

SQCの型枠存置期間が中性化速度に及ぼす影響

福 山 雅 典 山 本 和 範
渡 部 正

要 旨

土木学会では、強度不足によるひび割れの発生や表面がポーラスになって耐久性が低下することを避けるために、セメントの種類毎に標準的な型枠存置期間を定めている。普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートは5日、低熱ポルトランドセメントを使用したコンクリートは7日を標準としている。一方、自己充填型高強度高耐久コンクリート（以下SQC）は、コンクリートの発熱を低減するために低熱ポルトランドセメントを使用している場合が多いが、発現強度が脱型強度に達してもセメントの制約により型枠養生期間を7日より短縮することができない。そこで、本研究では型枠存置期間をパラメータとした促進中性化試験を実施し、型枠存置期間の短縮がコンクリート表面の耐久性能を低下させないことを確認することによって、SQCの型枠存置期間が普通コンクリート程度まで短縮可能なことを示した。

キーワード 低熱ポルトランドセメント／SQC／耐久性／型枠存置期間／中性化速度係数／細孔構造

目 次

- | | |
|---------|---------|
| 1. はじめに | 4. 実験結果 |
| 2. 実験概要 | 5. 考察 |
| 3. 実験方法 | 6. まとめ |

The influence which a difference in the pattern frame recuperation period toward
SQC gives to the resistance of the neutralization.

Masanori FUKUYAMA Kazunori YAMAMOTO
Tadashi WATANABE

Synopsis:

The formwork retention period is specified in the standard specification of Japan Society of Civil Engineers (JSCE) to avoid the lack of compression strength and the deduction of durability according to the kind of cement. It is 5 days for portland cement and 7 days for low heat cement. Super quality concrete (SQC) uses low heat cement in order to reduce the heat of concrete. Therefore, 7 days formwork retention period is required in spite of the enough strength for removing formwork. It was confirmed that the reduction of formwork retention period could not cause the deduction of durability of SQC by accelerated carbonating test. It is concluded that it is possible to reduce the formwork retention period of SQC as same as normal concrete.

1.はじめに

コンクリート構造物の施工において、型枠の早期脱型がコンクリートの品質に及ぼす影響は、強度不足によるひび割れの発生や表面がポーラスになって耐久性が低下することなどが考えられる。そこで、土木学会コンクリート標準示方書では、コンクリートの発現強度が型枠脱型強度に達することとコンクリートの耐久性能が失われないことを考慮して、セメントの種類毎に標準的な型枠存置期間を定めており、日平均気温が15℃の条件の場合、普通ポルトランドセメント（以下NPC）を使用したコンクリートは5日、混合セメントB種を使用した場合は7日、低熱ポルトランドセメント（以下LPC）を使用したコンクリートは7日を標準としている。なお、混合セメントB種やLPCがNPCより長く規定されているのは、LPCの一般的な凝結特性や強度発現特性がNPCよりも遅いことを考慮したためと考えられる。

ところで、自己充てん型高強度高耐久コンクリート（以下SQC）は、圧縮強度が60N/mm²以上の高強度領域のコンクリートであるが、コンクリートの水和発熱の低減を目的としてLPCを使用するが多い。SQCは単位セメント量が非常に多く、LPCを使用しても一般に普通コンクリートより強度発現が早い。しかし、現在のコンクリート標準示方書の制約によると、LPCを用いる以上は強度発現が十分であっても型枠存置期間は7日としなければならない。

本研究では、SQCの合理的な施工を実現するために、LPCを用いたSQCの耐久性能を明らかにすることによって、普通コンクリート並みに型枠存置期間を短縮することが出来ないか検討を試みた。

2.実験概要

(1) 検討方法

型枠存置期間が耐久性能を左右させる支配的な要因は、コンクリート表面のセメント水和進行が、型枠の脱型によるコンクリート表面の乾燥によって妨げられ、コンクリート表面付近の細孔構造の緻密さが失われることにあると考えられる。また、コンクリート表面部の細孔構造の緻密さはコンクリートの中性化抵抗性と密接な関係があり、細孔構造が緻密になれば中性化抵抗性も向上する。

