

細孔空隙構造からのコンクリートの各種特性の形成機構に関する検討

橋 田 浩
(技術研究所)

§1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物に要求される最も重要な特性は、設計基準を満たす強度と期待する耐用年数を満足する耐久性といえる。コンクリートの強度は主に水セメント比に依存するが、耐久性に関わる流体や塩化物イオンの浸透抵抗性についても、使用材料や調合に左右されるものの、やはり水セメント比の影響が大きい。そのため、コンクリートの強度が高いほど浸透抵抗性も優れているのが一般的である。また、耐久性を左右するもう一つの重要な特性に収縮ひび割れ抵抗性がある。収縮ひび割れ抵抗性は、コンクリートの引張り強度、クリープ特性、鉄筋との付着特性などにも影響されるが、コンクリートの乾燥収縮量に依存するところが大きい。乾燥収縮量は単位セメントペースト量が多いほど大きくなり、水セメント比45%程度以上の普通コンクリートでは、単位水量が一定であれば強度が高いほど若干大きくなるようである¹⁾。また一方で、より低水セメント比の高強度コンクリート領域まで含めると、単位セメントペースト量当たりの収縮量は圧縮強度に依存し、単位水量が一定の場合、強度が高くなるほど収縮量は小さくなることが報告されている²⁾。以上のように、一般論としては強度と浸透抵抗性、乾燥収縮量には密接な関係がある。

しかしながら、実構造物コンクリートを考えた場合、これらの特性は水セメント比や調合だけではなく、構造物の設計条件、施工の良否、養生環境条件など多くの影響因子に依存する。上記の関係は実験室レベルで標準的に作製されたコンクリートの特性についてのものであり、例えば、養生環境が異なる場合にもその関係が成立するとは限らない。そのため、各種の特性を強度だけで判断し、耐久性を過大評価する場合も考えられる。したがって、実構造物の各種特性、および特性間の関係を評価するために

は、コンクリート特性の形成機構を適切に把握することが不可欠と考えられる。その手段として、材料設計の観点から近年行われるようになった、水和物ならびに微細構造のキャラクターを分析し、あるいは微細構造形成モデルを導出し、それらの結果とセメント硬化体特性とを定量的に関係づけようとする手法が応用できる。特に、細孔空隙構造がコンクリートの各種特性と密接に関係することはこれまでの多くの研究で示されている^{2)~6)}。

以上の背景から、本研究は、非標準的な領域まで含めた多様な細孔空隙構造を有するコンクリートを対象にし、細孔空隙構造とコンクリートの各種特性の関係を検討することで、コンクリート特性の形成機構をより適切に明らかにすることを目的としている。検討するコンクリート特性としては、圧縮強度、中性化および乾燥収縮を取り上げ、それらの特性間の関係についても考察を加える。多様な細孔空隙構造を有し、かつ試験期間中その構造変化の少ないコンクリートを作製するために、水セメント比55%および30%の普通および高強度コンクリートを用い、養生初期にコンクリートを強制的に乾燥させて含水量に変化を持たせ、その後所定の材齢まで封かん養生する方法を用いた。この養生方法は特殊ではあるが、養生初期に乾燥を受けやすいコンクリート部材やコンクリート表層の特性を理解する上でも役立つと考えられる。

§2. 実験概要

2.1 供試体

本研究で対象とした供試体の調合は、水セメント比55%、スランプ18cm、空気量4.5%の一般的なAEコンクリート（以下、NAEシリーズ）、その調合からAE減水剤を除いた水セメント比55%のプレー

使用材料	種類	物性および成分、その他
セメント	普通ポルトランドセメント	日本セメント
細骨材	砂（浜岡産）	比重2.59 吸水率1.50 粗粒率2.75
粗骨材	砕石（青梅成木産）	比重2.65 吸水率0.60 粗粒率6.75 実績率59.4
化学混和剤	AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物ポリオール複合体
	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系（特殊アニオン系高分子界面活性剤）

表-1 使用材料

シリーズ	W/C %	s/a %	kg/m ³				AE減水剤 cc	高性能AE 減水剤 C×%
			W	C	S	G		
NAE	55	45.5	182	331	787	965	828	
NP	55	45.5	188	341	812	995		
H	30	41	165	550	681	1002		1.35

表-2 コンクリートの割合

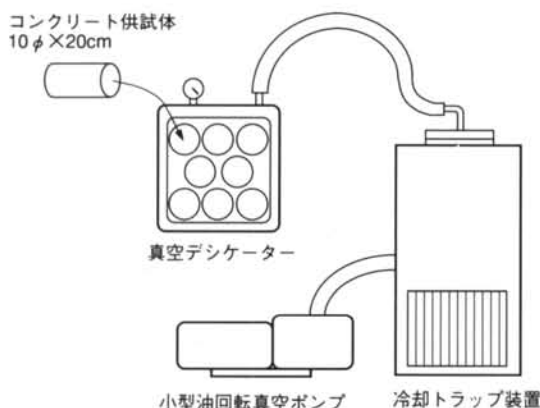


図-1 真空乾燥装置

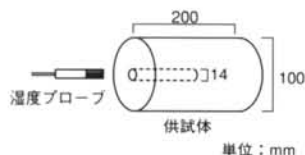


図-2 内部空隙温度の測定

ンコンクリート（以下、NPシリーズ）および水セメント比30%、スランプ23cm、空気量2%の高強度コンクリート（以下、Hシリーズ）の3種類とした。これらのコンクリートに使用した材料は減水剤以外は同一のものとした。使用材料を表-1に、各割合を表-2に示す。

