

論文 吸水型枠を使用したコンクリートの透気性と塩分浸透深さとの関係

黒田 一郎*1・吉村 太郎*2・古屋 信明*3・山本 佳士*4

要旨：吸水型枠を使用したコンクリートを対象として、中性化と塩害が作用する複合劣化環境下において、表層の透気性と塩化物イオン浸透深さおよび中性化深さの関係について実験的に検討した。表層の透気性の測定には微破壊試験法の一つである削孔法を採用している。実験結果から、複合劣化環境下においても吸水型枠の使用が塩分浸透や中性化進行を抑制する効果を発揮すること、透気性が塩化物イオン浸透や中性化の進行と相関性を示すことなどを明らかにした。

キーワード：透気性、削孔法、吸水型枠、塩化物イオン浸透、中性化、複合劣化

1. はじめに

近年、コンクリートの耐久性向上が、材料、設計、施工等のそれぞれの角度から検討されている。その一つの方策としてフレッシュコンクリート表層の余分な水分を排除することによって水セメント比の小さな緻密な層を形成する吸水型枠が実用化されている。吸水型枠を使用したコンクリートの耐久性については多くの研究があり、中性化、塩害、凍結融解等様々な面で良好な耐久性を発揮することが確かめられてきた¹⁾。しかし、複数の劣化条件が組み合わされた複合劣化環境における耐久性についてはまだ研究が少ない状況にある。

また、外的な劣化原因物質の浸透に対するコンクリートの耐久性はその表層組織の緻密さと密接な関連があるため、緻密さの指標としての透気性の測定方法についても近年多くの研究がなされており、削孔法をはじめとする様々な非破壊・微破壊試験方法が提案されている²⁾。しかし、吸水型枠を使用したコンクリートの塩分浸透深さ(塩化物イオン浸透深さ)と透気性の関係についてはこれまでほとんど検討されていない。

本研究は、中性化と塩害が複合して作用する複合劣化環境において、吸水型枠を使用したコンクリートの塩化物イオン浸透深さと削孔法によって測定される透気性の関係を調べるとともに、吸水型枠の使用による耐久性向上効果を確認することを目的として実験的検討を試みるものである。

2. 実験概要

2.1 供試体と劣化促進条件

実験は、コンクリート供試体を劣化促進させた後に、コンクリート表層の透気性の測定と断面の塩化物イオン浸透深さならびに中性化深さの測定を行なうものである。

表-1に供試体シリーズを、表-2に使用したコンクリートの示方配合を示す。供試体の寸

表-1 供試体シリーズ

シリーズ	劣化促進条件	水セメント比(%)	型枠種類
WA40S	塩害条件	40	吸水型枠
ST40S			鋼製型枠
WA60S		60	吸水型枠
ST60S			鋼製型枠
WA40C	複合劣化条件	40	吸水型枠
ST40C			鋼製型枠
WA60C		60	吸水型枠
ST60C			鋼製型枠

*1 防衛大学校助教授 システム工学群建設環境工学科 工博(正会員)

*2 陸上自衛隊 北部方面隊第3施設団第12施設群

*3 防衛大学校教授 システム工学群建設環境工学科 工博(正会員)

*4 防衛大学校助手 システム工学群建設環境工学科 工修(正会員)

表-2 配合表

粗骨材の最大寸法(mm)	水セメント比(%)	細骨材率	単位量(kg/m ³)					
			水	セメント	細骨材	粗骨材	AE剤	高性能減水剤
25	40	40	164	410	658	1056	0.118	2.05
	60	60	164	273	761	1034	0.079	0.00

