論文　軽量骨材を用いたビニロン繊維補強コンクリートの耐久性に関する研究

國分　達彦[*1]・小山　明男[*2]・菊池　雅史[*3]・三浦　隆広[*4]

要旨：軽量骨材を用いたビニロン繊維補強コンクリートの耐久性について，中性化促進試験，塩分浸透試験，電食実験，乾燥収縮試験，凍結融解試験を行った。その結果，ビニロン繊維の混入によって，軽量コンクリートの塩分浸透および中性化等の耐久性に及ぼす効果の有効性は小さいが，ひび割れ抵抗性については，微細なひび割れに分散され，ひび割れ幅の増大も抑制されることを確認した。

キーワード：軽量骨材，ビニロン繊維，耐久性，錆

1.　はじめに

近年，地球規模の環境汚染や資源枯渇問題が深刻化し，持続的発展が可能な資源循環型社会の構築が不可欠との認識が普及し始めている。多量な資材を消費する建設業においては，建設リサイクル法が 2002 年 5 月に施行されたが，構造物および材料自体の長寿命・高耐久化を行うことも重大な責務である。

このような中，未利用資源や産業廃棄物等を原料とした人工軽量骨材の開発が行われ，これらの骨材を用いた軽量コンクリートは，主にプレキャスト部材として適用されている[1)]。また，この種の骨材は多孔質[2)]なことから断熱性にも優れており，供用期間のエネルギー削減ができる有能な材料でもある。しかし，絶乾密度が 1.0kg/l 未満の超軽量骨材を用いた超軽量骨材コンクリートは，破壊が極めて脆性的であることから，ビニロン繊維を混入することが靭性の改善に有効[3)]である。このビニロン繊維補強コンクリートに関する既往の研究は，力学性能に関する検討は多い一方，耐久性に関する報告例は少ない。

そこで本研究では，各種骨材を用いたビニロン繊維補強コンクリートの耐久性について，中性化促進試験，塩分浸透試験，電食実験，乾燥収縮試験，および凍結融解試験等を行い，その実験結果について検討した。

2.　実験概要

2.1　使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント（28 日圧縮強さ:42N/mm^2, 密度:3.16g/cm^3）を使用した。

骨材は，粗骨材 4 種類，細骨材 2 種類を用いた。骨材種類および主要物性を**表－1** に示す。なお，骨材は表乾（超軽量骨材は 24 時間吸水）状態で使用し，廃ガラス系人工超軽量細骨材（記号 g）を用いる際は，容積比で g1:g2:g3=8:1:1 で粒度調整を行った。

ビニロン繊維は，密度 1.30g/cm^3，繊維径 240×720μm（偏平断面），繊維長 30mm，引張強度 900MPa, ヤング率 29GPa のものを使用した。

混和剤として，高性能減水剤（高縮合トリア

表－1　骨材種類および主要物性

骨材種類		記号	表乾密度 (kg/l)	絶乾密度 (kg/l)	吸水率 (%)
粗骨材	硬質砂岩砕石	N	2.62	2.59	1.1
	膨張頁岩系人工軽量粗骨材	L	1.65	1.30	27.0
	膨張頁岩系人工超軽量粗骨材	S	0.99	0.91	12.5
	廃ガラス系人工超軽量粗骨材	G	0.68	0.61	9.6
細骨材	陸砂	n	2.60	2.56	1.5
	廃ガラス系人工超軽量細骨材	g1	0.74	0.70	8.7
		g2	0.72	0.67	6.6
		g3	0.64	0.59	9.6

*1 明治大学大学院博士前期課程　理工学研究科建築学専攻　(正会員)
*2 明治大学　教授　理工学部建築学科　工博　(正会員)
*3 明治大学　講師　理工学部建築学科　工博　(正会員)
*4 前田建設工業（株）　北海道支店建築部　工博　(正会員)

表－２　試料コンクリートの種類

コンクリート種類		骨材種類		水セメント比 (%)	単位水量 (kg/m^3)	繊維混入率 (%)	中性化促進試験	塩分浸透試験	電食実験	乾燥収縮試験	凍結融解試験
区分	記号	粗骨材	細骨材								
普通コンクリート	Nn	N	n	30	165	0 1 2	○	○	-	-	-
				40	175		-	-	○	○	-
				50	185		○	○	-	-	○
軽量コンクリート1種	Ln	L	n	30	165		-	-	-	-	-
				40	175		-	-	○	○	-
				50	185		-	-	-	-	-
超軽量コンクリート	Sg	S	g1,g2,g3	30	165		-	○	-	-	○
				40	175		-	-	○	○	-
				50	185		-	○	-	-	○
	Gg	G	g1,g2,g3	30	165		○	○	-	-	-
				50	185		○	○	-	-	-