供試体は全てφ100×200mmの軽量スチールモールドを用いて作製した。供試体は打込み直後から専用のゴムキャップで水分逸散がないように封かんし、所定の材齢で脱型、乾燥し、含水量を4～5種類（無乾燥を含む）に調整した後、材齢28日まで再び封かん養生するものとした。乾燥には4時間以内の短時間で所定の水分量が逸散するように、図-1に

示す真空乾燥装置を用いた。真空乾燥を行う材齢は、NAEは材齢1日または2日、NPは材齢2日のみ、Hは材齢0.5日または1日とし、供試体の含水量は質量変化で管理した。このような乾燥と養生方法により、材齢28日において表面部から内部まで全体がほぼ均一で、かつ多様な細孔空隙構造を有する供試体を得ることができた。なお、養生温度は原則として全期間20℃一定としたが、真空乾燥により供試体は一時的に温度が低下し、4時間の真空乾燥の場合0℃前後にまで低下した。

2.2 水分量の測定

供試体は所定の養生終了後、材齢28日で含水率および結合水量（水和によりセメントと化学的に結合した水量で、完全水和の場合セメント重量の25%程度の水量となる）、内部空隙湿度を測定した。含水率は供試体を110℃で絶乾にすることで求めた。単位容積あたりの結合水量は、初期供試体質量と110℃で絶乾にした供試体質量の差を蒸発可能水量と考え、練混ぜ時の単位水量（骨材含水量を含む）から単位蒸発可能水量を差し引いて求めた。内部空隙湿度は、中心部にφ14×80mmの孔を有する供試体を別途作製し、その孔に湿度プローブ（ヴァイサラ社製HMP35B、湿度指示計はHMI36）を挿入することで測定した（図-2）。

2.3 圧縮強度試験

供試体は材齢28日で圧縮強度を測定した。また、参考値として、試験材齢まで乾燥することなく封かん養生を継続した材齢3日（NPシリーズのみ2日）、7日の供試体についても同様に圧縮強度を測定した。供試体の載荷面は試験当日に研磨し、圧縮試験まで2～3時間湿潤状態を保った。圧縮強度は3体の平均値とした。なお、圧縮強度試験時に各供試体のヤング係数も併せて測定した。

2.4 促進中性化試験

供試体は材齢28日で前養生を行い、その後促進中性化試験を行った。促進中性化試験までの前養生は

20℃、60%RHの環境で1週間乾燥させるものとした。促進中性化試験の環境条件は、20℃、60%RH、CO₂濃度3%とした。中性化深さの測定は、促進中性化開始後1週、4週、13週で各2体ずつ供試体を取り出し、割裂した後、割裂面に1%フェノールフタレインエタノール溶液を噴霧し、翌日赤色域までの中性化深さを測定した。Hシリーズの供試体では赤色域の境界が明確でなかったため、明瞭な赤色となる位置までを中性化深さとした。

2.5 乾燥収縮試験

乾燥収縮ひずみは、コンクリート打込み時に100mm間隔の測定プラグを側面に予め埋め込んだ供試体を用い、コンタクトゲージで測定した。供試体は材齢28日まで所定の養生を行い、その後20℃、60%RHの乾燥環境に曝露した。ひずみ測定は、脱型時および材齢28日で行い、乾燥開始以後は随時測定するものとした。供試体の収縮ひずみは2体の平均値とした。収縮ひずみ測定と同時に供試体の質量測定および内部空隙湿度の測定を行った。内部空隙湿度測定用の供試体は、湿度測定時以外はプローブ挿入孔をゴム栓でシールしておき、他の供試体と同様に乾燥させた。

2.6 細孔空隙量分布の測定

細孔空隙量分布の測定試料は、各試験項目毎に材齢28日で1供試体を砕いて2.5~5mmのモルタルサンプルとし、採取後アセトン洗浄およびD-乾燥したものを用いた。細孔空隙量分布は、水銀圧入ポロシメーター（島津製作所社製オートポア）により、細孔直径300~0.003μmの範囲で測定した。

§3. 実験結果

3.1 フレッシュコンクリート

練り上がりにおける各コンクリート試料のフレッシュデータを表-3、表-4に示す。表-3は圧縮強度および促進中性化試験用の試料の平均値を示している。表-4は乾燥収縮試験用の試料の値であり、骨材性状が変化するため調合を若干修正したが、NPシリーズのスランブ、Hシリーズの空気量は上記2試験用の試料よりかなり大きな値となっている。このため、後述する圧縮強度と乾燥収縮ひずみの比較検討のために、同一試料から圧縮強度試験用の供

シリーズ	スランブ (cm)	スランブ フロー (cm)	空気量 (%)	単位容積 質量 (g/cm ³)	28日圧縮 強度 (MPa)
NAE	17.0	—	5.0	2.26	36.7
NP	8.0	—	1.0	2.36	43.8
H	22.5	42.0	1.6	2.42	92.1