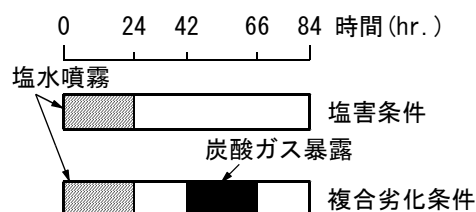


図-1 劣化促進条件

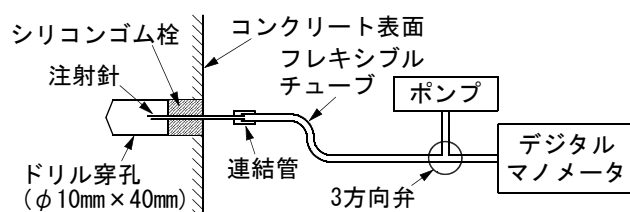


図-2 Figg-Poroscope法

法は100×100×420mmの角柱供試体である。表-1中の供試体シリーズ名は、最初の2文字が型枠種類を表わし(WAが吸水型枠、STが鋼製型枠)、次の数字が水セメント比(%),最後の1文字が劣化促進条件(Sが塩害劣化条件、Cが複合劣化条件)を表わしている。型枠種類と劣化促進条件については以下に説明する。

型枠種類は吸水型枠を使用した供試体(以下、吸水型枠供試体と呼ぶ)と鋼製型枠を使用した供試体(以下、鋼製型枠供試体)の2種類を使用した。ここで、吸水型枠は、鋼製型枠の内面に不織布(厚さ0.9mm)による吸水シートを貼り付けたものであり、フレッシュコンクリート時にこの吸水シートがコンクリート中の余剰な水分を吸収し、コンクリート表層の組織を密実にする結果、塩化物イオンの浸透や中性化に対する抵抗性が増すことが期待される。吸水特性としては、水セメント比として8~15%の減少に相当し、その効果はコンクリート表面から20mm程度の深さまで及ぶと報告されている¹⁾。吸水型枠供試体では、打設面も含めて角柱供試体の全表面(6面)をこの吸水シートで覆った。すべての供試体は打設後48時間で脱型し、脱型後14日間の水中養生の後に劣化促進実験に供した。

水セメント比は塩化物イオンの浸透性状に大きな影響を及ぼすことが予想されるため、40%と60%の2水準とした。単位水量はどちらの水セメント比であっても164kg/m³に統一されてい

る。使用したセメントは普通ポルトランドセメントであり、細骨材は千葉県鎌瀧産の川砂を、粗骨材は最大粗骨材寸法25mmの山口県伊佐産の碎石(岩種は石灰岩)を使用した。

劣化促進条件は、塩害のみが作用する塩害条件と、塩害と中性化が複合的に作用する複合劣化条件の3種類を設定した。複合劣化条件では、温度20℃の3%塩化ナトリウム水溶液を気温20℃、湿度100%R.H.で噴霧する状態と、濃度5%の炭酸ガスを含む気温20℃、湿度50%R.H.の空气中に暴露する状態を交互に繰り返した。すなわち、図-1に示すように、1サイクル84時間のうち塩水噴霧と炭酸ガス暴露を各24時間行ない、残りの時間は気温20℃、湿度50%R.H.の空气中に暴露した。塩害条件は、複合劣化条件から炭酸ガス暴露期間を省略し、代わりに同じ時間だけ気温20℃、湿度50%R.H.の空气中に暴露する条件である(図-1参照)。両条件とも8サイクル672時間(28日間)劣化促進を行なった。

2.2 透気性の測定

透気性の測定は、所定の劣化促進期間の後にFigg-Poroscope法³⁾で行なった。この測定手法は、表層コンクリートの非破壊・微破壊試験法の代表的手法である削孔法の一種であり、コンクリート表層に設けた試験孔内部の圧力変化に要した時間からコンクリート表層の透気性を評価する手法である(図-2参照)。試験孔の形成は、ドリルを用いてコンクリート表面に直径10mm、

表－3 透気試験経過時間によるコンクリート品質の評価区分 (Figgによる)

品質区分	透気試験経過時間(s)	品質評価	材料の種類
0	<30	Poor	粗なモルタル
1	30～100	Moderate	コンクリート強度: 20MPa
2	100～300	Fair	コンクリート強度: 30～50MPa
3	300～1000	Good	緻密で十分に養生 されたコンクリート
4	>1000	Excellent	ポリマーコンクリート

