

論文 圧縮荷を受けた軽量骨材コンクリートの塩化物イオン透過性

石森 広*¹・斉藤 満*²

要旨：静的および繰返し圧縮荷を受けた軽量骨材コンクリートの塩化物イオン透過性をAASHTO T-277に基づく急速塩化物イオン透過性試験法を用いて検討した。荷重レベル100%に至るまでの静的圧縮荷を受けた軽量骨材コンクリートの塩化物イオン透過性は、荷重無荷荷の場合と大差ない結果となり、115万回に至るまでの荷重繰返しもまた軽量骨材コンクリートの塩化物イオン透過性に大きく影響しないという結果が得られた。これらの結果は、すでに公表した静的および繰返し圧縮荷を受けた普通骨材コンクリートの塩化物イオン透過性とは大きく異なるものであることが明らかになった。

キーワード：軽量骨材コンクリート、塩化物イオン透過性、圧縮荷重荷、残留ひずみ

1. はじめに

コンクリート構造物に加わる荷重の繰返しは、コンクリートの内部に微細なひび割れを生じ、塩分環境下においては、生じたひび割れを通過する塩化物イオンがコンクリート構造物の塩害を促進する可能性がある。Mehtaは、荷重繰返しや凍結融解作用によって生じたマイクロクラックのネットワークを通過するイオンの移動が通常の拡散による移動に比べて極端に大きくなることを指摘している[1]。

コンクリート構造物における塩化物イオンの移動が荷重荷によって容易になる可能性のあることを意識して、著者らは静的および繰返し圧縮荷を受けた普通骨材コンクリートの塩化物イオン透過性を急速塩化物イオン透過性試験法を用いてすでに検討した[2]。この結果によれば、ほんの数万回程度の荷重繰返しでさえ塩化物イオン透過性を著しく増加する場合のあることが明らかになり、さらに荷重後の残留ひずみの大小によって塩化物イオンの透過性を推定することが可能であることが明らかになった。

軽量骨材を用いたコンクリートは、重要な構造物に用いられることが多く、橋梁上部構造などの荷重繰返しを受ける構造物に多くの使用実績がある。軽さを生かした耐震対策という点からも、今後さらに荷重繰返しを受ける重要な構造物への使用は増加するものと思われる。軽量骨材コンクリートを用いた構造物の塩分環境下における耐久性という観点より、荷重荷を受けた軽量骨材コンクリートの塩化物イオン透過性の把握が望まれるところである。

本研究は、圧縮荷が人工軽量骨材コンクリートの塩化物イオン透過性に及ぼす影響に関する基礎的知見を得るために、単調に増加する圧縮荷と荷重波形が正弦波の繰返し圧縮荷を受けた人工軽量骨材コンクリートの塩化物イオン透過性を急速塩化物イオン透過性試験法を用いて明らかにし、すでに報告した同様の圧縮荷を受けた普通骨材コンクリートの塩化物イオン透過性と比較検討したものである。

* 1 金沢工業大学講師 工学部工学設計教育、工修（正会員）

* 2 金沢工業大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

2. 実験の概要

2. 1 使用材料、配合および供試体の作製

使用したセメントは、比重が3.13、比表面積が3,210cm²/gの普通ポルトランドセメントである。軽量骨材は、膨張性頁岩を原料とした人工軽量砂と非造粒型人工軽量粗骨材を使用した。使用に際しては、細粗骨材とともにプレウェットングを行った。軽量骨材の性質を表-1に示す。AE剤として、ヴィンソルレジンを使用した。

実験に用いた軽量骨材コンクリートの配合は、表-2に示すとおりである。コンクリートの練混ぜには、強制練りミキサを使用した。練混ぜの終了したコンクリートは、型枠に二層に詰め、棒状振動機で締固めた。1バッチから3個のφ10×20cm円柱供試体を作製した。

作製した円柱供試体は、打込み後48時間の間温度20℃、湿度85%の恒温恒湿室に静置し、その後材齢28日および35日に至るまで温度20℃の水中で養生した。表-3に、材齢28日と35日の圧縮強度を示す。

表-1 人工軽量骨材の性質

種類	表乾比重	吸水率(%)	粗粒率
細骨材	1.93	7.41	2.63
粗骨材	1.51	19.0	6.43

表-2 軽量骨材コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法(mm)	スランプ(cm)	空気量(%)	W/C(%)	s/a(%)
15	6.0	5.0	55	41
単 位 量 (kg/m ³)				
W	C	S	G	AE剤
174	316	535	601	0.126