表-3 フレッシュデータ：圧縮強度、中性化試験用

シリーズ	スランブ (cm)	スランブ フロー (cm)	空気量 (%)	単位容積 質量 (g/cm ³)	28日圧縮 強度 (MPa)
NAE	18.5	—	5.6	2.26	37.3
NP	12.0	—	1.8	2.33	41.4
H	23.0	40.0	3.6	2.37	80.0

表-4 フレッシュデータ：乾燥収縮試験用

供試体種類		真空乾燥	28日材齢		
シリーズ	養生 種類	水分逸散率 (wt%)	含水率 (wt%)	空隙湿度 (%RH)	結合水量 (m ³ /m ³)
NAE	28S	0.0	6.2	97.6	0.066
	1DS-1	0.3	5.8	97.2	0.066
	1DS-2	0.7	5.7	97.0	0.062
	1DS-3	1.2	5.3	96.6	0.063
	1DS-4	1.8	4.7	95.3	0.062
	2DS-1	0.3	6.0	97.2	0.065
	2DS-2	0.6	5.7	96.9	0.066
	2DS-3	0.9	5.4	96.8	0.066
NP	2DS-4	1.2	5.1	96.2	0.065
	28S	0.0	6.1	97.1	0.072
	2DS-1	0.3	5.9	96.9	0.072
	2DS-2	0.6	5.6	96.6	0.072
	2DS-3	0.8	5.5	96.2	0.070
H	2DS-4	1.1	5.1	95.8	0.071
	28S	0.0	4.3	87.8	0.083
	0.5DS-1	0.4	4.1	86.7	0.079
	0.5DS-2	1.0	3.8	86.1	0.073
	0.5DS-3	1.8	3.1	84.5	0.065
	1DS-1	0.4	4.1	87.8	0.082
	1DS-2	0.6	3.9	86.5	0.081
	1DS-3	0.9	3.7	86.3	0.078

28S：28日封かん養生

nDS：材齢n日で含水率調整し、その後28日まで封かん養生

表-5 圧縮強度、中性化試験用供試体の水分量

試体も作製した。

3.2 水分量

表-5に圧縮強度および促進中性化試験に用いた各供試体の水分逸散率、材齢28日における含水率、内部空隙湿度および結合水量のデータを示す。水分逸散率とは打込み時の供試体質量に対する真空乾燥での水分逸散量の比率である。養生初期の水分逸散に対応して含水率は低下しているものの、材齢0.5日で真空乾燥したHシリーズ（H0.5DS）を除き、水分逸散に対応する結合水量の低下はそれ程認められない。これらの結果は、養生初期にある程度の水分逸散があっても内部空隙が高湿度を維持している場合は水和反応への影響は小さいことを示しており、

供試体種類		真空乾燥	28日材齢		
シリーズ	養生種類	水分逸散率 (wt%)	含水率 (wt%)	空隙湿度 (%RH)	結合水量 (m^3/m^3)
NAE	28S	0.0	6.3	97.6	0.066
	1DS	1.6	4.8	95.5	0.062
	2DS	0.9	5.3	96.4	0.065
NP	28S	0.0	6.3	97.7	0.069
	2DS	1.1	5.3	96.5	0.066
H	28S	0.0	4.3	87.8	0.083
	0.5DS	1.8	3.1	83.9	0.067
	1DS	0.9	3.7	86.5	0.081

28S：28日封かん養生

nDS：材齢n日で含水量調整し、その後28日まで封かん養生

表一 6 乾燥収縮試験用供試体の水分量

Powersらの報告⁷⁾と合致している。表一 6 は、乾燥収縮試験に用いた各供試体の水分量のデータを示している。乾燥収縮試験では各材齢での真空乾燥による水分逸散供試体は1種類のみとしている。

3.3 圧縮強度

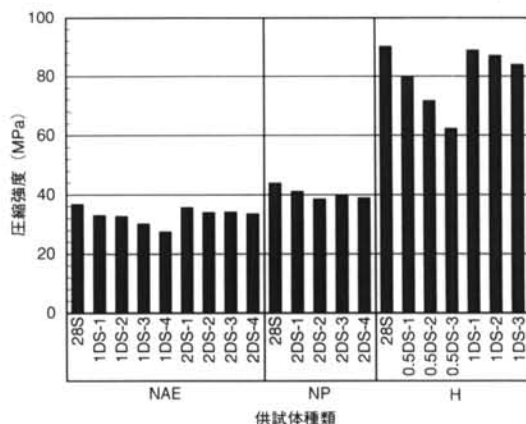
図一 3 に圧縮強度試験結果を示す。全体の傾向としては、水分逸散に対応して圧縮強度は低下している。しかし、NAEシリーズでは材齢1日 (NAE 1DS)、Hシリーズでは材齢0.5日 (H0.5DS) に真空乾燥した供試体で水分逸散に対応する強度低下が明確であるものの、NAEおよびNPシリーズの材齢2日 (NAE 2DS, NP 2DS)、Hシリーズの材齢1日 (H 1DS) になると水分逸散に対応する強度低下は小さい。養生初期の乾燥による強度低下は、より若材齢時に乾燥を受けた場合に顕著になるといえる。