そこで、本研究では、型枠存置期間とコンクリート表面部の細孔構造の関係を、型枠存置期間とコンクリートの細孔径分布の関係、および型枠存置期間と中性化速度の関係によって評価することとした。

(2) 供試体の種類

表-2.1に供試体の種類と型枠存置期間のパラメータを示す。SQCの供試体はLPCを用いた粉体系配合とし、水セメント比は34%とした。また、SQCとの比較のために水セメント比50%の普通コンクリートを作製したが、NPC、高炉セメントB種（以下BB）およびLPCの3種

類のセメントを用いることによって、セメントの違いによる細孔構造の差も把握することとした。

型枠存置期間のパラメータは、土木学会の標準値を含む1, 2, 5, 7日とした。

(3) 供試体の養生方法

表-2.2、図-2.1に各供試体の養生方法を示す。各供試

表 2.1 供試体の種類

記号	セメントの種類	コンクリートの種類	W/C (%)	型枠存置期間
L30	低熱ポルトランドセメント	SQC	34	1日、2日、5日、7日○
N50	普通ポルトランドセメント	普通コンクリート	50	1日、2日、5日○、7日
BB50	高炉セメントB種			1日、2日、5日、7日○
L50	低熱ポルトランドセメント			1日、2日、5日、7日○

※○は土木学会の標準値

表 2.2 コンクリートの養生方法

養生方法	脱型後のコンクリート養生方法	促進中性化試験開始材齢
標準養生	水中標準養生→恒温室で気中養生 (28日) (56日)	57日
気中養生	恒温室で気中養生 (28日)	29日
被膜養生	被膜養生剤塗布→恒温室で気中養生 (28日)	29日

※()はコンクリート材齢

表 2.3 被膜養生材

記号	タイプ	成分
A	浸透型	塩基性シリカ化合物
B	浸透型	水性シラン系

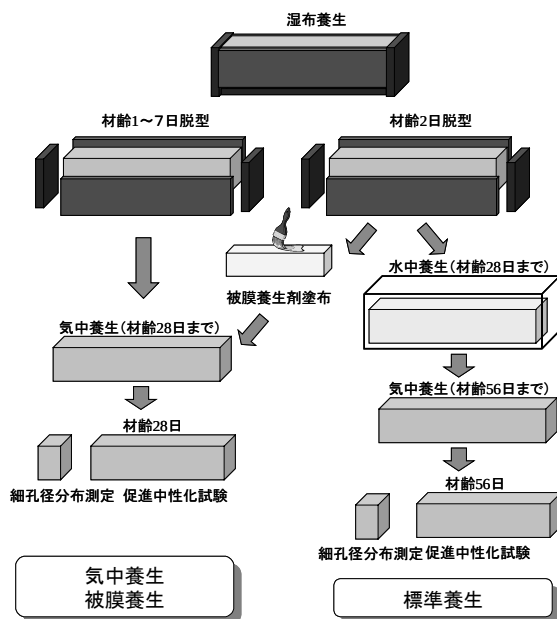


図 2.1 供試体の作製方法

体は、コンクリート打設から型枠脱型までの間を湿布養生し、所定の型枠存置期間で脱型した後は、材齢 28 日まで気温 20±2℃、湿度 60±5%の恒温室内で気中養生した。また、材齢 2 日で脱型した後、20±2℃の恒温水槽で 28 日間水中養生した供試体を標準養生供試体とした。なお、標準養生供試体は非常に理想的な養生条件と言えるが、型枠存置期間 28 日と仮定することが出来る。

また、早期脱型する際にコンクリート表面の耐久性を低下させない手段として、被膜養生剤の有効性についても併せて検討することとした。表-2.3 に実験に用いた被膜養生剤の仕様を示す。被膜養生剤は 2 種類選定したが、どちらも浸透型の被膜養生剤でコンクリート表面に不透水層を形成することで外部の劣化因子を遮断する効果がある。なお、被膜養生剤の供試体は、材齢 2 日で脱型した直後に、供試体の全面に養生剤を塗布した後、材齢 28 日まで恒温室内で気中養生した。