ジン系）または AE 減水剤（リグニンスルホン酸系），および AE 剤（アルキルアリルスルホン酸系）を用いた。

2.2　試料コンクリート種類および調合概略

本研究で作成した試料コンクリートの種類を**表－２**に，コンクリートの調合概略を**表－３**に示す。繊維混入率は，細骨材容積との置換率（%）で表すものとする。以下，コンクリート種類は，粗骨材および細骨材の記号と水セメント比（%）の組み合わせによって表示する（例：Gg50）。

2.3　試験項目および試験方法

(1)　中性化促進試験

試験体は 10×10×20cm の角柱とし，各試験体を炭酸ガス促進養生槽（炭酸ガス濃度 5%，30℃，RH60%）により促進試験した。

(2)　塩分浸透試験

試験体は 10×10×20cm の角柱とし，**図－１**に示すようにかぶり厚さを変えて 4 本の鉄筋（φ13）を埋め込んだ。試験方法は，人工海水（NaCl 3%水溶液）中 12 時間と気中 12 時間の乾湿繰り返しを 1 サイクルとし所定材齢時に塩分浸透深さおよび鉄筋の腐食面積を測定した。

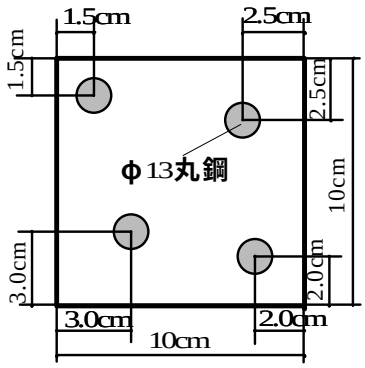
なお，中性化促進試験および塩分浸透試験の試験体は，1 週水中後 1 週気中の養生を行ったのちに試験に供した。

(3)　電食実験

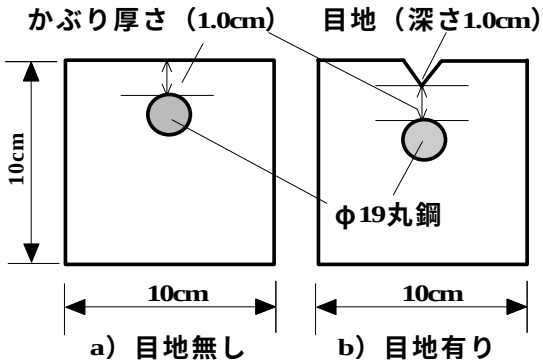
電食実験は，鉄筋腐食にともなうコンクリー

表－３　調合概略

水セメント比 (%)	繊維混入率 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (l/m^3) 水	セメント	細骨材	繊維	粗骨材
30	0	4.5	45	165	174	277	0	339
	1					274	2.77	
	2					272	5.54	
40	0			175	138	289	0	353
	1					286	2.89	
	2					283	5.77	
50	0			185	117	294	0	359
	1					291	2.94	
	2					288	5.88	



図－１　塩分浸透試験体断面



図－２　電食実験試験体断面

トのひび割れに対する，ビニロン繊維の抑制効果の確認を目的として実施した。試験体は 10×10×18cm の角柱とし，**図－２**に示す断面図のようにかぶり厚さ 10mm となるよう鉄筋（φ19）を埋め込み，ひび割れ誘発目地の有るものと無い試験体の 2 種類を作製した。試験体は，**図－３**に示すように NaCl 5%水溶液中に設置し，鉄筋に直流安定化電源から通電した。鉄筋の発錆に伴ってコンクリート表面に生じるひび割れ幅の変化をπゲージにより測定した。

(4)　乾燥収縮試験

試験体は 10×10×40cm の角柱とし，1 週水中後，20℃，RH60%の恒温恒湿室内で乾燥を開始し，JIS A 1129 コンパレーター法により長さ変化の測定を行った