3.4 促進中性化深さ

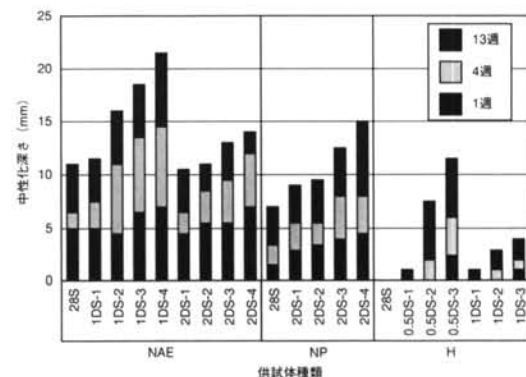
図一 4 に促進中性化試験の結果を示す。圧縮強度に比べ、水分逸散に対応する中性化深さの増大が顕著である。通常、水セメント比30%のコンクリートでは中性化はほとんど生じないが、養生初期の乾燥が著しい供試体 (H0.5DS3) では水セメント比55%の封かん養生供試体 (NAE28S) 程度の中性化が生じている。

3.5 乾燥収縮ひずみ

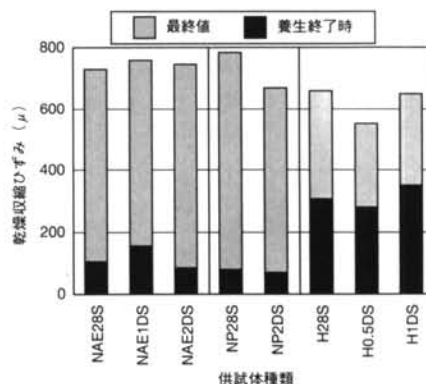
図一 5 に乾燥収縮試験の結果を、材齢28日の養生終了時のひずみと乾燥開始後6カ月の最終的なひずみとに分けて示す。ひずみ測定は、NAE、NPシリーズでは材齢1日、Hシリーズでは材齢0.5日としており、それ以後養生終了時までのひずみは自己収縮ひずみと呼ばれるもので、セメントの水和



図一 3 圧縮強度試験結果



図一 4 促進中性化試験結果



図一 5 乾燥収縮試験結果

に伴って生じるひずみである。以下、自己収縮ひずみも乾燥収縮ひずみの一部と考えて議論を進める。封かん養生供試体と比較すると、Hの養生終了時の収縮ひずみは、NAE、NPに比べ約3倍となり、自己収縮ひずみが多い。しかし、その後乾燥を開始してからHのひずみ増加は逆に小さく、最終的な

乾燥収縮ひずみもHの方が小さくなっている。水分逸散のある供試体の乾燥収縮ひずみは、封かん養生供試体と比較すると同等あるいはやや小さい結果となっている。

図-6に供試体の内部空隙湿度変化および質量変化と乾燥収縮ひずみの関係を示す。質量変化の基準は脱型時としている。質量変化、すなわち脱水量とひずみの関係は供試体毎に全く異なるが、空隙湿度とひずみは、H0.5DSを除き、全ての供試体がほぼ同一の関係にあり、乾燥収縮ひずみが空隙湿度に強く依存しているのがわかる。

3.6 細孔空隙量分布の測定結果

図-7に材齢7日、28日の封かん養生供試体（7S, 28S）および水分逸散のある供試体の代表的な細孔空隙量分布（ $\Delta V / \Delta \log D$, V =細孔空隙量, D =細孔直径）を示す。NAEシリーズでは、1DSの供試体は直径 $5 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 、2DSの供試体は直径 $1 \sim 0.1 \mu\text{m}$ の細孔量が28Sよりかなり多くなっており、水分逸散量が多い供試体ほど、また、より若材齢で水分逸散がある供試体ほど細孔空隙構造の密実化が阻害されている。NP, Hシリーズについても、材齢の進行に伴う細孔構造の密実化、および水分逸散量と細孔構造の関係はNAEシリーズと同様のことがいえる。ただし、Hシリーズでは材齢の進行に伴う細孔構造の密実化が速く、細孔構造が大きく異なっているのは材齢0.5日で真空乾燥した場合（H0.5DS-3）であり、材齢1日（H1DS-3）ではその差異は小さい。

§4. 考察

4.1 細孔空隙構造と圧縮強度の関係

図-8に有効細孔空隙量と圧縮強度の関係を示す。ここで有効細孔空隙量とは、細孔空隙量を測定試料中の硬化セメントペースト重量（セメント重量+結合水量）割合で除した値である⁴⁾。また、細孔空隙量としては細孔直径 $5 \sim 0.05 \mu\text{m}$ または $5 \sim 0.004 \mu\text{m}$ の範囲における空隙量を用いている。これは、水セメント比40%以上のコンクリートの場合、その強度は骨材とセメントペースト界面の $0.05 \mu\text{m}$ 以上の粗大径からなる遷移帯の影響が支配的であること⁵⁾、および測定結果から $5 \mu\text{m}$ 以上の空隙は粗大エントラップドエアまたはエントレインドエアに