(4) コンクリート配合

表-2.4, 2.5 に各コンクリートの配合とコンクリートの基本性状を示す。なお、ここに示した圧縮強度は、強度測定材齢まで標準水中養生したものである。

コンクリートの練混ぜは、強制二軸練りミキサを用いて実施し、先に粉体と骨材を 15 秒攪拌した後、水を投入してから普通コンクリートは 60 秒、SQC は 90 秒間攪拌した。また、フレッシュ性状の測定に際して SQC は、高性能減水剤の特性を考慮して練り混ぜ後 5 分間静置した後に測定した。

3.実験方法

(1) 中性化速度の測定

中性化速度は、日本建築学会「高耐久性鉄筋コンクリ

ート造設計施工指針（案）・同解説 付 1.コンクリートの促進中性化試験方法（案）」に基づいた促進中性化試験を実施し、中性化試験材齢 4, 8, 13, 26 週における中性化深さの測定結果から算出した。なお、指針に示された促進中性化試験の条件は、温度 20±2℃、相対湿度 60±5%、炭酸ガス 5±0.2%である。

中性化深さの測定は、測定材齢毎に供試体を 60mm ずつ割裂し、フェノールフタレイン法によって測定した。また、中性化深さの測定精度を高める目的で、中性化の進行方向を供試体両側面方向に限定するため、供試体の上下面および両端面は試験開始前にエポキシ樹脂でシールした。

(2) 細孔径分布の測定

細孔径分布の測定は、水銀圧入法で実施した。水銀圧入法は、水銀の表面張力を利用して多孔体の細孔径分布を測定する方法として広く普及しており、ポロシメータを用いることによって測定できる。

細孔径分布の測定試料は、供試体の型枠面から表層 3cm 程度を切り出して作製する。切り出した試験片は、高温乾燥した後に粒径 5mm 程度に粉砕し、骨材を取り除いたモルタル分のみを測定する。なお、細孔径分布は促進中性化試験の開始材齢に測定した。

(3) 圧縮強度試験

コンクリートの圧縮強度は、各供試体と同条件で養生した圧縮試験供試体（φ100×200）を用いて測定した。また、各コンクリートの基本性状を把握するために、標準水中養生による圧縮試験供試体についても材齢 28, 56, 91 日で測定した（表 2.4, 表 2.5 の圧縮強度）。

表 2.4 SQC の配合

記号	セメント種類	水セメント比 w/c (%)	単位量 (kg/m ³)							試験結果					
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G		混和剤		スラップフロー (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)	圧縮強度 (N/mm ²)		
						G1 20~10	G2 10~5	Ad2 SP8SB	Ad4 MA775s				28日	56日	91日
L30	L	34	162	476	901	488	325	5.479	0.007	65.0×65.0	5.6	23.0	52.2	68.7	72.4

※高性能 AE 減水剤：レオビルド SP-8SP

表 2.5 普通コンクリートの配合

記号	セメント種類	水セメント比 w/c (%)	単位量 (kg/m ³)							試験結果					
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G		混和剤		スラップフロー (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)	圧縮強度 (N/mm ²)		
						G1 20~10	G2 10~5	Ad1 No.70	Ad3 MA303				28日	56日	91日
N50	N	50	159	318	799	633	422	0.795	0.013	11.0	4.6	21.0	38.1	42.1	45.5
L50	L	50	156	312	806	639	426	0.780	0.012	14.0	4.8	20.0	35.4	42.2	47.7
BB50	BB	50	158	316	797	632	421	0.790	0.013	13.0	4.4	21.5	30.1	47.4	52.4

※AE 減水剤：ポゾリス No.70

4.実験結果

4.1 中性化促進試験結果

図-4.1 に型枠存置期間と中性化速度係数との関係を示す。グラフ中の中性化速度係数(A)は、材齢26週までの中性化促進試験の結果を試験材齢(t(週))と中性化深さ(y(mm))との関係($y=A\sqrt{t}$)で直線回帰した傾きであり、中性化に対する抵抗性を示す指標として一般的に用いられている。また、標準養生した供試体は、養生日数28日として同一グラフ上にプロットした。

