

[11] コンクリートの中性化に関する一考察

正会員 依田 彰彦 (足利工業大学工学部)

1. まえがき

コンクリートの中性化速度は水セメント比、ポロシチー、施工程度、仕上げ材の有無及び種類、環境条件などによって異なる。本報では20年間及び10年間ならびに5年間、自然暴露した普通ポルトランドセメントを用いた普通コンクリートの中性化現象とポロシチーとの関係などについて究明したことがらを取り纏めたものである。

2. 20年間屋内・屋外に自然暴露したコンクリート供試体の場合

2.1 使用材料 a.セメント：普通ポルトランドセメント（N社製品） b.細骨材：相模川砂、f.m. 3.0 c. 粗骨材：相模川砂利、最大寸法20mm d.水：水道水（新宿区） e.使用材料の試験結果：表1～2に示す。

表1 20年間の自然暴露試験に使用した普通ポルトランドセメントの品質

ig'loss	insol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	比重	ブレン (cm ³ /g)	凝 結 (h-m)			安定性	圧 縮 強 さ (kg/cm ²)		
										水量 (%)	始 発	終 結		3 日	7 日	28 日
0.7	0.6	22.6	5.1	2.9	64.2	1.6	1.6	3.15	3190	26.9	2-26	3-11	良	127	182	386

2.2 試験方法 a.供試体：角柱、20×20×約

30cm、8個 b.コンクリート調合：表3に示す。

c.供試体の製作：昭和36年3月27日と4月6日に

関連するJISによって製作した。 d.供試体の初期

養生：供試体はコンクリート打込みより2日後に

脱型し、その後、材令28日まで湿砂養生を行なった。なお、打込みは、

「かなり入念」に行なった。 e.環境条件：屋内（CO₂濃度0.1%前後、温度10

～30℃、湿度40～70%）、屋外（CO₂濃度0.03%前後、温度-4～35℃、湿

度19～88%、風速0.9～7.3m/s） f.中性化深さとポロシチーの測定：材令20

年に到達した後、供試体はコンクリートカッターを用いて切断し、その翌

々日に切断面に対して噴霧器によってフェノールフタレイナルコール1%溶液をかけ、中性化部分をトレーシ

ングペーパーに写しとった後、プランメーターで測定し、最大、平均、最小の中性化深さを測定した。その後、

切断面の写真撮影も行い、さらにその後、中性化(表面)

及び未中性化(芯)の部分を斫りとり、水銀圧入式のポ

ロシメーターを用いてポロシチーを測定した。

2.3 試験結果 表4～5に示す。

2.4 結果の検討 およそ次のことがいえよう。

(1) コンクリートの中性化深さについて

a.最大中性化深さと平均中性化深さとの関係を材令20年で見ると、最大中性化深さは平均中性化深さの1.3倍～2.3倍である。

b.経過年数と平均中性化深さとの関係を見ると、従来からいわれている通り、コンクリートは経年するほど平均中性化深さは大きくなる。しかし、その速度は漸次遅くなる(図1～2参照)。

c.屋内・屋外と平均中性化深さとの関係を見ると、

表2 使用した骨材の品質

種類	表 乾 比 重	吸 水 率 (%)	単 位 容 重 (kg/ℓ)	ふるいを通るものの重量百分率 (%)										
				ふる い 目 (mm)										
				25	20	15	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	
川 砂	2.59	2.1	1.64	—	—	—	—	98	84	68	35	12	1	
川砂利	2.65	1.3	1.65	100	90	79	28	1	—	—	—	—	—	

表3 コンクリート調合

No	水セメント比 (%)	ス ラ ブ (cm)	空気量 (%)	細 骨 材 率 (%)	単 位 水 量 (kg/m ³)
7	60	20	0.4	45.4	206
8	70	19	1.1	46.3	196

表4 自然暴露したコンクリートの中性化深さ(mm)