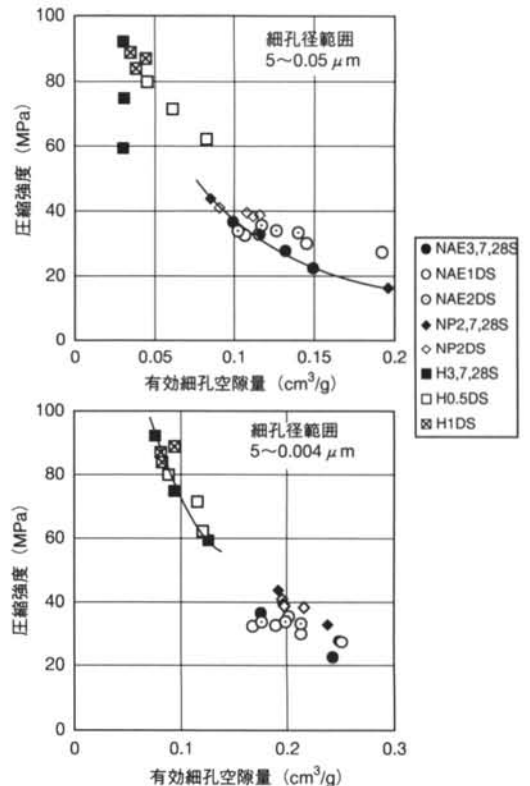


図-6 内部空隙湿度および質量変化と乾燥収縮ひずみの関係

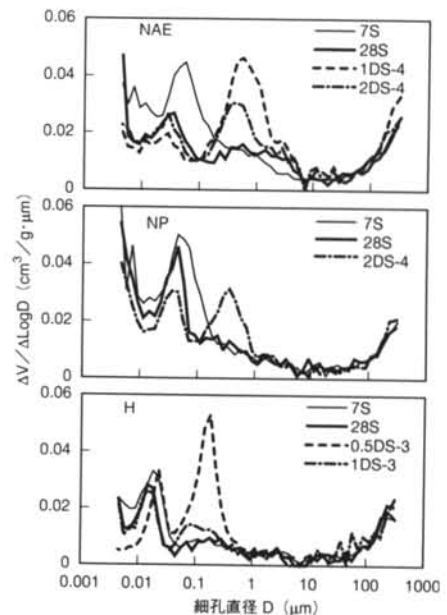


図-7 細孔空隙量分布

相当すると考えられることから、直径 $5 \sim 0.05 \mu\text{m}$ の毛細管空隙のみを対象にしたためである。また、

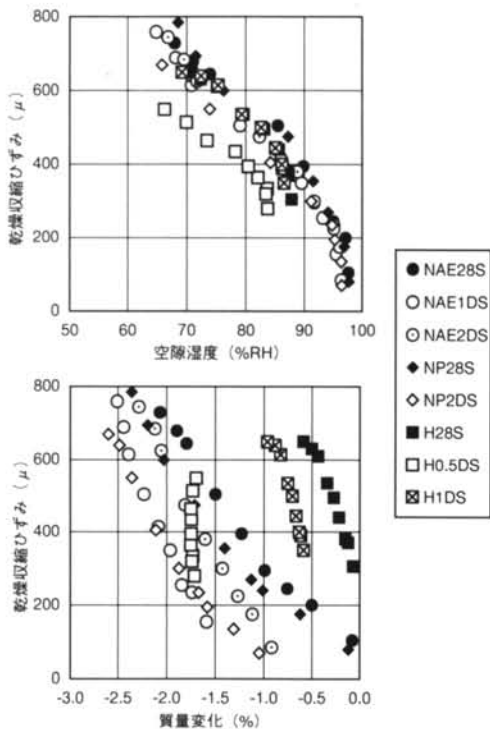


図-8 有効細孔空隙量と圧縮強度の関係

水セメント比40%以下の高強度コンクリートの場合、遷移帯はほとんど形成されないため、より小径まで含めた細孔空隙量と強度の相関が高いこと⁵⁾、および測定結果から $0.004\mu\text{m}$ 以下の部分はゲル空隙に相当すると考え、直径 $5\sim0.004\mu\text{m}$ の全毛細管空隙を対象にしたためである。

NAEおよびNPシリーズの封かん養生供試体（黒塗り記号）だけについてみると、細孔直径範囲 $5\sim0.05\mu\text{m}$ からなる有効細孔空隙量と圧縮強度は良い対応を示している。しかしながら、水分逸散させた供試体（白抜き記号）はその関係から外れており、封かん養生供試体に比べて多量の粗大空隙を有するにも拘わらず強度低下は小さい。この理由としては、強度を支配する遷移帯の実際の空隙量は水分逸散の有無によらず供試体間で差がなく、水分逸散のある供試体には遷移帯（骨材界面）以外のセメントペースト部分に分散している空隙量割合が多くなり、その空隙の強度への影響は二次的であることが考えられる。例えば、封かん養生供試体の測定空隙量は遷