表-3 軽量骨材コンクリートの圧縮強度

材 齢 (日)	圧 縮 強 度 (MPa)	供試体数 (個)	変動係数 (%)
28	24.1	6	3.5
35	25.0	6	4.2

2. 2 静的および繰返し圧縮載荷試験

静的圧縮載荷試験には、1,960kN万能試験機を用いた。塩化物イオン透過性の測定は、荷重無載荷供試体と荷重レベルが材齢28日の圧縮強度の50、70、90および100%に達した後に除荷した供試体、総計19個について実施した。なお、ここでいう荷重レベル100%は、圧縮試験中の供試体が最大荷重に達した直後に、供試体を崩壊させることなく除荷したことを意味する。載荷試験の荷重速度は、1.96kN/sとした。載荷試験終了後に2.3節で述べる急速塩化物イオン透過性試験を実施したが、用いた円盤型供試体の材齢はすべて28日である。

繰返し圧縮載荷試験には、196kN疲労試験機を使用した。試験に際しては、荷重波形を正弦波、荷重速度を5Hzとし、上限荷重レベルを材齢28日の圧縮強度の50、60、70および80%の4種とした。下限荷重レベルはすべて材齢28日の圧縮強度の6%とした。繰返し圧縮載荷試験を行った供試体は、総計26個である。周知のように、繰返し載荷試験の実施には、長時間を要する場合がある。しかし、表-3に示すように、本実験で採用した軽量骨材コンクリートの圧縮強度は、材齢28日と材齢35日の供試体間で3.7%の差異があるにすぎないことから、本実験における繰返し載荷試験の開始は材齢28日とし、材齢35日に至る前に試験を終了するものとした。繰返し載荷試験は、供試体の破壊を避けるために所定の繰返し回数の後、中断した。

静的および繰返し載荷試験いずれの場合においても、コンプレッソメータを用いて供試体の軸方向変位を測定し、これより供試体の応力-ひずみ関係を求めた。コンプレッソメータを用いた軸方向変位の測定状況を写真-1に示す。得られた応力-ひずみ関係より、図-1に示す定義に

基づいて荷重試験終了直後の供試体の残留ひずみを求めた。

2. 3 急速塩化物イオン透過性試験

塩化物イオン透過性の測定には、AASHTO T-277に規定する急速塩化物イオン透過性試験法を用いた。この試験方法は、円盤型供試体の端面に接するNaCl水溶液とNaOH水溶液の間に60Vの定電圧を6時間負荷し、供試体中を通過した電気量の大小により塩化物イオン透過性を評価するものである。電気量を測定することから、塩化物イオン透過性を間接的に評価できるにすぎないが、本研究におけるように、一種類のコンクリートにおける荷重載荷の塩化物イオン透過性への影響を検討する場合には、簡便で信頼できる方法であると考えられる。

本研究では、静的および繰返し圧縮荷重試験の終了後、直ちに厚さ5cmの円盤型供試体を円柱供試体の中央部分よりダイヤモンドスラブソーを用いて切り出した。この円盤型供試体を塩化物イオン透過セルにセットし、供試体を流れる電流をデータログを用いて30秒ごとに記録することにより電気量を算出した。なお、実験は、温度20℃の恒温室内で実施した。