図より、コンクリートは養生日数が長いほど中性化に対する抵抗性が向上することが明らかである。また、コンクリート毎に比較すると、W/C=34%のL30(SQC)は最も低い値を示しており、型枠存置期間28日では、W/C=50%の普通コンクリートが6.0~4.0程度に対してL30は1/2以下である。さらに、型枠存置期間1~7日の間で比較しても、L30はN50の1/2程度の値で推移していることから、L30はN50の2倍以上の中性化抵抗性を有していると言える。特に、L30の型枠存置期間1日の結果がN50の28日の結果よりも小さい結果は、極端に言えばL30の型枠存置期間を1日にまで短縮できる可能性を示している。

一方、W/C=50%の普通コンクリートをセメント別で比較すると、若材齢におけるLPC(L50)の中性化速度係数は他のセメント(N50, BB50)に比べてかなり大きいことが分かる。型枠存置期間28日を基準とすると、標準示方書に示された標準的な型枠存置期間(NPC50は5日、BBとLPCは7日)における中性化速度係数は、NPC50とBB50が1.1~1.2倍であるのに対して、LPC50は1.4倍程度も大きい。この結果を中性化抵抗性の観点から推定すると、コンクリート標準示方書の標準的な型枠存置期間は、NPCとBBに対しては妥当と考えられるが、LPCについては十分とは言えない可能性がある。

このような結果から、同じLPCを使用しているコンクリートにおいても、L50とL30では中性化に対する抵抗性が全く異なっており、中性化に対する抵抗性はセメントの種類だけでなく、水セメント比によっても大きく左右されることが分る。

ところで、被膜養生剤の効果について比較すると、今回の実験結果からはいずれの被膜養生剤についても大きな中性化抑制効果は認められなかった。一般的な浸透型の被膜養生剤は、コンクリート中の水分と共に養生剤の成分がコンクリート内部へ浸透することによってコンクリート表層部に粘膜層を形成する。したがって、水分の逸散が大きい脱型直後のコンクリート表面においては、養生剤がコンクリート内部に浸透しにくく、十分な養生被膜が形成出来なかったのではないかと考えられる。

4.2 細孔径分布測定結果

図-4.2 に型枠存置期間とコンクリートの細孔径分布の関係を示す。なお、細孔径分布は促進中性化試験の開始

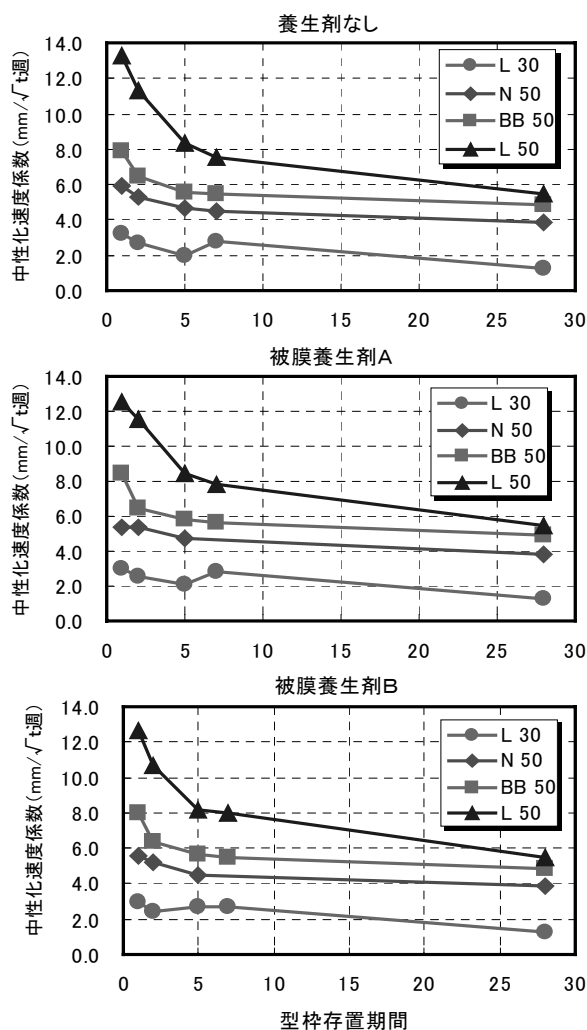


図 4.1 養生日数と中性化速度係数の関係

材齢で測定したものである。

細孔径累加曲線の変化を比較すると、N50とBB50は型枠存置期間1日から2日の間で分布形状が大きく変化しており、このとき総細孔量も大きく減少するのに対し、L50とL30は7日から28日(標準養生)の間に大きく変化している。また、各セメントの標準的な型枠存置期間において累加曲線形状を比較すると、L50は0.05~0.2 μm付近の細孔量が多く、他のコンクリートとは異なる形状を示している。