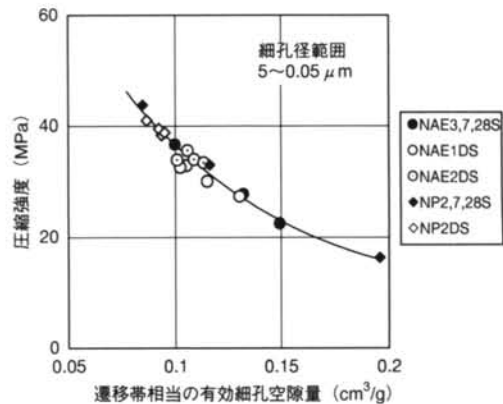


図-9 遷移帯相当の有効空隙量と圧縮強度

移帯を形成している空隙量とみなし、水分逸散のある供試体については、測定空隙量から封かん養生供試体の空隙量を差し引いた部分がセメントペースト部分に分散している空隙量と考え、その空隙量の $1/3$ の量として計算した細孔空隙量（遷移帯相当の有効細孔空隙量）と圧縮強度の関係を示せば図-9の通りとなり、良い対応を示すようになる。

一方、Hシリーズについては、水分逸散させた供試体も含め、細孔直径範囲 $5\sim0.004\mu\text{m}$ の有効細孔空隙量と圧縮強度の相関が高く、遷移帯のある普通コンクリートに比べ細孔空隙量で強度を良く説明できるといえる。ただし、今回の検討ではコンクリート種類が非常に限られていることから、多種類のコンクリート強度を有効細孔空隙量および遷移帯という概念で一律に説明できるかどうかは今後さらに検討を要すると思われる。

4.2 細孔空隙構造と促進中性化の関係

図-10に直径 $5\sim0.05\mu\text{m}$ の範囲における細孔空隙量と促進中性化13週における中性化深さの関係を示す。小径側の直径を種々変化させて比較検討したが、直径 $5\sim0.1\mu\text{m}$ あるいは $5\sim0.05\mu\text{m}$ の範囲の空隙量とした場合に水セメント比、水分逸散の有無によらず全ての供試体で良い対応関係が得られた。これは、中性化は直径 $0.075\mu\text{m}$ 以上の細孔空隙量と相関が高いとする報告⁶⁾とほぼ同様の結果となっている。このような現象は、中性化が CO_2 分子のコンクリート中への拡散を前提条件に成立するとすれば、気体分子の移動メカニズムから主に説明できると考えられる。すなわち、普通の気体の平均自由行程（1個の分子が他の分子に衝突する間に自由に運

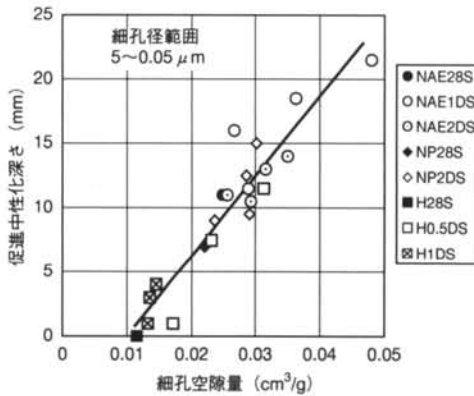


図-10 細孔空隙量と中性化深さの関係

動しうる平均距離)は常温常圧で $0.1\mu\text{m}$ 前後であり⁸⁾、それより小さい毛細管を気体が通過する確率は非常に小さいためである。

また、供試体H28Sは中性化が全く進行しなかったことから、この供試体では $0.05\sim 0.1\mu\text{m}$ 以上の細孔空隙は連続していないことが考えられる。水銀圧入ポロシメータのデータ特性から、空隙量が急速に増加し始める径(しきい径)が細孔空隙が連続性を有するようになる径であると考えられている⁹⁾。図-7より、H28Sの場合その直径は $0.05\mu\text{m}$ 以下であると考えられ、先の根拠と合わせて中性化が全く進行しないことが説明できる。

4.3 細孔空隙構造と乾燥収縮ひずみの関係

一般には、中高湿度領域における乾燥収縮ひずみは、細孔空隙中に液相の水が残存し、その毛細管張力が原因で発生すると考えられている。図-11にセメントペースト硬化体の毛細管張力と発生するひずみを関係づけるのに有効と考えられる式を示す。多孔体の微小要素に毛細管張力により発生するひずみは、L'Hermiteによれば毛細管空隙中の水圧、体積含水率、および弾性係数から求まる¹⁰⁾。毛細管空隙中の水圧は、Laplaceの式より、液水が存在する毛細管空隙の最大径に関係づけられる。さらに、液水が存在する毛細管空隙の最大径は、Kelvinの式より、平衡する相対湿度に関係づけられる。したがって、多孔体の収縮ひずみは、相対湿度、体積含水率および弾性係数より求めることが可能となる。これらの式より、材齢28日、空隙湿度90, 80, 70% RHにおける各コンクリート供試体の乾燥収縮ひずみを計算し、実測ひずみとの比較を示したのが図-