環 境 条 件	水セメント比 (%)	平均中性化深さ			最 大	平 均	最 小
		1 年	3 年	10 年			
屋 内	60	1.9	3.7 (371)	8.9 (378)	17.8	11.2 (381)	6.8
		1.8	3.0 (384)	5.5 (404)			
屋 外	70	2.8	4.8 (266)	11.3 (281)	22.0	16.7 (282)	8.8
		2.7	4.3 (326)	7.7 (362)			

(注) () 内は15φ×30cm円柱供試体の圧縮強度kg/cm²を示す。

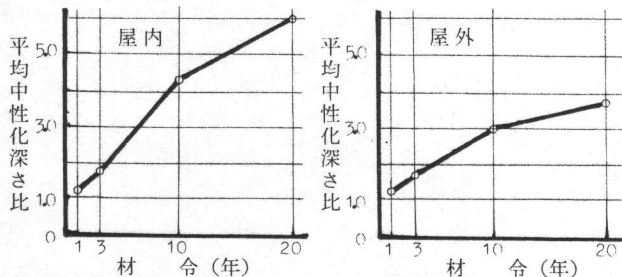


図1 経年に伴う平均中性化深さ比 図2 経年に伴う平均中性化深さ比

表5 20年間自然暴露したコンクリートのポロシチー (mm³/g) [注] ※材令28日から自然暴露した。

環境条件 水セメント比(%) 中性化、未中性化の別	屋内 [※]				屋外 [※]			
	60		70		60		70	
	中性化部分	未中性化部分	中性化部分	未中性化部分	中性化部分	未中性化部分	中性化部分	未中性化部分
ポア一半径 (Å)								
75~ 135	8.7	1.7	7.5	1.7	5.8	3.7	6.1	5.3
135~ 240	10.2	3.8	12.3	3.8	7.5	7.0	8.5	7.9
240~ 420	6.3	8.0	9.9	7.5	8.9	11.3	9.3	9.2
420~ 750	4.6	12.5	6.1	8.6	5.5	10.5	5.0	5.6
750~ 1350	5.3	15.5	5.4	10.9	5.0	6.9	4.8	5.7
1350~ 2400	5.1	10.6	5.3	12.2	4.7	5.2	2.8	5.3
2400~ 4200	4.2	5.3	4.8	8.2	3.9	5.2	4.1	5.4
4200~ 7500	3.7	6.4	4.2	7.5	3.3	5.6	2.5	5.6
7500~13500	2.9	4.2	3.2	5.4	2.2	3.5	2.0	5.6
13500~24000	2.5	3.3	2.6	3.2	1.7	2.4	1.7	3.3
24000~42000	1.6	2.0	2.3	2.4	1.1	1.8	1.2	2.1
42000~75000(7.5μ)	0.9	1.7	1.5	1.6	0.8	0.9	1.0	1.2
全空げき量(T.P.V)	56.0	75.0	65.1	73.0	50.4	61.5	49.0	62.2
(全空げき比)	(0.75)	(1.00)	(0.89)	(1.00)	(0.82)	(1.00)	(0.79)	(1.00)

[注] 本表の数値は2個の供試体を平均したもの。また○印で囲んだものは同じグループでポロシチーが多いことを示す。

屋内の方が屋外より中性化深さは大きく、その倍率は1.5~1.8倍である。

d. 水セメント比と平均中性化深さとの関係を見ると、従来からいわれている通り水セメント比の大きい方が平均中性化深さは大きく、水セメント比60%のものを1.0とすると水セメント比70%は1.5~1.7倍である。

(2) コンクリートの中性化深さとポロシチーについて

a. 普通ポルトランドセメントを用いた川砂・川砂利コンクリートの中性化部分の75~75000ÅのT.P.V (Total Pore Volume) は未中性化部分のT.P.Vより若干小さく、0.8~0.9倍程度である。

b. ポア一の分布は中性化によって75~420Åの範囲の小さなポア一が増加する。すなわち中性化によって空げき(ポア一)の径は漸次小さくなるといえよう。

c. 屋内・屋外と空げきとの関係を見るとT.P.Vは屋外の方が一般に小さい。これは経年に伴って受ける雨水などの影響でセメントとの水合が進んだためと思われる。

d. 水セメント比と空げきとの関係を中性化部分で見るとT.P.Vは屋外では水セメント比60%でも70%でも余りかわりないようであるが、屋内では水セメント比の小さい60%の方がT.P.Vは小さい。