細孔径分布の変化について比較すると、若材齢期間のL30(SQC)のみが他のコンクリートとは明らかに異なった形状を有している。一方で型枠存置期間28日(標準養生)の細孔径分布はコンクリートの種類によらずほぼ類似した形状を示しており、細孔の絶対量は異なるものの、いずれのコンクリートにおいても、0.1 μm付近を境として0.1 μm以上の細孔量は多く0.1 μm以下の細孔量は少ない傾向を示している。

これらの結果から、コンクリートの細孔構造の形成が進行する時期はセメントの種類によって異なり、さらにLPCの細孔形成過程における細孔径分布特性は水セメント比の違いによって異なることが推測できる。

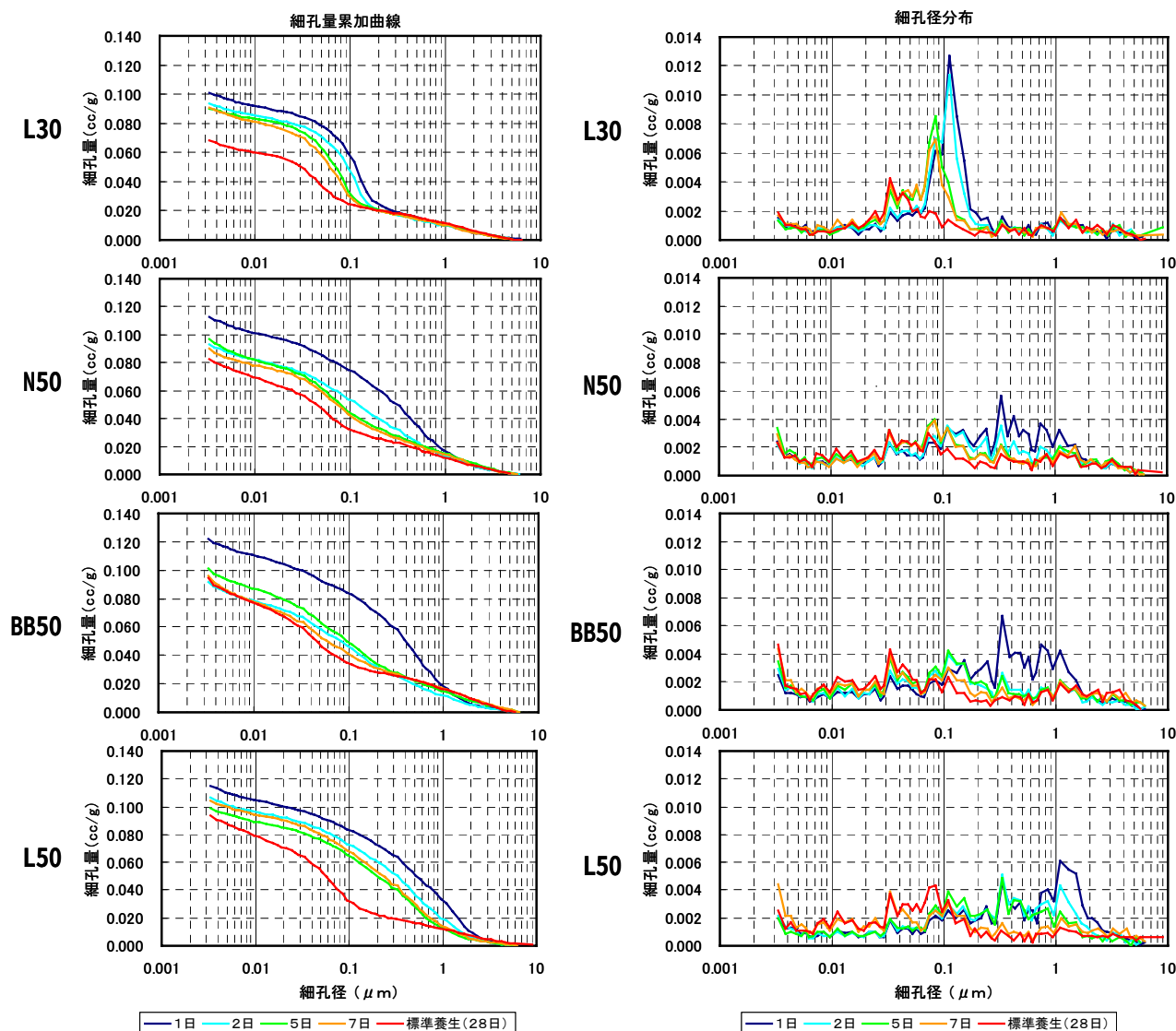


図 4.2 型枠存置期間と細孔径分布の関係

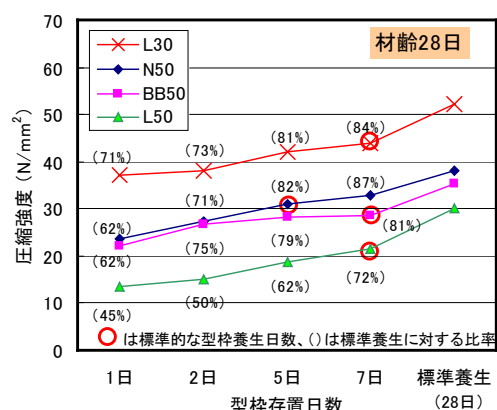


図-4.3 型枠存置日数と圧縮強度の関係

4.3 圧縮強度測定結果

図-4.3 に型枠存置日数と圧縮強度の関係を示す。なお、圧縮強度は材齢 28 日の結果で比較した。

いずれのコンクリートにおいても型枠存置日数を短縮するにつれて圧縮強度が低下する。図中の () は標準養生供試体に対する強度比であるが、L50 は他のコンクリ

ートに比べて特に強度低下率大きい。一方、N50、BB50、L30 の強度低下率はほぼ同等であり、それぞれの標準的な型枠存置期間における強度低下率は約 2 割である。今回の実験では、圧縮強度が低下する深さまでは測定していないが、実際の構造物の施工実績を想定すると、表層部のコンクリートは型枠存置期間の影響を大きく受けており、強度の低下はかなり大きいと言える。