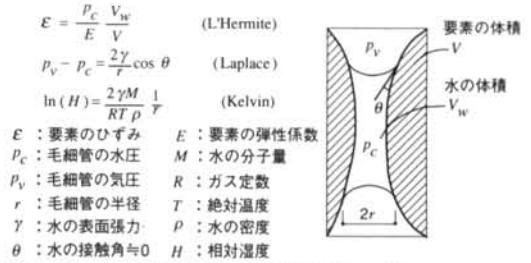


図-11 微小要素における毛細管張力とひずみのモデル

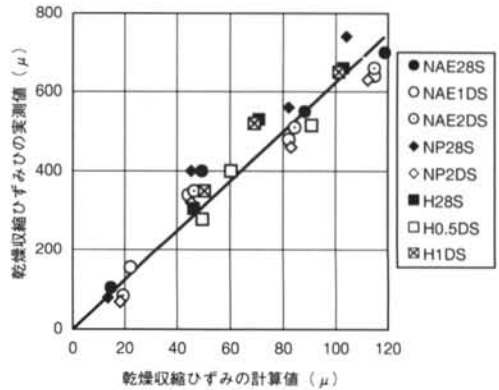


図-12 乾燥収縮ひずみの計算値と実測値

12である。計算に際し、空隙湿度90, 80, 70% RHにおける供試体の体積含水率は、Kelvin式で定まる材齢28日における空隙径から各空隙湿度における空隙径までの範囲における細孔空隙量から単位コンクリート容積当たりの含水量減少を計算し、材齢28日の体積含水率から差し引いて求めた。また、弾性係数は測定したコンクリートのヤング係数をそのまま用いた。計算値は実測値の約1/6の値となっているが、両者の相関は高い。計算値が小さい理由としては、クリープを考慮していない、関係式の骨材を含む不均一な材料であるコンクリートへの適用性の問題、微小空隙要素の弾性係数をコンクリートのヤング係数で代用させている問題などが考えられるが、現時点では不明である。しかしながら、以上のような毛細管張力によるひずみ発生機構により、多様な細孔空隙構造を有する供試体の乾燥収縮ひずみの増加傾向を概略説明できると思われる。

4.4 各種特性の対応関係

図-13に圧縮強度と中性化深さの関係を示す。和泉らは、強度の逆数と中性化速度は水セメント比、養生条件によらず直線関係にあると報告しているが

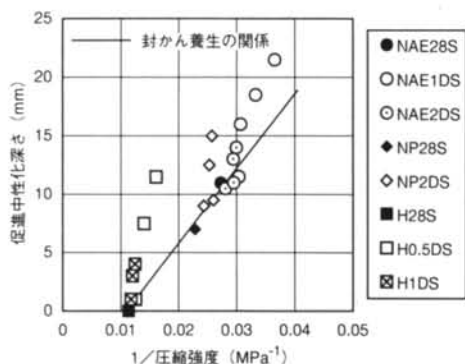


図-13 圧縮強度と中性化深さの関係

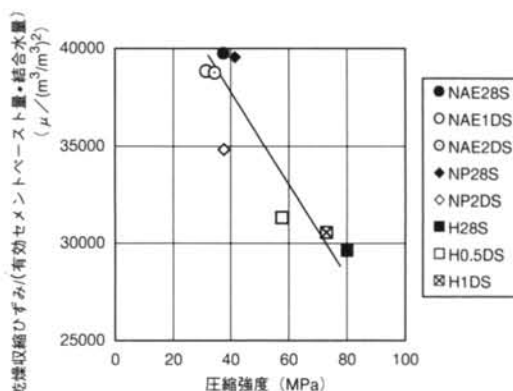


図-15 圧縮強度と乾燥収縮ひずみ/(有効セメントペースト量・結合水量)の関係

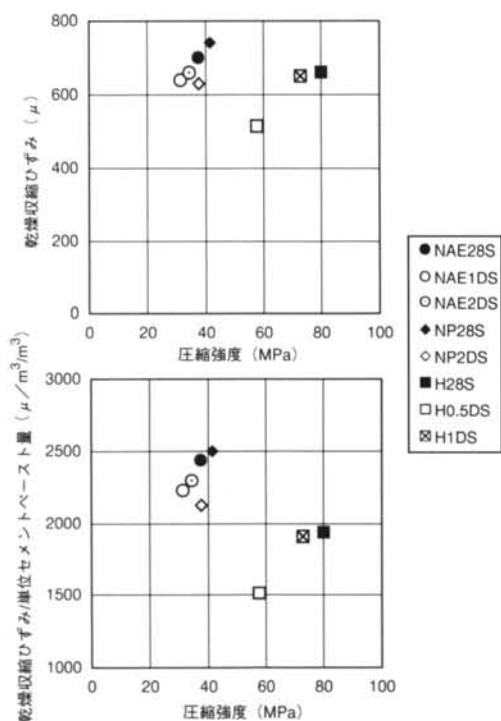


図-14 圧縮強度と乾燥収縮ひずみ、乾燥収縮ひずみ/単位セメントペースト量の関係

11)、本実験のように養生初期に水分逸散がある場合には、強度と中性化特性の関係は相関性を失うことがわかる。これは、これまでに述べた細孔空隙構造と圧縮強度および中性化特性との関係から必然的なものである。すなわち、普通強度レベルのコンクリートの場合、両特性と相関の高い細孔空隙径範囲は似通っているが、圧縮強度には遷移帯に含まれる空隙量の影響が特に強いこと、高強度レベルのコン

