論文 水和熱による高温履歴を受けた高強度コンクリートの塩分浸透性に 関する検討

葛西 康幸*1·河野 広隆*2·渡辺 博志*3

要旨:初期材齢時の水和熱による高温履歴が高強度コンクリートの塩分浸透性に及ぼす影響 について検討した。本研究では、早強ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末 50%置換早 強ポルトランドセメントおよび高ビーライト系セメントの3種類の結合材を用いた高強度コ ンクリートに対し、高温下で養生された場合の塩分浸透性について急速塩分浸透性試験 (RCPT)により評価した。その結果、高温履歴により塩分浸透抵抗性は低下するものの、著し い高温履歴を与えなければ抵抗性の低下は小さく、低発熱タイプの結合材使用など適切な温 度低減対策の実施により耐久性への影響を抑えることができることを明らかにした。 キーワード:高強度コンクリート、塩分浸透性、水和熱、高温履歴、急速塩分浸透性試験

1. はじめに

高強度コンクリートは力学的性能および耐久 性に優れ、建設コストの縮減、ライフサイクル コストの低減などの観点から、今後ますます利 用の増加が期待される。一方、単位結合材量が 多く,結合材の水和熱による高温履歴を受けや すくなり、これらの温度履歴がコンクリートの 耐久性に及ぼす影響も懸念される。既往の研究 において, 文献 1), 2)などでは水セメント比が 40%以上の種々のコンクリートについて、文献 3) ではひとつの配合ではあるが水セメント比が 25%の高強度コンクリートについて、人為的あ るいは水和熱による温度履歴を与えたコンクリ ートの塩分浸透性に関する評価を行っている。 いずれの研究も高温履歴を受けた場合には塩分 浸透抵抗性が低下することを指摘しているが, 様々な配合の高強度コンクリートに対する温度 履歴を変えた場合の検討は十分ではない。そこ で本研究では、3 種類の結合材を用いた水セメ ント比が25%の高強度コンクリートを対象とし、 高温履歴を受けたコンクリートの塩分浸透性を、 急速塩分浸透性試験により評価した。

2. 実験方法

2.1 概要

本実験では、コンクリート初期材齢時の温度 履歴を人為的に与えるのではなく、水和熱を利 用し、型枠種類およびコンクリートブロックの 大きさを変えることで種々の温度履歴をコンク リートに与え、そのブロックから採取したコア 供試体を用いて評価を行った。急速塩分浸透性 試験による塩分浸透性の評価に加え、一部の配 合については圧縮強度試験を実施し、強度特性 に及ぼす影響についても検討した。

2.2 コンクリートの配合

試験に用いたコンクリートの配合を表-1に 示す。水結合材比を25%で一定とし、結合材種 類を早強ポルトランドセメント(H)、早強ポル トランドセメント+高炉スラグ微粉末 6000(置 換率 50%)(B)、高ビーライト系セメント(L)の 3 種類とした。また、高温履歴を受けたコンク リートの塩分浸透性に、骨材とモルタルとの線 膨張係数の違いによる骨材界面のマイクロクラ ックの影響が予想された³⁾ことから、早強ポル トランドセメントについては、同一の配合で粗

*1 独立行政法人土木研究所 技術推進本部構造物マネジメント技術チーム交流研究員 修(工) (正会員) *2 独立行政法人土木研究所 技術推進本部構造物マネジメント技術チーム主席研究員 工修 (正会員) *3 独立行政法人土木研究所 技術推進本部構造物マネジメント技術チーム主任研究員 工修 (正会員)

配合名	結合材 種 類	水 結合材 比	細骨 材率	単位量(kg/m ³)					(B×%)	
				水	結合材 B				古州北	
					セメント	高炉スラグ 微粉素	細骨材	粗骨材	同住 E AE	AE 助剤
		(%)	(%)	W	С	BFS	S	G		
НС	Н	25	45	160	640	_	724	903	1.2	0.002
HM	Н	25	※HMはHCの配合から粗骨材を抜いたモルタル							
BC	В	25	45	160	320	320	713	890	0.9	0.002
LC	L	25	45	160	640	_	728	909	1.0	0.002

