し、一週間の乾燥工程後、両面を研磨して試験に供した。

2.2 試験装置

試験に供した装置は図-1に示す通りであり、圧力容器の拡大図は図-2に示す通りである。この装置は、透水試験、透気試験が各々単独でできることに加えて、飽和状態の供試体に対して、押し出した水の量と透気量を測定する機能を有する特徴を持つ。本装置は、従来よりコンクリートの透気に関する研究を実施している氏家[2]の試験装置を参考にし、新たに本研究の目的である飽和モルタルの透気試験の目的にそった実験装置の設計・製作を行ったものである。

本装置の主な仕様は表-2に示す通りである。

2.3 使用液体および気体

透水試験及び供試体を飽和するために使用する液体は水道水とした。試験においては、水道水を満たしたタンクにコンプレッサーにより空気圧を載荷させ、空気の圧力で水に圧力を作用させた。透気試験において使用した気体は解析等でその後評価する場合に粘性等の物性値を換算しやすい水素に近い分子量をもつ不活性ガスのヘリウムとした。

2.4 試験温度および湿度

試験は $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度60%の恒温・恒湿状態にて実施した。

2.5 試験方法

本研究の目的は、水で飽和したモルタルの透気性状の把握である。従って、供試体を飽和状態にするために透気試験に先たって透水試験（アウトプット法）を実施し、流入量、流出量が定常になるのを確認した後、次の要領で透気試験を実施した。

表-1 モルタルの配合

| W/C (%) | 単 位 量 (kg/m ³) | | | | | | |
|---------|----------------------------|------|-----|-----|------|------|---------|
| | 水 | セメント | 石 粉 | 膨張材 | 細骨材 | SP剤 | 増粘剤 (g) |
| 270 | 265 | 98 | 641 | 25 | 1056 | 15.3 | 133 |

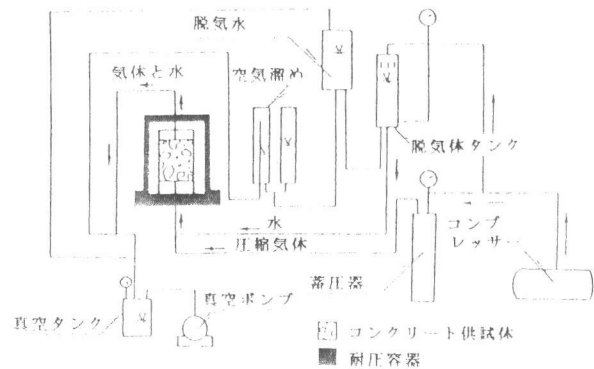


図-1 透気試験装置の概要

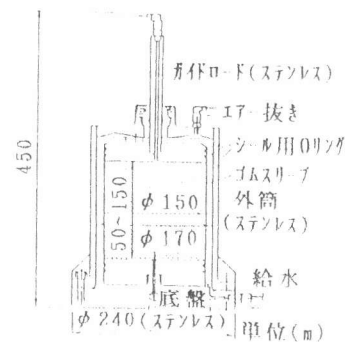


図-2 圧力容器

表-2 試験装置の主な仕様

| 項目 | 仕 様 | | |
|------|-----|-----------------------|-------------------|
| | 項目 | 仕 様 | 精度 |
| 耐圧性能 | 透気圧 | 10 kg/cm ² | ±0.5% F.S |
| | 透水圧 | 1 ℓおよび50 cc | ±0.5% F.S |
| | 透気量 | フローセンサー | 1 ℓ/minと50 cc/min |
| 排水側 | 排水量 | 精密電子天秤 | ±0.01 g |
| | 透気量 | 差圧計 | 1 ℓおよび50 cc |

- ①供試体を試験装置に設置する。
- ②飽和状態にするために、アウトプット法による透水試験を行う。この時、載荷圧力は1 kg/cm²とする。
- ③透水試験で流入、流出量が一定になったことを確認した後、透気試験を実施する。
- ④透気試験では、ガス圧2 kg/cm²までは0.1 kg/cm²毎に昇圧し、それ以降は0.5 kg/cm²ステップで行った。ガス圧の載荷パターンは次に示すものとし、連続して実施した。