クリートの場合、両特性と相関の高い細孔空隙径範囲が異なることに起因する。今回の結果および考察から、細孔空隙構造変化によるコンクリートの高強度化は必ずしも耐中性化向上に繋がるとは言えないが、耐中性化向上は圧縮強度も高める効果があるといえる。

次に、図-14に圧縮強度と乾燥収縮ひずみ、圧縮強度と乾燥収縮ひずみ/単位セメントペースト量の関係を示す。ここで乾燥収縮ひずみは、乾燥期間の最終値ではなく、空隙湿度が70%RHに達した時点における各供試体の乾燥収縮ひずみとしている。これは、最終的な乾燥収縮ひずみの考え方としては、供試体の空隙湿度が乾燥環境湿度に平衡する時点のひずみの方が統一性があり、今回の測定期間では、いずれの供試体もまだ65~70%RHの空隙湿度であり、乾燥環境湿度の60%RHに平衡していないための措置である。

先に述べた理由から、圧縮強度と乾燥収縮ひずみは単純には関係づけられないが、封かん養生供試体では、長滝らの指摘のように、乾燥収縮ひずみ/単位セメントペースト量は強度が高くなるほど小さくなっている²⁾。しかしながら、今回のように養生条件が異なる場合はその関係が成立しなくなる。そこで、空隙湿度70%RHの乾燥においては、毛細管張力を発生させる液水が残存する空隙はほぼゲル空隙に相当し、その空隙量は結合水量と密接に関係すること、および未水和セメント量は乾燥収縮に寄与しないと考えられることから、圧縮強度と乾燥収縮ひずみ/(有効単位セメントペースト量・結合水量)の関係を図-15に示す。ここで有効単位セメントペースト量とは単位セメントペースト量から単位未水

和セメント量を差し引いたものである。両者の対応はかなり良く、この関係から乾燥収縮の形成機構の理解が深まると思われる。乾燥収縮がこのような因子から成立するものであるとすれば、単位ペースト量および強度からの乾燥収縮ひずみの推定にはある程度の不確定要素が含まれることを認識する必要があるといえる。なお、水セメント比40%程度以下の高強度コンクリートの乾燥収縮ひずみが普通強度コンクリートより小さくなる傾向があるとすれば、結合水量に対して未水和セメント量が多いことが主な理由と考えられる。

§ 5. まとめ

本研究では、水セメント比55%の普通強度コンクリートおよび水セメント比30%の高強度コンクリートを用い、さらに養生初期に含水量を強制的に変化させて作製した多様な細孔空隙構造を有するコンクリートを対象にし、その各種特性の形成機構につい

て検討した。得られた知見をまとめると以下の通りである。

- 1) 普通強度コンクリートの圧縮強度は、直径 $5 \sim 0.05 \mu\text{m}$ の細孔空隙の内、主に骨材-セメントペースト界面の遷移帯を形成する空隙量に依存し、高強度コンクリートの圧縮強度は、遷移帯が形成されないで、全毛細管空隙量（直径 $5 \sim 0.004 \mu\text{m}$ の細孔空隙量）に依存する。
- 2) 中性化特性は、水セメント比によらず、直径 $0.05 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 以上の毛細管空隙量に依存し、さらに、その空隙の連続性に強く影響される。
- 3) 乾燥収縮ひずみは、コンクリートの空隙湿度、体積含水率、ヤング係数に基づいた毛細管張力によるひずみ発生モデルで概略説明できる。
- 4) 細孔空隙構造変化によるコンクリートの高強度化は必ずしも耐中性化向上に繋がらないが、耐中性化向上は圧縮強度を高める効果がある。
- 5) 乾燥収縮ひずみは、有効単位セメントペースト量（単位セメントペースト量-未水和セメント量）、結合水量および圧縮強度の関係からほぼ評価できる

<参考文献>

- 1) コンクリートの調査設計指針・同解説、日本建築学会、1994、p.47
- 2) 長滝、米倉：“高強度コンクリートの乾燥収縮及びクリープ特性”，コンクリート工学，Vol.20，No.4，April，1982，pp.75-87
- 3) P.K.Mehta：Concrete Structure, Properties, and Materials, PRENTICE-HALL, 1986
- 4) 吉野他：“空隙構造依存性に基づくコンクリート強度推定法に関する研究”，日本建築学会論文報告集，No.312，1982，pp.9-17
- 5) 羽原：“コンクリートの構造とその物性，わかりやすいセメント化学”，セメント協会，1993，pp.78-104
- 6) 鄭：“コンクリートの中性化に及ぼす影響要因に関する実験研究”，東北大学博士論文，1989
- 7) A.M.Neville：“コンクリートの特性，後藤、尾板 監訳”，技報堂出版，p.236，1979
- 8) 越山：物理化学（理論と計算）上，東海大学出版会，pp.252-253
- 9) F. A. L. Dullien：“Porous Media, Fluid Transport and Pore Structure 2nd ed”., Academic Press Inc., pp.11-13,
- 10) 近藤連一編著：“多孔材料”，技法堂，1973
- 11) 和泉他：“コンクリートの中性化に及ぼすセメントの種類・割合および養生条件の影響について”，第7回コンクリート工学年次講演会論文集，1985，pp.117-120