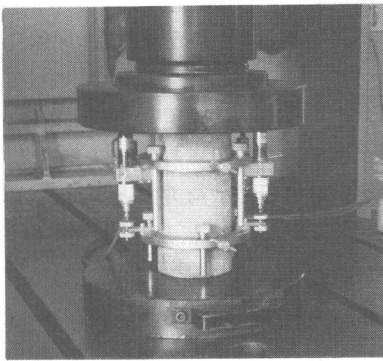


写真-1 軸方向変位の測定状況

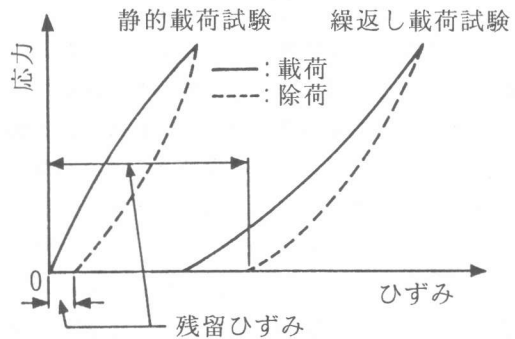


図-1 残留ひずみの定義

3. 実験結果および考察

3. 1 静的圧縮荷重を受けたコンクリートの塩化物イオン透過性

静的圧縮荷重を受けた軽量骨材コンクリートの荷重レベルと電気量の関係を図-2に示す。図には、普通骨材コンクリートの結果[2]をも示してある。図より、軽量骨材コンクリートでは、荷重レベル50%から100%の静的荷重を受けた供試体の電気量が荷重レベル0%、すなわち荷重無荷重供試体のそれとほとんど差異のないことがわかる。軽量骨材コンクリートへの単調に増加する荷重とその後の除荷は、それが最大荷重に至るレベルであっても、その塩化物イオン透過性に影響を及ぼすことのないことが明らかである。普通骨材コンクリートでは、荷重レベル30%から90%までの供試体の電気量は軽量骨材コンクリートと同様に荷重無荷重供試体のそれと大差ないが、荷重レベル100%に達した供試体の電気量は荷重レベル90%の供試体に比べて、1,400クーロン程度大きい電気量となり、この荷重レベルにおいて軽量骨材コンクリートとは異なる挙動を示す。なお、図より、荷重無荷重における軽量骨材コンクリートと普通骨材コンクリート間で電気量1,000クーロン程度の差異のあることがわかる。これは、研究計画立案に際して、軽量骨材コンクリートと普通骨材コンクリートの圧縮強度がほぼ同程度となるように配慮し、水セメント比を軽量骨材コンクリートでは55%、普通骨材コンクリートでは60%としたことによると考える。

普通骨材コンクリートは、静的圧縮荷重を受けると、最大荷重の30%から50%の荷重レベルでボンドクラックがその長さ、幅および数の増加を開始すること、さらに70%から90%までの荷重レベルでモルタルクラックが進展し、ボンドクラックと連結した連続ひび割れパターンを形成することが知られている[3-6]。また、Hsuらは、最大荷重に達した後の普通骨材コンクリート内部にはモルタルクラックとボンドクラックの連結が極めて広範に生ずるという実験結果を示している[3]。一方、軽量骨材コンクリートでは、コンクリートの練混ぜ中に骨材粒子の表面殻内にある外部とつながる空隙にセメントペーストが入りこみ[7]、この結果、モルタル強度より大きい軽量骨材・セメントペースト界面の付着強度が期待できる[8,9]。この軽量骨材コンクリートに静的圧縮荷重が加わると、普通骨材コンクリートに比べてより高い荷重レベルでボンドクラックおよびモルタルクラックの発生・進展が生ずるか[10]、あるいはモルタル部分に最初にモルタルクラックが生じ、そのモルタルクラックが進展して荷重方向と平行に骨材クラックが生ずることになる[11]。

著者らは、本研究で用いたと同様の塩化物イオン透過性試験と供試体を用いて、供試体を貫通する微細ひび割れの存在が塩化物イオン透過性に及ぼす影響の検討を行っており、供試体を貫通するひび割れの断面積と電気量の増加量の関係が直線関係にあることを示した[12]。荷重レベル90%以下の静的荷重が軽量骨材コンクリートおよび普通骨材コンクリートいずれの場合においても塩化物イオン透過性に影響しないのは、生じたボンドクラックやモルタルクラックなどの微細ひび割れが塩化物イオンの透過性に影響しない程度の不連続な状態にあることによると考えられる。荷重レベル100%に至ると、普通骨材コンクリートでは、最大荷重に達した後の微細ひび割れの広範な連結によってひび割れの一部がコンクリートを貫通し、塩化物イオン透過性を増加するようになり、軽量骨材コンクリートにおいては、最大荷重に至っても上述の微細ひび割れが塩化物イオンの透過性に影響するほど連続した状態にならないと考えるのが妥当である。

3. 2 繰返し圧縮荷重を受けたコンクリートの塩化物イオン透過性

表-4は、繰返し圧縮荷重を受けた軽量骨材コンクリートの電気量を示すものである。本研究では上限荷重レベルを50%から80%までの4種類とし、500回から115.3万回に至るまでの繰返し荷重試験を実施しているが、表より、上限荷重レベルや荷重繰返し回数によって電気量に大きい差異の生ずることのないことがわかる。すなわち、上限荷重レベル50%における電気量の平均値は5,803クーロン、上限荷重レベル60%では平均5,782クーロン、上限荷重レベル70%では平均6,013クーロンおよび上限荷重レベル80%では平均5,903クーロンとなり、上限荷重レベルによる差異はほとんどない。各上限荷重レベルにおける電気量の変動係数はそれぞれ7.1%、7.3%、10.3%および5.2%といずれも小さい値を示し、荷重繰返し回数の変化による電気量の変化もまたないと考えるべきである。繰返し圧縮荷重を受けた軽量骨材コンクリートの電気量は、上限荷重