- 1回目：0.1～5 kg/cm²まで
- 2回目：1回目で透気が確認された圧力～5 kg/cm²まで
- 3回目：1回目で透気が確認された圧力～9 kg/cm²まで

各圧力維持時間は、最長2時間とした。なお、ガスの透気が確認された場合は、単位時間当たりの透気量が一定になるのを確認して、次の圧力に移ることとした。また、ガス圧載荷時の側圧は、載荷ガス圧+1 kg/cm²とした。透水係数、透気係数[2]の算定に当たっては、それぞれ次に示す式(1)、式(2)に従った。

$$K_w = \frac{L Q \gamma_w}{A (P_1 - P_2)} \quad (1)$$

ここで、 K_w = 透水係数 (cm/sec), L = 供試体の長さ (cm), P_1 = 載荷圧力 (kgf/cm²)
 P_2 = 大気圧 (kgf/cm²), γ_w = 水の単位容積重量 (kgf/cm³) (=0.09982),
 Q = 透水量 (cc/sec), A = 断面積 (cm²)

$$K_A = \frac{2 L P_2 \gamma_a}{P_1^2 - P_2^2} \quad (2)$$

ここで、 K_A = 透気係数 (cm/sec), L = 供試体の長さ (cm), P_1 = 載荷圧力 (kgf/cm²)
 P_2 = 大気圧 (kgf/cm²), γ_a = ヘリウムの単位容積重量 (kg f / cm³) (=1.785 × 10⁻⁷)

3. 試験結果

表-3に試験結果を示し、図-3に1回目(0.1～5 kg/cm²まで)、図-4に2回目(透気が確認された圧力～5 kg/cm²まで)、図-5に3回目(透気が確認された圧力～9 kg/cm²まで)の透気試験結果を示す。

(1) 1回目の透気試験結果

供試体からの排水は、ガス圧載荷直後から認められたが、ガスの透気は見られなかった。

ガス圧1.8 kg/cm²になってガスの透気が確認されたが、それまで排水量は圧力に関わ

らずほぼ一定であった。その後、2.0 kg/cm²までは、排水量もほぼ一定で、透気係数もほとんど同じ値であった。ガス圧2.5 kg/cm²で、排水量が急に増加し、同時に透気係数も1オーダー増加し、その後も圧力の増加とともに、透気係数も大きくなっていった。また、排水量はガス圧4.0 kg/cm²時に最大値を示し、その後減少していった。

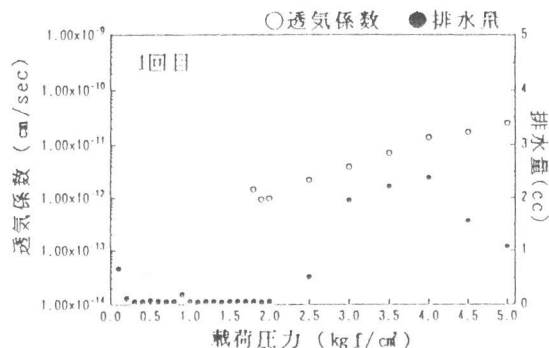


図-3 飽和透気試験結果

(1回目のガス圧載荷: 0.1～5.0 kgf/m²)

(2) 2回目の透気試験結果

1回目の試験で透気が確認されなかった1.0 kg/cm²から開始し、排水は確認されなかったが、ガスの透気は確認できた。また1回目の試験でガス透気が確認できた1.8 kg/cm²では、透気係数が1オーダー大きくなっていた。

さらに、1回目の各圧力における透気係数よりも、2回目のものは、全般的に透気係数が1オーダー大きくなっており、排水量も少ない傾向であり、ガス圧4.0 kg/cm²と5.0 kg/cm²での透気係数はほぼ同じで透気係数の圧力依存性が初めて見られなかった。