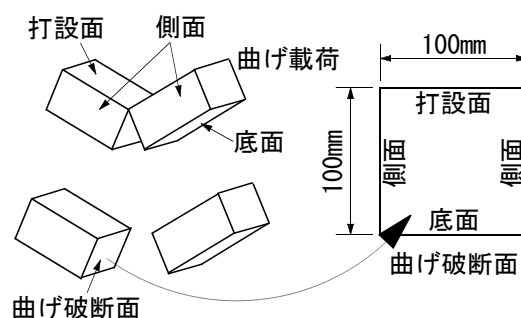
深さ40mmの孔を穿孔した後、長さ20mmのシリコンゴム製の栓を用いて密閉することによって行なう。このシリコンゴム製栓に注射針を貫通させ、試験孔内部の圧力をポンプを用いて-55kPaまで減圧し、その後コンクリート表面からの空気の浸透によって-50kPaまで圧力が回復するまでに要した経過時間をタイマーにて計測する。この経過時間(以下、透気試験経過時間と称する)によって透気性が判断でき、すなわち、透気試験経過時間が長いほど、コンクリートを通しての空気の浸入に時間がかかり透気性が低いと評価されることになる。

表－3に、透気試験経過時間によるコンクリート品質の評価区分(Figg³⁾による)を示す。国内では笠井⁴⁾らがこの手法について検討を行っており、簡易透気速度(試験孔内部の気圧変化量とそれに要する経過時間の比)とコンクリートの中性化深さに相関がある事を示している。

なお、本実験においては、透気性の測定に使用した供試体数は1ケースについて3～4体、供試体1体につき3～4箇所の試験孔を設けて測定を行なっている。本論文に示す透気試験経過時間は、これらの試験孔での測定値の、各ケース毎の平均値である。なお、本実験においては、試験孔はすべて、供試体の側面(コンクリート打設時に垂直であった面)にのみ設けている。

2.3 塩化物イオン浸透深さと中性化深さの測定

塩化物イオンの浸透深さは、促進試験後の角柱供試体を支承間隔300mmの1点中央曲げ載荷によって破断させ、その曲げ破断面に0.1N塩化銀水溶液を噴霧し、溶液の変色域の幅を測定す



図－3 曲げ破断面

表－4 透気試験経過時間

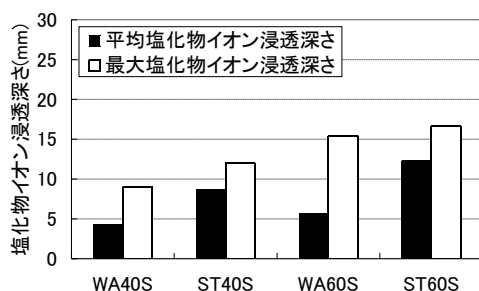
シリーズ	透気試験経過時間(s)	透気試験経過時間の標準偏差(s)
WA40S	155.3	30.5
ST40S	131.6	22.9
WA60S	123.9	19.2
ST60S	96.3	22.0
WA40C	146.4	41.6
ST40C	126.4	29.8
WA60C	108.4	29.3
ST60C	85.8	25.5

表－5 型枠種類による透気試験経過時間の比

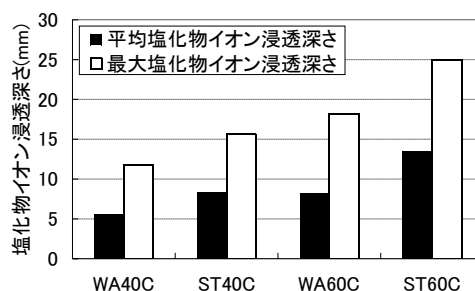
劣化条件	水セメント比 (%)	供試体シリーズ		透気試験経過時間の比 (吸水型枠 ÷ 鋼製型枠)
		吸水型枠	鋼製型枠	
塩害条件	40	WA40S	ST40S	1.18
	60	WA60S	ST60S	1.29
複合劣化条件	40	WA40C	ST40C	1.16
	60	WA60C	ST60C	1.26

ることによって測定した。測定対象は、透気性の測定と同様に、供試体の側面(打設時に垂直であった面)のみとした。曲げ破断面は約100×100mmの正方形となるので、浸透深さを測定する辺長は、供試体1体あたり約200mmとなる(図－3参照)。なお、供試体数は各ケース2体である。