3. 10年間屋外に自然暴露したコンクリート実大梁の場合

3.1 使用材料 a.セメント：普通ポルトランドセメント (N社製品) b.細骨材：富士川砂、f.m.2.6 c.粗骨材：富士川砂利、最大寸法25mm d.水：水道水(調布市) e.使用材料の試験結果：表6~7に示す。

表6 10年間の自然暴露試験に使用した普通ポルトランドセメントの品質

ig'loss	insol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	比重	ブレン (cm/g)	凝結 (h-m)			安定性	圧縮強さ (kg/cm ²)		
										水量(%)	始発	終結		3日	7日	28日
0.5	0.5	21.8	5.6	3.1	64.8	1.5	1.9	3.16	3110	27.2	2-25	3-37	良	121	227	392

3.2試験方法

a. 供試体：45

×45×170cm、

2個 b. コン

クリート調合：表8に示す。c. 供試体の製作：

昭和46年2月25日に関連するJISによって屋外にて製作した。d. 供試体の初期養生：供試体はコンクリート打込みより3日後に脱型し、その後材令7日まで初期養生を行なった。なお、打込みは「普通の上」程度に行なった。

表8 コンクリート調合

水セメント比 (%)	スラブ (cm)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単水量 (kg/m ³)
55	18	1.0	37.9	191

表7 使用した骨材の品質

種類	表乾	吸水率 (%)	単位容重 (kg/ℓ)	ふるいを通るものの重量百分率 (%)													
				ふるい目 (mm)													
比重																	
川砂	2.64	1.6	1.70	—	—	—	—	99	90	76	49	19	7	—	—	—	—
川砂利	2.65	1.3	1.73	99	86	78	49	11	—	—	—	—	—	—	—	—	—

表9 10年間自然暴露したコンクリートのポロシチー (mm³/g)

環境条件 種別 部分 中性化、未中性化の別	屋 内 (45×45×170cm)						外	
	実 大 梁		中 央 部		下 部		円 柱 (10φ×20cm)	
	上 部	未中性化部分	中性化部分	未中性化部分	中性化部分	未中性化部分	中性化部分	未中性化部分
ポアー半径 (Å)	中性化部分	未中性化部分	中性化部分	未中性化部分	中性化部分	未中性化部分	中性化部分	未中性化部分
75~135	8.1	2.0	5.7	2.2	3.2	1.8	4.4	2.4
135~240	12.8	7.0	7.5	5.6	6.9	5.5	14.4	6.5
240~420	10.3	15.3	9.9	11.0	7.8	16.2	19.7	9.4
420~750	10.3	18.7	9.9	13.0	7.0	20.6	11.2	20.7
750~1350	7.7	13.6	8.6	13.8	9.2	10.6	5.2	14.7
1350~2400	4.7	5.4	4.8	6.5	7.3	7.4	3.2	9.8
2400~4200	3.2	4.9	1.9	8.0	4.4	5.8	1.8	7.2
4200~7500	1.8	4.5	1.5	9.5	2.7	3.5	1.1	4.4
7500~13500	1.5	4.0	0.6	3.9	0.7	2.4	0.7	2.5
13500~24000	0.3	2.0	0.7	1.7	0.2	1.1	0.7	1.0
24000~42000	0.8	0.4	0.6	1.1	0.1	0.9	0.4	0.7
42000~75000 (7.5μ)	0.4	0.3	0.2	1.0	0.1	0.2	0.5	0.3
全空げき量 (T.P.V)	61.9	78.1	51.9	77.3	49.6	76.0	63.3	79.6
平均中性化深さ (mm)	5.4	0	4.7	0	3.9	0	5.0	0