表-3 透気試験結果

| ガス圧 (kg/cm ²) | 第1回目の透気試験 | | 第2回目の透気試験 | | 第3回目の透気試験 | |
|------------------------------|------------------------|-------------|------------------------|-------------|------------------------|-------------|
| | 透気係数 (cm/sec) | 排水量 (cc) | 透気係数 (cm/sec) | 排水量 (cc) | 透気係数 (cm/sec) | 排水量 (cc) |
| 0.1 | 透気せず | 0.65 | | | | |
| 0.2 | 透気せず | 0.11 | | | | |
| 0.3 | 透気せず | 0.05 | | | | |
| 0.4 | 透気せず | 0.05 | | | | |
| 0.5 | 透気せず | 0.07 | | | | |
| 0.6 | 透気せず | 0.05 | | | | |
| 0.7 | 透気せず | 0.05 | | | | |
| 0.8 | 透気せず | 0.05 | | | | |
| 0.9 | 透気せず | 0.18 | | | | |
| 1.0 | 透気せず | 0.05 | 8.36×10 ⁻¹² | 0.00 | | |
| 1.1 | 透気せず | 0.04 | | | | |
| 1.2 | 透気せず | 0.05 | | | | |
| 1.3 | 透気せず | 0.05 | | | | |
| 1.4 | 透気せず | 0.04 | | | | |
| 1.5 | 透気せず | 0.05 | | | | |
| 1.6 | 透気せず | 0.05 | | | | |
| 1.7 | 透気せず | 0.05 | | | | |
| 1.8 | 1.42×10 ⁻¹² | 0.05 | 3.93×10 ⁻¹² | 0.00 | 1.36×10 ⁻¹¹ | 0.00 |
| 1.9 | 9.32×10 ⁻¹³ | 0.05 | | | | |
| 2.0 | 9.67×10 ⁻¹³ | 0.05 | 4.45×10 ⁻¹² | 0.00 | 1.49×10 ⁻¹¹ | 0.03 |
| 2.5 | 2.15×10 ⁻¹² | 0.50 | | | 1.55×10 ⁻¹¹ | 0.00 |
| 3.0 | 3.85×10 ⁻¹² | 1.94 | | | 1.98×10 ⁻¹¹ | 0.04 |
| 3.5 | 7.03×10 ⁻¹² | 2.20 | | | | |
| 4.0 | 1.36×10 ⁻¹¹ | 2.37 | 2.12×10 ⁻¹¹ | 0.90 | 3.65×10 ⁻¹¹ | 0.09 |
| 4.5 | 1.70×10 ⁻¹¹ | 1.55 | | | | |
| 5.0 | 2.74×10 ⁻¹¹ | 1.06 | 2.68×10 ⁻¹¹ | 0.40 | 4.60×10 ⁻¹¹ | 0.09 |
| 5.5 | | | 3.59×10 ⁻¹¹ | 0.78 | | |
| 6.0 | | | 3.76×10 ⁻¹¹ | 0.21 | 5.77×10 ⁻¹¹ | 0.11 |
| 6.5 | | | 4.36×10 ⁻¹¹ | 0.47 | | |
| 7.0 | | | 5.48×10 ⁻¹¹ | 0.51 | 6.70×10 ⁻¹¹ | 0.12 |
| 7.5 | | | 6.14×10 ⁻¹¹ | 0.36 | | |
| 8.0 | | | 6.78×10 ⁻¹¹ | 0.18 | 8.08×10 ⁻¹¹ | 0.17 |
| 8.5 | | | 7.47×10 ⁻¹¹ | 0.07 | | |
| 9.0 | | | 7.46×10 ⁻¹¹ | 0.12 | 8.39×10 ⁻¹¹ | 0.11 |

(3) 3回目の透気試験結果

1回目の試験でガスの透気が確認できたガス圧1.8 kg/cm²では、さらに透気係数が2オーダー大きくなっており、排水量も全般的に渡って減少しており、2回目の試験と同様に4.0 kg/cm²以上のガス圧での透気係数はほぼ同じで透気係数の圧力依存性が見られなかった。