中性化深さの測定は、塩化物イオンの浸透深さの測定と同じ要領で供試体を破断し、破断面にpH指示薬(酸塩基指示薬)を噴霧して行なった。pH指示薬としては1%フェノールフタレインエタノール溶液と1%チモールフタレインエタノール溶液を使用した。これらpH指示薬の変色域はそれぞれpH8.4～pH10.0(pH8.4以下で無色)およびpH9.6～pH10.4(pH9.6以下で無色)



図－4 塩化物イオン浸透深さ
(塩害条件)



図－5 塩化物イオン浸透深さ
(複合劣化条件)

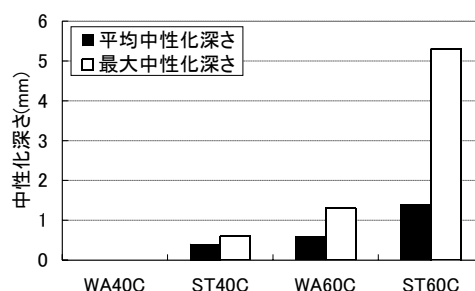
であり、フェノールフタレインよりもチモールフタレインの方がより塩基側に変色域が存在する。なお、塩化物イオン浸透深さと同じく、同一条件の供試体2体を測定対象とした。

3. 実験結果

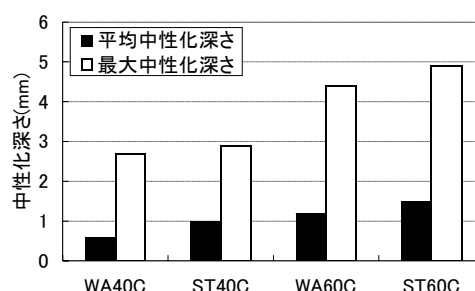
3.1 透気性

表－4に、Figg-Proscope法による透気試験経過時間を示す。いずれの劣化促進条件、型枠種類においても水セメント比40%の方が60%よりも透気試験経過時間が長くなっている。前述のコンクリート品質の評価区分(表－3)を参照すれば、本実験の供試体は水セメント比40%でグレード2、60%でグレード1または2の品質であると評価される。

型枠種類を比較すれば、いずれの劣化促進条件、水セメント比でも、鋼製型枠よりも吸水型枠の方が透気試験経過時間が20秒程度長くなっており、すなわち、透気性が低くなっている。これは、吸水型枠の使用によって供試体表層のコンクリート組織が緻密となったことの証左であると考えられる。吸水型枠の使用によって透気試験経過時間が長くなった割合、すなわち、鋼製型枠供試体に対する吸水型枠供試体の透気試験経過時間の比を表－5に各条件ごとにまとめて示せば、その比は1.16～1.29の範囲である。同じ劣化促進条件であれば水セメント比40%よりも60%の方が透気試験経過時間の比が大きくなっており、吸水型枠を使用することによる透気試験経過時間を長くする効果が、水セメント比によって異なることが明らかである。



図－6(a) 中性化深さ
(複合劣化条件、フェノールフタレイン)



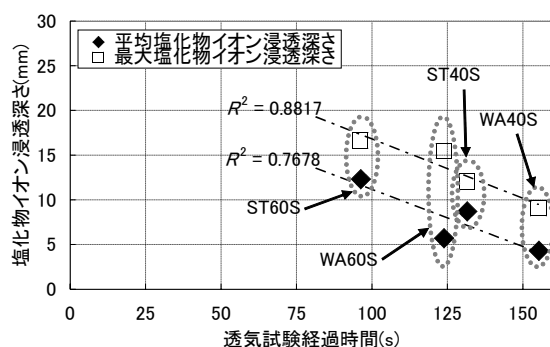
図－6(b) 中性化深さ
(複合劣化条件、チモールフタレイン)