[注] 本表の数値は2個の供試体を平均したもの。また○印で囲んだものは同じグループでポロシチーが多いことを示す。

e. 環境条件：屋外 (CO₂濃度0.03%前後、温度-4~34℃、湿度20~87%、風速0.9~7.2m/s) f. 中性化深さとポロシチーの測定：材令10年に到達した後、実大梁は上部（打込面に近い部分）、中央部、下部を研り、また円柱供試体は割裂し、それぞれの面に対して噴霧器によってフェノールフタレインアルコール1%溶液をかけた後、mm単位のスケールを用いて最大、平均、最小の中性化深さを測定した。その後、中性化（表面）及び未中性化（芯）の部分の研りとり、水銀圧入式のポロシチー計を用いてポロシチーを測定した。

3.3 試験結果 表9に示す。

3.4 結果の検討 およそ次のことがいえよう。

(1) コンクリートの中性化深さについて

実大梁のコンクリートの平均中性化深さは当然と思われるが上部ほど大きく、以下中央部、下部の順である。

(2) コンクリートの中性化深さとポロシチーについて

普通ポルトランドセメントを用いた川砂・川砂利コンクリートの中性化部分のT.P.Vは未中性化部分のT.P.Vより上部が0.79倍、中央部が0.67倍、下部が0.65倍で小さい。また、ポアーの分布の傾向は2.4(2)bとほぼ同じように中性化によって75~240Åの範囲の小さなポアーが増加する。

4. 5年間釧路、筑波、東京芝浦、四日市、指宿に自然暴露したコンクリート供試体の場合

4.1 使用材料 a.セメント：普通ポルトランドセメント（N社製品） b.細骨材：富士川砂、f.m.2.7 c.粗骨材：富士川砂利、最大寸法20mm d.水：水道水（港区） e. AE剤：VL（Ya社製品） f.使用材料の試験結果：表10~

表10 5年間の自然暴露試験に使用した普通ポルトランドセメントの品質

ig'loss	insol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	比重	ブレン (cm ³ /g)	凝 結 (h-m)			安定性	圧 縮 強 さ (kg/cm ²)		
										水量(%)	始 発	終 結		3 日	7 日	28 日
0.6	0.1	21.8	5.3	3.3	65.1	1.3	1.7	3.15	3230	27.2	2-19	3-48	良	147	234	416

11に示す。

表11 使用した骨材の品質

種 類	表 乾	吸水率	単 位 容 重	ふるいを通るものの重量百分率 (%)												
				ふる い 目 (mm)												
				比 重	(%)	(kg/ℓ)	25	20	15	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15
川 砂	2.60	2.7	1.69	—	—	—	—	100	87	70	53	20	3			
川砂利	2.57	2.3	1.68	97	86	73	36	7	—	—	—	—	—			

4.2 試験方法 a.供試体：角柱10×10×40 cm、10個 b.コンクリート調合：表12に示す。

c.供試体の製作：すべての供試体は東京芝浦において昭和50年9月12日に関連するJISによって

製作した。d. 供試体の初期養生：供試体はコンクリート打込みより2日後に脱型し、その後材令7日まで20℃水中養生を行ってから材令28日まで屋内に放置した。なお、打込みは「普通の中」程度に行なった。e. 環境条件：表13に示す。f. 供試体の暴露は材令28日～30日程度から開始した。g. 中性化深さと

表12 コンクリート調査

水セメント比 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	細骨材 (%)	単位置量 (kg/m ³)
50	14.5	4.2	38.0	168

ポロシチーの測定：材令5年に到達した後、各地で暴露していたコンクリート供試体を東京芝浦に戻し、2.2f.に示した方法と同様に測定した。

4.3 試験結果 表14に示す。

4.4 結果の検討 次のことがいえよう。

(1) コンクリートの中性化深さについて
5年間程度の自然暴露期間のためか地域に

表13 環境条件〔注〕()内の数値は平均値を示す。

所 在	釧 路	筑 波	東京芝浦	四 日 市	指 宿
	北海道釧路市新富士1丁目岸壁より約1km地点	茨城県筑波郡	東京都港区芝浦3丁目岸壁より約1km地点	三重県四日市市霞2丁目岸壁より約0.5km地点	鹿児島県指宿市十二町海岸線より約0.5km地点
温度 (°C)	-25~28 (5.4)	-9~34 (12.2)	-4~35 (15.0)	-6~35 (14.4)	-6~35 (17.4)
湿度 (%)	20~90 (77)	13~85 (76)	13~85 (66)	17~84 (71)	16~84 (74)
降水量 (mm)	5~170 (79)	13~300 (107)	20~290 (127)	9~650 (153)	10~580 (187)