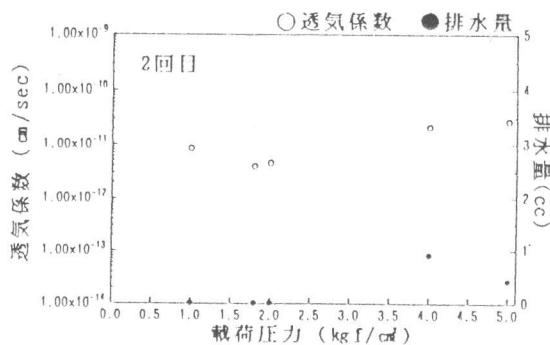


図-4 飽和透気試験結果
(2回目のガス圧载荷: 1.0 ~ 5.0 kgf/m²)

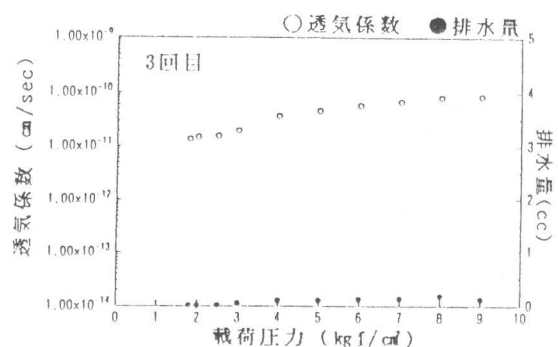


図-5 飽和透気試験結果
(3回目のガス圧载荷: 1.8 ~ 9.0 kgf/m²)

4. 飽和モルタルの透気メカニズム

4.1 既往の研究における不飽和モルタルの透気メカニズム

前述したように、既往の研究ではコンクリートおよびモルタルを用いた透気試験は主に不飽和状態で行われている。これらの既往の研究で、透気メカニズムまで言及しているものはわずかである。この中で、氏家、長瀧らは実験結果[2]に基づき、ガスはコンクリート中にある気みちを

通って抜けるという透気メカニズムを提案して図-6に示すようなモデルを考え、この場合の透過率は式(3)で表されるとしており、式(2)で定義される透気係数とコンクリートの空隙に関する定数 ϵd^2 の関係は、図-7に示すように相関関係があることを示している。

$$K = A \cdot \epsilon \cdot d^2 \quad (3)$$

ここで、K：多孔体の透過率

ϵ ：多孔体の空隙率

$$\text{空隙率} = \frac{\text{蒸発した水分の体積}}{\text{コンクリートの全体積}}$$

d：多孔体の流管の半径（毛細管空隙の平均半径），A：定数

4. 2 飽和モルタルの透気メカニズム

試験の結果から、飽和モルタルからガスが透気するには、モルタルから排水される水と密接な関係があることがわかる。すなわち、ガスの透気がなくとも排水は認められ、ガス透気が見られた後、排水量が急に増える傾向にある。また、排水量が最大値を示した後の透気係数は除々に大きくはなっているものの、その程度は排水量の値が最大値を示す前と異なり、小さくなる傾向にある。飽和モルタルのこのような透気挙動について、筆者らは、次のように考えた。不飽和であれば最初からガスが透気する気みちが存在しているが、飽和状態であることから、ガスを透気させるに十分な気みちは水で満たされている。そのため、まず作用するガス圧によって、気みちに存在する水が押しだされる。この間は、気みちの流管径に応じた表面張力により、比較的大きな気みちに存在する水から押し出され、圧力の上昇にともない、水が押し出される気みちが増えて、除々に透気量も増加してくる、つまり、透気係数に圧力依存性が見られる領域である。次に、流入するガスを透気させるに十分な量の気みちが形成されれば、透気係数は圧力に関わらずほぼ一定の領域になると考えられる。この領域が、氏家、長瀧ら試験・提案したモデルで説明できるものと考えられる。

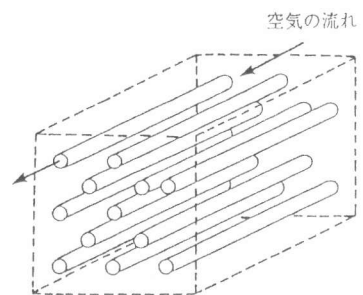


図-6 モデル図[3]