5. 考察

5.1 圧縮強度と中性化速度係数の関係

図-5.1 に圧縮強度と中性化速度係数との関係を示す。なお、圧縮強度は中性化促進試験開始時の測定値である。

図より、圧縮強度と中性化速度係数との間には強い相関が認められる。一般的に、中性化速度係数と圧縮強度は直線関係があると言われているが、SQC の様な高強度領域のコンクリートを含めた場合は同一直線で回帰することは困難であるため、むしろ図に示すような曲線によって回帰することが妥当と考えられる。この曲線を用い

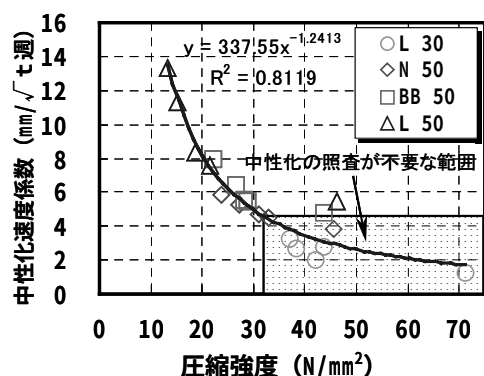


図-5.1 圧縮強度と中性化速度係数の関係

れば、中性化速度係数はセメントの種類や水セメント比の違いによらず、圧縮強度のみによって表せる。

ところで、土木学会コンクリート標準示方書によれば、NPC で水セメント比が 50%以下でかぶり厚が 30mm 以上確保される場合には、これまでの実績から中性化に関する照査を省略して良いことになっている。つまり、N50 で型枠存置期間が 7 日の中性化速度係数がこれに相当すると仮定すれば、図中に示す範囲に入るコンクリートは中性化に関する照査を省略しても良いと考えられる。したがって、SQC のように高強度領域で、若材齢時の強度発現も大きなコンクリートは、ほとんどの場合この範囲に含まれるので、型枠存置期間短縮しても十分な中性化抵抗性を有していると言える。