表－6 平均中性化深さの差

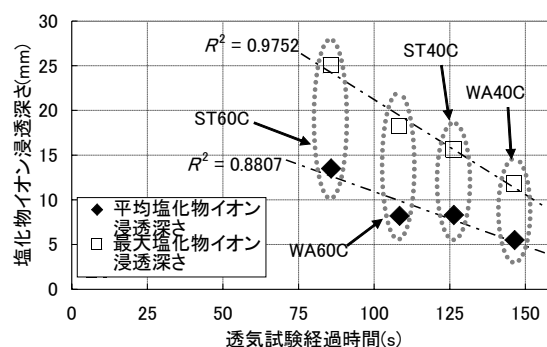
シリーズ	両pH試薬による平均中性化深さの差(mm)
WA40C	0.6
ST40C	0.6
WA60C	0.6
ST60C	0.1

3.2 塩化物イオン浸透深さと中性化深さ

図－4および図－5に塩化物イオン浸透深さを示す。また、図－6(a),(b)に中性化深さを示す。塩害条件の供試体では、フェノールフタレイン、チモールフタレインのいずれのpH試薬によっても中性化を確認できず、平均中性化深さ、最大中性化深さ共に0mmであると判断で



図－７ 塩化物イオン浸透深さと透気試験経過時間の関係(塩害環境)



図－８ 塩化物イオン浸透深さと透気試験経過時間の関係(複合劣化環境)

きたので中性化深さのグラフは示していない。

塩化物イオン浸透深さ、中性化深さとともに平均値と最大値の差が大きいが、これは、本実験ではコンクリート供試体を使用したために、粗骨材(最大寸法25mm)の影響が塩化物イオン浸透深さと中性化深さのばらつきとして現われたためであると考えられる。

ここで、塩化物イオン浸透深さに及ぼす型枠種類の影響を比較するならば、水セメント比や劣化促進条件に関わらず、吸水型枠供試体の方が鋼製型枠供試体よりも塩化物イオン浸透深さが、平均、最大ともに小さく抑えられており、吸水型枠の使用によって塩化物イオンの浸透が抑制されていることが確かめられる(図－4および図－5)。この型枠種類の違いによる塩化物イオン浸透深さの差は、水セメント比40%と60%の供試体間の差に匹敵するほど顕著であり、吸水型枠の使用による優れた浸透抑制効果が確認できる。

次に、中性化深さについても型枠種類の影響を比較すれば、すべてのケースにおいて吸水型枠供試体が鋼製型枠供試体よりも中性化深さが、平均、最大ともに小さくなっており、中性化深さに対しても吸水型枠による抑制効果が確認できる(図－6(a),(b))。

前述したように、今回使用した2種類のpH指示薬、フェノールフタレイン(pH8.4以下で無色)とチモールフタレイン(pH9.6以下で無色)では変色域がpHで約1程ずれている。このことを利

用して、表面からの深さ方向のpH変化(すなわち深さ方向のpHの勾配)にどのような傾向があるかについて考察を試みる。複合劣化条件の供試体は炭酸ガスに暴露され、供試体表面はpHが低く、表面から深くなるに従ってpHが高くなっているため、フェノールフタレインの変色域によって判断される中性化深さよりも、チモールフタレインによる中性化深さの方が大きくなる。そして、フェノールフタレインによる中性化深さとチモールフタレインによる中性化深さの差が小さいほど、深さ方向のpHの勾配が急激であり、反対に、両者の差が大きいほど、勾配が緩やかであると判断できる。そこで、両pH指示薬による平均中性化深さの差を表－6にまとめる。これによれば、ST60C(鋼製型枠水セメント比60%)のみが他のシリーズよりも中性化深さの差が小さく(pHの勾配が急)、すなわち、本実験では水セメント比60%の場合のみpHの勾配に型枠種類の影響が表われている。

3.3 透気性と塩化物イオン浸透深さならびに中性化深さとの関係

塩化物イオン浸透深さと透気試験経過時間の関係を図－7、図－8に、中性化深さと透気試験経過時間の関係を図－9(a),(b)にそれぞれ示す。さらに、塩化物イオン浸透深さ(または中性化深さ)と透気試験経過時間の相関係数をこれらの図中に(R^2 値として)示す。