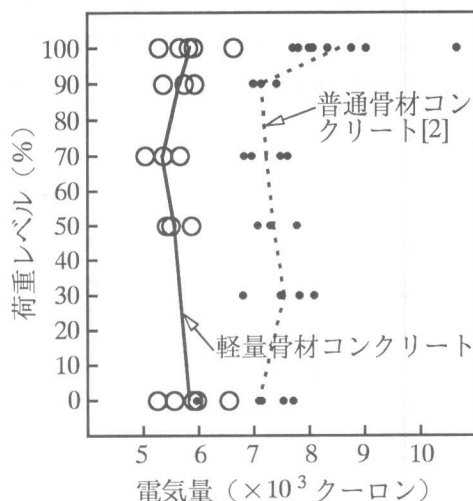


図-2 静的圧縮荷重を受けたコンクリートの荷重レベルと電気量の関係

レベルや荷重繰返し回数に関係なく、荷重無載荷供試体の電気量の平均値である5,829クーロンと大差ない。この結果は、本研究で採用した実験条件の範囲では、軽量骨材コンクリートの塩化物イオンの透過性が繰返し圧縮荷重によって影響されないことを示すものであり、塩分環境下において繰返し荷重を受けた場合の耐久性という点からは、軽量骨材コンクリートは望ましい性質を持つことがわかる。この軽量骨材コンクリートの結果はまた、上限荷重レベル60%以上の繰返し圧縮荷重を受けた普通骨材コンクリートがいずれの繰返し回数においても荷重無載荷供試体の電気量を大きく上回る電気量を示したこと[2]と大きく異なっている。

表-4 繰返し圧縮荷重を受けた軽量骨材コンクリートの電気量

供試体 番号	上 限 荷 重 レ ベ ル							
	5 0 %		6 0 %		7 0 %		8 0 %	
	繰返し回数 (回)	電気量 (クーロン)	繰返し回数 (回)	電気量 (クーロン)	繰返し回数 (回)	電気量 (クーロン)	繰返し回数 (回)	電気量 (クーロン)
1	900	5,436	900	6,297	900	4,940	500	5,403
2	20,000	5,548	4,500	5,399	900	5,988	500	5,646
3	20,000	6,259	20,000	5,169	1,600	5,601	900	5,994
4	40,000	5,647	20,000	5,927	2,800	6,507	900	6,058
5	100,000	6,452	20,000	6,045	3,250	6,441	900	6,155
6	400,000	5,418	100,000	5,857	4,500	5,874	1,000	6,164
7	1,153,000	5,862	—	—	4,500	6,741	—	—

図-3は、繰返し圧縮荷重を受けた軽量骨材コンクリートの電気量と残留ひずみの関係を示すものである。図には、普通骨材コンクリートの電気量と残留ひずみの関係[2]をも示してある。図より、軽量骨材コンクリートでは、残留ひずみの増加によって電気量の増加することのないことが明らかである。これに対して、繰返し圧縮荷重を受けた普通骨材コンクリートの電気量は残留ひずみの増加とともに急激に増加することがわかる。

本実験の範囲で得られた軽量骨材コンクリートの残留ひずみの最大値は、上限荷重レベル70%の荷重繰返し回数4,500回で得られた 695×10^{-6} であり、図-3のAで示される。これとほぼ同一の条件、すなわち上限荷重レベル70%で繰返し回数4,000回と3,300回における普通骨材コンクリートの電気量と残留ひずみの結果は図-3のBとCで示され、コンクリートが繰返し圧縮荷重によって受けたダメージの累積を表す一指標であると考えられる残留ひずみが軽量骨材コンクリートでは普通骨材コンクリートに比べて極めて小さい値となることが明らかである。軽量骨材コンクリートが繰返し圧縮荷重を受けた場合の