表-1 コンクリートの配合

表-2 圧縮強度試験供試体一覧

供試体 記 号	配合	型枠種類	スランプ (cm)	スランプ フ ロ ー (cm)	空気量 (%)	標準供試体 圧縮強度(σ ₂₈) (N/mm ²)	
HC-AP	НС	木材(12mm厚)	22.0	37.0×38.8	3.8	102.1	
HC-BS		発泡(200mm厚)	22.0				

骨材のみを抜いたモルタル供試体につい ても試験を行った。

2.3 圧縮強度試験

圧縮強度試験による評価は、早強ポル トランドセメントを用いたコンクリート 供試体のみ実施した。圧縮強度試験に用 いた供試体一覧を表-2に、供試体概略 図を図-1に示す。HC-AP は極力温度上 昇を抑えることを目的とし、木製型枠を 用いて 210×600×160mm の角型に成型 したブロック, HC-BS は高温履歴を与え

ることを目的とし,厚さ 200mm の発泡スチロ ールを型枠に用いて 400×400×400mm の角型 に成型したブロックとした。これら2つのブロ ックを同一バッチで練り混ぜ打設し,そのまま の状態で約2週間養生した後,φ100×200mm のコアをそれぞれ4本ずつ採取し,材齢28日に おいて圧縮強度試験を実施した。なお,練り混 ぜから養生までを20℃一定の室内で実施し,コ ア採取後は標準水中養生を行った。

2.4 塩分浸透性試験

コンクリートの塩分浸透性を評価する試験に は種々の方法が提案されているが、本研究では、 簡易かつ短時間で塩化物イオン拡散係数を推定 できる試験方法として、文献4)に示されている



急速塩分浸透性試験(RCPT)を用いた。本試験方 法は,ASTM C 1202 や AASHTO T 277 で規定さ れている試験と同様の,図-2に示す試験装置 を用い,塩化物イオンの移動速度から式(1)より 拡散係数を算定する手法である。

$$D_c = k \frac{RT}{zF} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)^{-1} \tag{1}$$

ここで、
$$D_c$$
:塩化物イオン拡散係数
 k :塩化物イオン移動速度
 R :気体定数
 T :絶対温度
 z :価数
 F :ファラデー定数
 $\partial \phi / \partial x$:電位勾配

本試験では,通電時間を 6,15,30 時間の 3 種類に設定,通電後の供試体を割裂し,割裂面 に 0.1N 硝酸銀水溶液を噴霧,塩化物イオン浸透 深さを測定し,この測定値から塩化物イオンの 移動速度を算出した。なお,電位勾配は 12V/cm, 陰極側を 5%塩化ナトリウム水溶液,陽極側を 0.3N 水酸化ナトリウム水溶液とした。

急速塩分浸透性試験に用いた供試体一覧を表 -3に,供試体概略図を図-3に示す。タイプ 1 は極力温度上昇を抑えることおよび若干の温 度上昇を許すことを目的とし,木製型枠もしく は厚さ50mmの発泡スチロールを型枠に用いて 300×300×100mmの角型に成型したブロック, タイプ2は高温履歴を与えることを目的とし, 厚さ200mmの発泡スチロールを型枠に用いて 400×400×400mmの角型に成型したブロック, タイプ3は実構造物を想定し,供試体内に温度 勾配を発生させ,同一ブロック内で温度履歴を 変えることを目的としたブロックである。これ らのブロックは,タイプ3以外はいずれの配合 も同一バッチで,タイプ3については1つのブ ロックを3バッチに分けて練り混ぜ打設し,そ のままの状態で約2週間養生した後,3種類の 通電時間用にφ100×50mmのコア供試体をそ れぞれ3本ずつ採取した。また,比較のため, これらと同一バッチのコンクリートをプラスチ ック製の円筒形型枠(供試体タイプ:PM)を用い て製作したφ100×50mmの供試体についても 試験を行った。試験は材齢28日を目標に実施し た。なお,練り混ぜから養生までを20℃の室内 で実施し,コア採取後は気中養生とした。