表14 5年間自然暴露したコンクリートのポロシチー (mm³/g)

環境条件 中性化、未中性化の別	屋 内				外					
	釧 路		筑 波		東 京 芝 浦		四 日 市		指 宿	
ポアー半径 (Å)	中性化部分	未中性化部分	中性化部分	未中性化部分	中性化部分	未中性化部分	中性化部分	未中性化部分	中性化部分	未中性化部分
75~135	8.1	3.8	7.0	2.3	8.7	2.7	6.8	3.4	8.1	3.0
135~240	12.2	8.4	12.1	7.2	15.2	5.8	12.1	7.1	13.9	7.0
240~420	11.2	10.8	9.0	9.1	8.7	8.8	10.0	8.5	11.3	9.3
420~750	8.8	14.4	8.6	15.8	6.3	15.2	9.9	12.5	10.0	12.1
750~1350	5.7	9.1	5.5	13.0	6.7	15.0	8.4	12.4	7.6	14.2
1350~2400	6.4	7.1	3.2	9.2	7.1	11.1	8.2	8.3	7.1	10.6
2400~4200	5.9	4.3	6.5	5.5	6.5	6.4	4.6	6.9	4.8	5.6
4200~7500	4.1	4.1	3.2	3.9	4.1	3.7	3.6	4.7	3.5	4.0
7500~13500	3.4	3.9	2.7	3.4	4.3	3.0	3.5	3.9	3.0	3.1
13500~24000	2.8	5.0	2.2	4.2	2.1	3.7	2.5	5.0	2.4	4.5
24000~42000	1.5	2.4	1.5	2.5	0.8	2.4	1.7	2.0	1.5	2.3
42000~75000(7.5μ)	1.7	1.6	0.8	0.7	1.5	0.8	1.0	1.2	1.4	1.7
全空げき量 (T.P.V)	71.8	74.9	62.3	76.8	72.0	78.6	72.3	75.9	74.6	77.4
平均中性化深さ (mm)	3.5	0	4.5	0	3.5	0	3.5	0	3.5	0

〔注〕本表の数値は2個の供試体を平均したもので、また○印で囲んだものは同じグループでポロシチーが多いことを示す。

よる中性化深さのちがいは若干大きい筑波を除いては認められなかった。

(2) コンクリートの中性化深さとポロシチーについて

普通ポルトランドセメントを用いた川砂・川砂利・A Eコンクリートの中性化部分のT.P.Vは未中性化部分のT.P.Vに比して0.9倍前後で小さい。またポアーの分布は2.4(2)bと同様、75~420Åの小さなポアーが増加する。

5. 結 論

20年間及び10年間ならびに5年間自然暴露した普通ポルトランドセメントを用いた普通コンクリートの中性化現象とポロシチーとの関係について究明した結果、次のような結論を得た。

a. コンクリートは中性化すると75~75000Åの全空げき量 (T.P.V) が減じ、75~420Å範囲程度のポアーが増える。すなわち、中性化するとポアーの径は漸次小さくなるといえよう。

b. コンクリートの中性化速度は打込みの程度 (ポロシチーの生成) によっても異なる。

c. 釧路、筑波、東京芝浦、四日市、指宿に自然暴露した同一仕様のコンクリートの中性化現象とポロシチーには大きな差異が認められなかった。また、同一地域における屋内・屋外のポロシチーは後者の方が小さい。

なお、セメント及びコンクリートの種類などによっては中性化に伴うポロシチーの生成が異なると思われる。