図－7と図－8を見れば、透気試験経過時間が長いほど、すなわち透気性が低いほど、平均

塩化物浸透深さ、最大塩化物イオン浸透深さとともに小さいという傾向が明白である。この傾向は、劣化促進条件の違いに関わらず認められる。

次に、塩化物イオン浸透深さと同様に、中性化深さも、透気試験経過時間が長くなるほど小さくなっていることが、中性化深さと透気試験経過時間の関係を示した図-9(a),(b)からわかる。

以上から、削孔法の一つであるFigg-Poroscope法によって知ることができるコンクリート表層の透気性と、複合劣化環境下における塩化物イオン浸透および中性化進行との間に強い相関関係があり、簡便な削孔法によって、塩分浸透や中性化に対するコンクリートの抵抗性を評価する上で有用なデータを得ることができることが明らかとなった。

また、これらの図-7～9において、劣化促進条件および水セメント比が同じで、型枠種類のみが異なるプロットを比較(例えば図-7中のST60CとWA60C)すれば、吸水型枠供試体を表わすプロットは常に鋼製型枠のプロットの右下に位置しており、吸水型枠の使用によって透気試験経過時間が長くなり(すなわち透気性が低くなり)、塩化物イオンの浸透や中性化の進行も抑制されていることが確かめられる。

4. まとめ

本研究によって得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 吸水型枠の使用により、コンクリート表層の透気性が低くなることが削孔法によって確かめられた。
- (2) 塩害のみの条件下だけでなく、中性化と塩害が複合して作用する条件下においても、吸水型枠の使用が、塩化物イオンの浸透や中性化の進行を抑制する効果を発揮した。
- (3) コンクリート表層の透気性と、複合劣化環境下における塩化物イオン浸透深さおよび中性化深さとの間に明確な相関性が認められた。これにより、塩分浸透や中性化に対

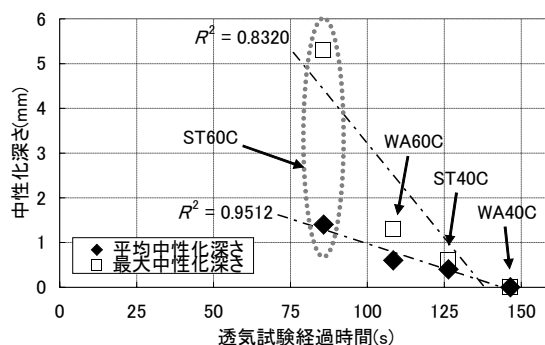


図-9(a) 中性化深さと透気試験経過時間の関係(複合劣化環境, フェノールフタレイン)

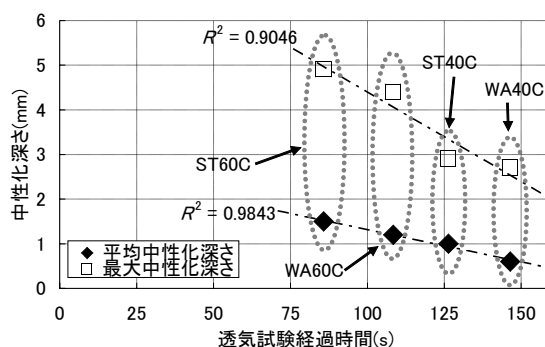


図-9(b) 中性化深さと透気試験経過時間の関係(複合劣化環境, チモールフタレイン)

するコンクリートの抵抗性を評価する上で、削孔法が有用であることが示された。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：透水・脱水によるコンクリートの品質改善に関するシンポジウム，委員会報告書・論文集，日本コンクリート工学協会，2004
- 2) 今本啓一ほか：実構造物の表層透気性の非・微破壊試験方法に関する研究の現状，コンクリート工学，Vol.44，No.2，pp.31～38，2006
- 3) Figg, J. : Concrete Surface Permeability: Measurement and Meaning, Chemistry and Industry, No.11, pp.714-719, 1989
- 4) 笠井芳夫ほか：簡易透気性試験を用いた構造体コンクリートの耐久性評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.151～152，1997