供試体	配合	供試体	型枠種類	スランプ	スランプ フ ロ ー	空気量	標 準 供 試 体 圧縮強度(σ ₂₈)	
記 万		21)		(cm)	(cm)	(%)	(N/mm^2)	
НС-РМ		PM	プラスチック					
HC-1P		1	木材(12mm厚)	22.5	42.7×41.2	3.5	95.4	
HC-1S		1	発泡(50mm厚)	22.5	43.7 ~ 41.5	5.5	93.4	
HC-2S	HC	2	発泡(200mm厚)					
НС-3Р-А		3 木材(12m		22.6	43.2×44.1	3.7	97.2	
НС-3Р-В			木材(12mm 厚)					
НС-3Р-С								
HM-PM		PM	プラスチック		_	_		
HM-1P	ым	1	木材(12mm厚)					
HM-1S	11111	1	発泡(50mm厚)					
HM-2S		2	発泡(200mm厚)					
BC-PM		PM	プラスチック	24.1	47.4×47.0	2.9	106.8	
BC-1P	PC	1	木材(12mm厚)					
BC-1S	BC	1	発泡(50mm厚)	24.1			100.8	
BC-2S		2	発泡(200mm厚)					
LC-PM		PM	プラスチック					
LC-1P	LC	1	木材(12mm厚)	10.0	—	3.6	109.6	
LC-2S		2	発泡(200mm厚)					

表-3 急速塩分浸透性試験供試体一覧

※PM は内径 100mm のプラスチック製円筒形型枠

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度

熱電対(図-1中の記号 T)に より計測した, コア採取位置近 傍のコンクリートの温度履歴を 図-4に, 圧縮強度試験結果を 図-5に示す。なお、図-5中 の TP とは JIS A 1132 に準拠し て製作した供試体について標準 養生を行った場合の試験値であ る。TP に比ベコア供試体の強度 は若干小さいものの, AP と BS の間には温度履歴で約 40℃の 違いがあるにも関わらず、大き な差異は認められなかった。今 回試験を行った早強ポルトラン ドセメントを用いたコンクリー トについては,最高到達温度で 約95℃であったが、圧縮強度に 及ぼす影響はほとんどない結果 となった。

3.2 塩分浸透性

熱電対(図-3中の記号 T)に
より計測した、コア採取位置近
傍のコンクリートの温度履歴
(タイプ1については、T₁と T₂

の平均値)を図-6に,各供試体の塩化物イオン 拡散係数推定結果を図-7に,コア供試体近傍 の最高到達温度と塩化物イオン拡散係数の関係 を図-8に示す。図-7は同一バッチのコンク リートごとにまとめてあり,それぞれのグルー プ中で右側の供試体ほど最高到達温度が高い供 試体である。この図から,早強ポルトランドセ メントを用いた供試体 HC および HM について は,一部例外はあるものの,最高到達温度が高 くなるほど拡散係数は大きくなっており,圧縮 強度に比べ,温度履歴の影響を受けやすいこと がわかる。また,図-7および図-8より,HM のように最高到達温度が 100℃を超えるような 高温履歴を与えると拡散係数は著しく増加して



おり、このような高温履歴は耐久性の観点から 避けなければならないといえる。高温履歴を受 けたモルタル供試体においても塩分浸透抵抗性 が低下していることから、当初予想した粗骨材 とモルタルとの線膨張係数の違いによる骨材界 面のマイクロクラック発生が低下の原因ではな く、高温履歴を受けたことで組織構造自体が変 化したためと考えられる。

高炉スラグ微粉末50%置換早強ポルトランド セメントや高ビーライト系セメントを用いたコ ンクリート供試体 BC や LC では, HC や HM と は異なり,高い温度履歴を受けた方が拡散係数 は小さくなった。これは図-6に示したように, BC, LC の最高到達温度はそれぞれ約80,70℃ であり,この 程度の温度上 昇であれば, 結合材種類が 高炉スラグ微 粉束50%置換 早強ポルトラ ンド モメント や高ビーライ