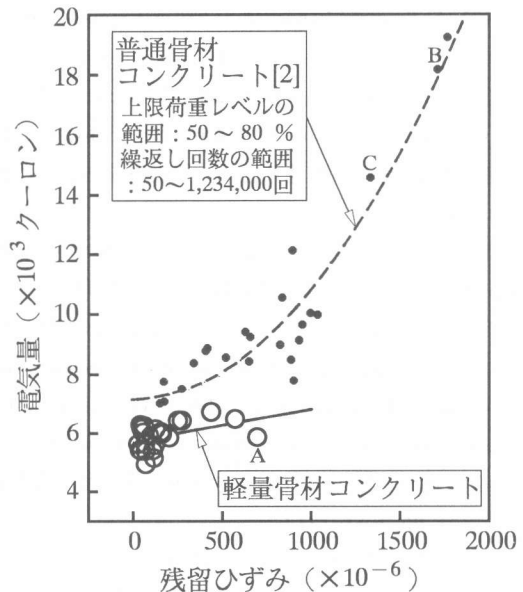


図-3 繰返し圧縮荷重を受けたコンクリートの電気量と残留ひずみの関係

破壊のメカニズム、すなわち微細ひび割れの発生および進展状況に関しては、現在のところ明確ではないが、繰返し圧縮荷荷によって生ずる残留ひずみの小さいことが、換言すれば、残留ひずみが小さくなるような破壊のメカニズムが軽量骨材コンクリートの塩化物イオン透過性が繰返し圧縮荷荷によって増加しないことの一つの理由として考えられる。

4. まとめ

本研究では、静的および繰返し圧縮荷荷を受けた人工軽量骨材コンクリートの塩化物イオン透過性を急速塩化物イオン透過性試験法を用いて検討した。得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 単調に増加する圧縮荷荷とその後の除荷は、その荷重レベルが最大荷重に至るものであっても、軽量骨材コンクリートの塩化物イオン透過性を増加することはない。
- 2) 繰返し圧縮荷荷を受けた軽量骨材コンクリートの塩化物イオン透過性は、上限荷重レベルや荷重繰返し回数に関係なく、荷重無荷荷供試体のそれと大差なく、本研究で採用した実験条件の範囲では、軽量骨材コンクリートの塩化物イオンの透過性が繰返し圧縮荷荷によって影響を受けることはない。この結果は、普通骨材コンクリートの場合と大きく異なる。

【参考文献】

- [1] Mehta, P. K. : Durability of Concrete Exposed to Marine Environment - A Fresh Look, American Concrete Institute, SP 109-1, pp. 1-29, 1988
- [2] Saito, M. and Ishimori, H. : Chloride Permeability of Concrete Under Static and Repeated Compressive Loading, Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 4, pp. 803-808, 1995
- [3] Hsu, T. T. C. , Slate, F. O. , Sturman, G. M. and Winter, G. : Microcracking of Plain Concrete and the Shape of the Stress-Strain Curve, Journal of the American Concrete Institute, No. 60-14, pp. 209-224, 1963
- [4] Shah, S. P. and Chandra, S. : Critical Stress, Volume Change, and Microcracking of Concrete, Journal of the American Concrete Institute, No. 65-57, pp. 770-781, 1968
- [5] Krishnaswamy, K. T. : Strength and Microcracking of Plain Concrete Under Triaxial Compression, Journal of the American Concrete Institute, No. 65-64, pp. 856-862, 1968
- [6] 丹羽義次, 小柳 洽, 中川浩二 : 三軸圧縮応力下におけるコンクリートの破壊過程, 土木学会論文報告集, No. 185, pp. 31-41, 1971
- [7] Zhang, M. H. and Gj ̄rv, O. E. : Penetration of Cement Paste into Lightweight Aggregate, Cement and Concrete Research, Vol. 22, No. 1, pp. 47-55, 1992
- [8] Zhang, M. H. and Gj ̄rv, O. E. : Microstructure of the Interfacial Zone Between Lightweight Aggregate and Cement Paste, Cement and Concrete Research, Vol. 20, No. 4, pp. 610-618, 1990
- [9] Schneider, U. and Chen, S. : The Interface Zone Around Expanded Shale Grain in Hardened Cement Paste, Interfaces in Cementitious Composites, pp. 149-156, 1992
- [10] 小阪義夫, 谷川恭雄 : コンクリートの破壊挙動に及ぼす粗骨材の影響, 日本建築学会論文報告集, No. 231, pp. 1-11, 1975
- [11] Zaitsev, Y. B. and Wittmann, F. H. : Simulation of Crack Propagation and Failure of Concrete, Materials and Structures, Vol. 14, No. 83, pp. 357-365, 1981
- [12] Saito, M. , Ohta, M. and Ishimori, H. : Chloride Permeability of Concrete Subjected to Freeze-Thaw Damage, Cement & Concrete Composites, No. 16, pp. 233-239, 1994