つまり、この圧力依存性がなくなるということは、図-7に示すように ϵd^2 によって定義される空隙に関する定数が同じであれば各々のW/Cにおける透気係数に大きな差はないということを示されている。そのため、筆者らは、本試験に供する飽和モルタルの透気メカニズムを次のように解釈した。その概略は図-8に示す通りである。

- ①作用したガス圧により、気みち中の水が排水される。この時、気みちの直径に応じた表面張力が気液界面に作用するため、比較的大きな気みちから順に排水され、その気みちから脱水されてから、ガスが透気する。
- ②ガスの透気が確認されても、気みちに飽和されている水の

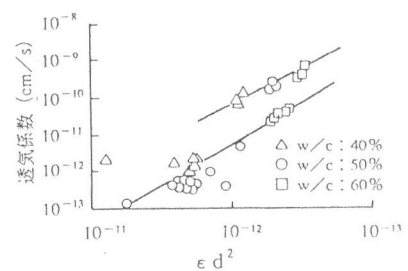


図-7 コンクリートの透気係数 ϵd^2 [3]

脱水は、各々の気みちの気液界面に生じる表面張力に依存することから、流入するガス量を十分に透気させられる量の気みちが形成される間は、透気量は圧力が増加する毎に多くなる。すなわち、透気係数に圧力依存性が見られる領域がある。

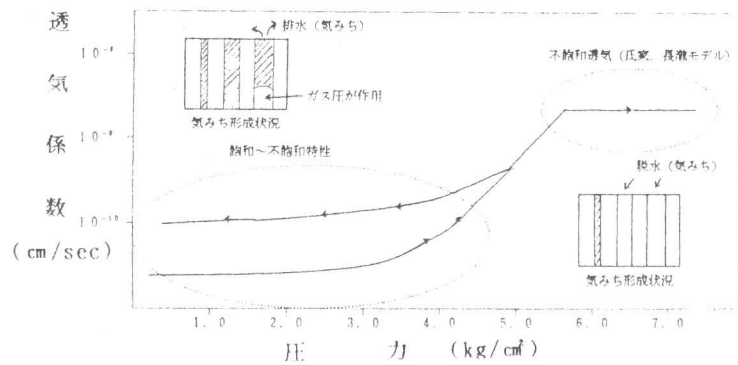


図-8 飽和モルタルの透気特性

- ③ガス圧を十分に上げて、流入するガス量を透気するに十分な気みちが形成されれば、ガス圧に関わらず透気係数はほぼ一定となる。この領域から、氏家らが提案したモデルで説明できる透気メカニズムの領域となると考えられる。

5. まとめ

水セメント比が270%と、大きなモルタルを用いて飽和状態からの透気試験を実施し、その透気メカニズムに関して、以下のような知見を得た。

- ①ガス圧により気液界面に作用する表面張力が比較的小さく、径の大きな間隙中の水をガスが押し出していく。この時、圧力が作用している面と対象の面から間隙水が排水される。
- ②間隙中の水が全て排水、すなわち脱水されてからガスが透気し、気みちが形成される。
- ③流入されるガス量を透気するに十分な気みちが形成されるまで、脱水現象が継続される。この間は、透気係数に圧力依存性が認められる。
- ④透気に十分な気みちが形成されると、既往の研究で提案されているモデルで透気メカニズムは説明でき、この時透気係数に圧力依存性は見られない。

今後は、飽和状態からのモルタルの透気メカニズムを定量的に評価していくために、モルタルの細孔径と供試体飽和度との関係を検討する予定である。

謝辞

本研究を進めるに当たり貴重なご指導を戴いた愛媛大学氏家博士に感謝致します。

参考文献

- [1] Neretnieks, I : Some Aspects of the use of iron canisters in deep lying repositories for nuclear waste, Nagra Technical report, 1985
- [2] 長瀧重義、氏家勲、荒木淳：コンクリートの透気性に影響を及ぼす諸要因、セメント技術年報 39、pp209-212、1985
- [3] 氏家勲：コンクリートの透気係数の定量的検討と密実性評価への適用に関する研究、学位論文、1994.10
- [4] 深沢栄造、栗原宏武、戸田尚旨：ソイルモルタルの長期安定性に関する室内試験例、第22回土質工学研究発表会、pp1941-1944、1987