ト系セメントの場合,かえって水和反応 すなわち組織の緻密化が促進され,拡散 係数としては小さな結果となったものと 考えられる。したがって,高ビーライト 系セメントなど低発熱タイプの結合材使 用により,高温履歴の塩分浸透性への悪 影響を低減できるといえる。なお,これ らの結果は福手ら²⁾の実験結果と同様で あるが,福手らは長期材齢において高温 履歴を受けた供試体はそうでない供試体 に比べ拡散係数が大きくなることを指摘 しており,長期材齢に対する検討も今後は 必要である。

図-9に塩化物イオン浸透深さと通過電 荷量の関係を示す。図-9より,配合 HC やHM では浸透深さと電荷量の関係はひと つの直線関係ではなく,例えばHMの場合, 比較的高温履歴を受けた供試体1S,2Sとそ うでない供試体PM, 1Pの2つのグループに 分かれている。この理由については、現段 階で明らかにすることはできなかったが. 高温履歴がセメントの水和に何らかの影響 を与えたためであると考えられる。通電に よる通過電荷量は、コンクリートの塩分浸 透性を評価する一つの指標に成り得るが, 今回のように高温履歴を与えた供試体を比 較した場合, 電荷量のみでは塩分浸透性を 定量的に評価できない場合があると考えら れる。すなわち、電荷量による評価を行う と危険側の評価を行う可能性があり、本試 験で用いたような塩化物イオンの実際の移



動に基づいた評価が必要であると いえる³⁾。

4. まとめ

高強度コンクリートを対象と した本研究で得られた知見まとめ ると,以下の通りである。

- (1) 本試験の範囲では、早強ポ ルトランドセメントを用いた コンクリートの圧縮強度に及 ぼす高温履歴の影響はほとん どなかった。
- (2) 早強ポルトランドセメント を用いたコンクリートおよび モルタルでは、高温履歴を受 けることで塩分浸透抵抗性が 低下した。ただし、100℃を超 えるような著しい温度履歴を 与えなければ、その影響は小さい。
- (3) 高炉スラグ微粉末 50%置換早強ポルトランドセメントや高ビーライト系セメントを 用いたコンクリートは、高温履歴により水和反応が促進され、本試験の範囲の温度履歴であれば、高温履歴を受けていない供試体に比べ、受けた供試体の塩化物イオン拡散係数は小さくなる結果となった。
- (4) 低発熱タイプの結合材使用など適切な温 度低減対策を実施することで、高温履歴に よるコンクリートの塩分浸透性低下を低減 できる。
- (5) 一般に行われている通過電荷量による塩 分浸透性の評価では適切な判断ができない 場合があり、塩化物イオンの移動を把握し 得る方法で評価することが望ましい。

本検討は,(社)プレストレスト・コンクリート 建設業協会との共同研究「PC 部材の軽量・高耐 久性化に関する共同研究」の一環として実施し たものである。



参考文献

- Rachel J. Detwiler, Chris A. Fapohunda, and Jennifer Natale : Use of Supplementary Cementing Materials to Increase the Resistance to Chloride Ion Penetration of Concretes Cured at Elevated Temperatures, ACI Materials Journal, V.91, No.1, January-February, pp.63–66, 1994
- 福手 勤,守分敦郎,鈴木康範,秋葉泰男, 堀口浩司:水和熱による温度履歴がマスコ ンクリートの力学特性および耐久性に及ぼ す影響,土木学会論文集,No.641,V-46, pp.117-132,2000.2
- 丁 海文,渡辺博志,田中良樹,谷口秀明: 高強度コンクリートの塩分浸透性に関する 研究,第54回セメント技術大会講演要旨, pp.300-301,2000
- 4) 渡辺 豊,河野広隆,渡辺博志:コンクリ ートの急速塩分浸透性試験による塩化物イ オン拡散係数の算定について、コンクリー ト工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.663-668, 2002