5.2 細孔量と中性化速度係数の関係

郭らの研究³⁾によると細孔径 $0.04\mu\text{m}$ 以上の細孔量は中性化の進行に支配的な影響を及ぼすことが報告されている。そこで、今回の実験結果についても同様の整理を試みた。図-5.2 に $0.04\mu\text{m}$ 以上の細孔量と中性化速度係数との関係を示す。

図 5.2 より、W/C=50%の普通コンクリート(N50, BB50, L50)と W/C=34%の SQC (L30) は、それぞれ別の直線で回帰することが出来る。ここで、この様に普通コンクリートと SQC の分布範囲が異なるのは、 $0.05\sim 0.2\mu\text{m}$ の範囲の細孔量の差が大きく影響していると考えられる。一般にコンクリート内の空隙は、細孔径が $0.1\mu\text{m}$ 以上のものは連続性が高く、それ以下のものは独立している可能性が高いと言われている。独立している空隙は CO_2 の透気性を低下させるため中性化を抑制する効果が高い。そこで、図 4.2 において $0.05\sim 0.2\mu\text{m}$ 付近の細孔量を比較すると、L30 の空隙は他のコンクリートに比べて独立気泡の割合が多いと推定できる。SQC はコンクリートの自己充填性を確保するため、もともと粗骨材が少なくモルタルペースト分の多い配合となっている。つまり、SQC のようなモルタルペースト分の多いコンクリートには独立気泡が多く含まれており、潜在的に中性化抵抗性の高い細孔構造を有していると考えられる。したがって、 $0.04\mu\text{m}$ 以上細孔量は同じであっても、SQC と普通コンクリートの中性化抵抗性が異なるのは、細孔

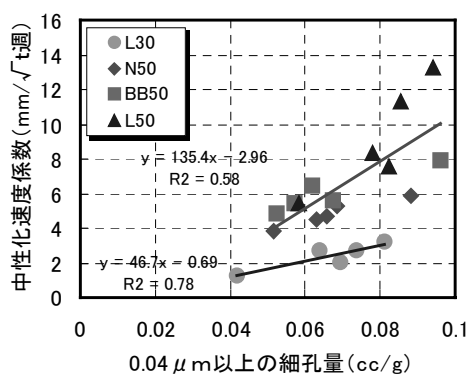


図-5.2 細孔量と中性化速度係数の関係

構造の連続性によるものと考えられる。

6. まとめ

LPC を使用した SQC は、高強度領域のコンクリートで若材齢時の強度発現が高いことや、モルタルペースト分が多い配合特性によって、非常に高い中性化抵抗性能を有することが確認できた。コンクリート表層部の細孔構造の形成の観点から言えば、LPC を使用した SQC の型枠存置期間を 5 日に短縮しても耐久性の低下はほとんど無いと考えられる。

以下に本実験で得られた結論を示す。

- (1) L30 の型枠存置期間 1 日における中性化速度係数は、N50 の型枠存置期間 7 日より小さい。
- (2) 高強度領域のコンクリートを含む圧縮強度と中性化速度係数の関係は曲線で回帰することが出来る。
- (3) SQC のような若材齢の強度発現が大きいコンクリートは、型枠存置期間短縮しても十分な中性化抵抗性を有していると考えられる。
- (4) SQC のようなモルタルペースト分の多いコンクリートの細孔構造には独立気泡の割合が多いため、 $0.04\mu\text{m}$ 以上の細孔量が同じ普通コンクリートに比べて中性化に対する抵抗性が高い。

謝辞：研究の一部は、平成 13 年度 文部科学省 革新的技術開発研究推進費補助金（研究課題：高性能コンクリートを用いた次世代建設システムに関する研究，研究代表者：東京大学 大学院 小澤 一雅）によるものであり、本研究分担者各位より貴重な助言を頂いた。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書(施工編)，pp123, 2002.3
- 2) 土木学会：自己充填型高強度高耐久コンクリート構造物設計施工指針（案），pp285, 2001.6
- 3) 郭度連，宇治交隆，國府勝郎，上野敦：養生条件によるコンクリートの組織変化と中性化を支配する細孔径の評価，土木学会論文集，No.718/V-57, pp50-68, 2002.11