(5)　凍結融解試験

試験体は 10×10×40cm の角柱とし，ASTM C 666 A 法に準じて凍結融解試験を行い，JIS A 1127 により動弾性係数の測定を行った。

なお，それぞれの試料コンクリートの試験項目は**表－２**に示している。

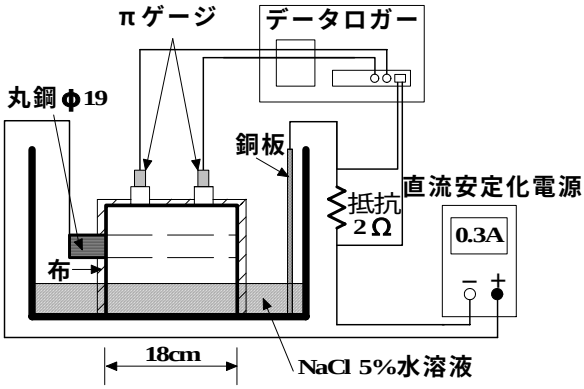
3.　実験結果および検討

3.1　中性化促進試験

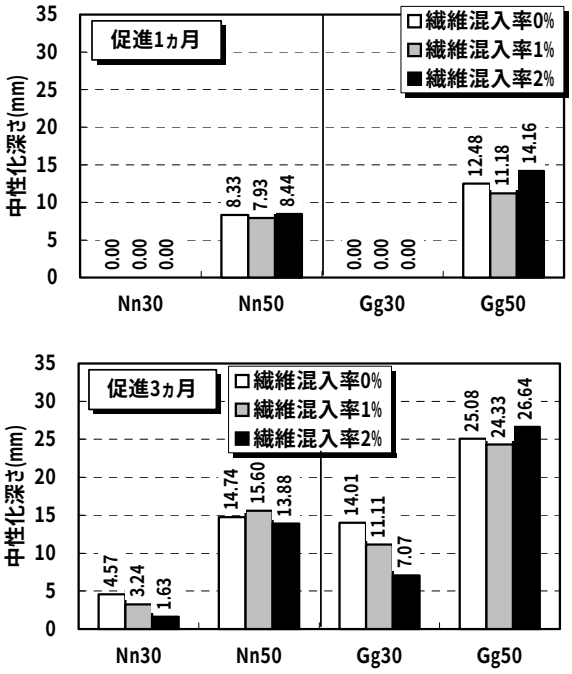
普通コンクリート Nn および超軽量コンクリート Gg の促進 1 ヵ月および 3 ヵ月の中性化深さを**図－４**に示す。中性化深さに及ぼす影響は水セメント比による影響が大きい。廃ガラス系超軽量骨材の密度はかなり小さく，内部組織が粗であるため，コンクリート内部への中性化の進行は普通コンクリートより早い。また水セメント比 30%のものは，繊維混入率が大きくなるにつれて中性化深さが小さい。これは緻密化したマトリックスと繊維との付着が良好となり，繊維混入が有効に働いたものと考えられる。

3.2　塩分浸透深さおよび鉄筋の発錆状況

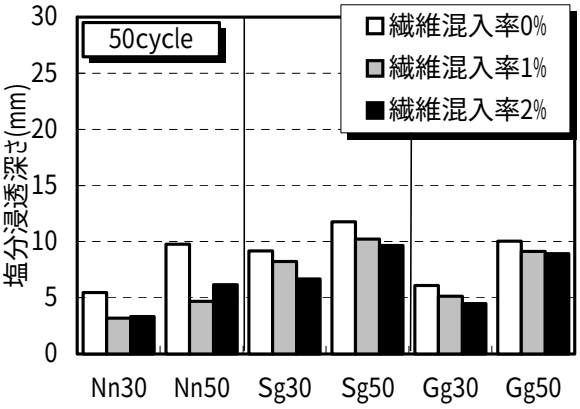
50cycle における各種コンクリートの塩分浸透深さを**図－５**に示す。塩分浸透深さはフルオレセインナトリウム・硝酸銀発色法により測定した。これによると塩分浸透深さは，水セメン



図－３　電食実験装置



図－４　各種コンクリートの中性化深さ

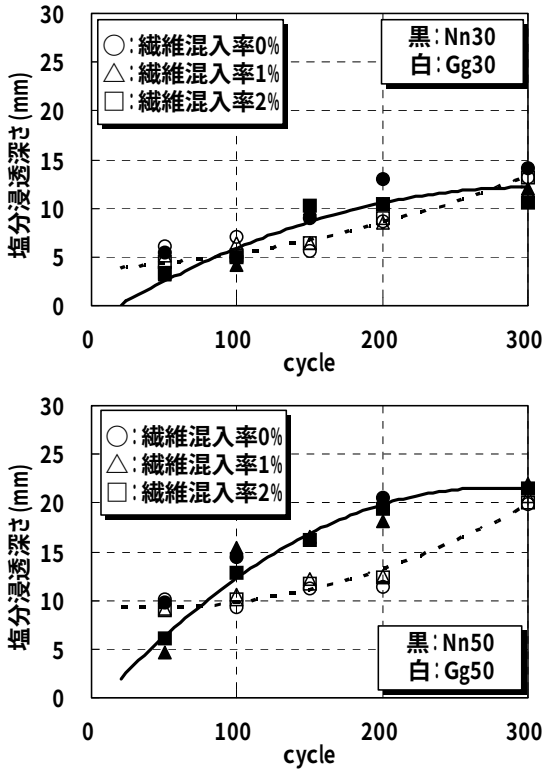


図－５　50cycle における塩分浸透深さ

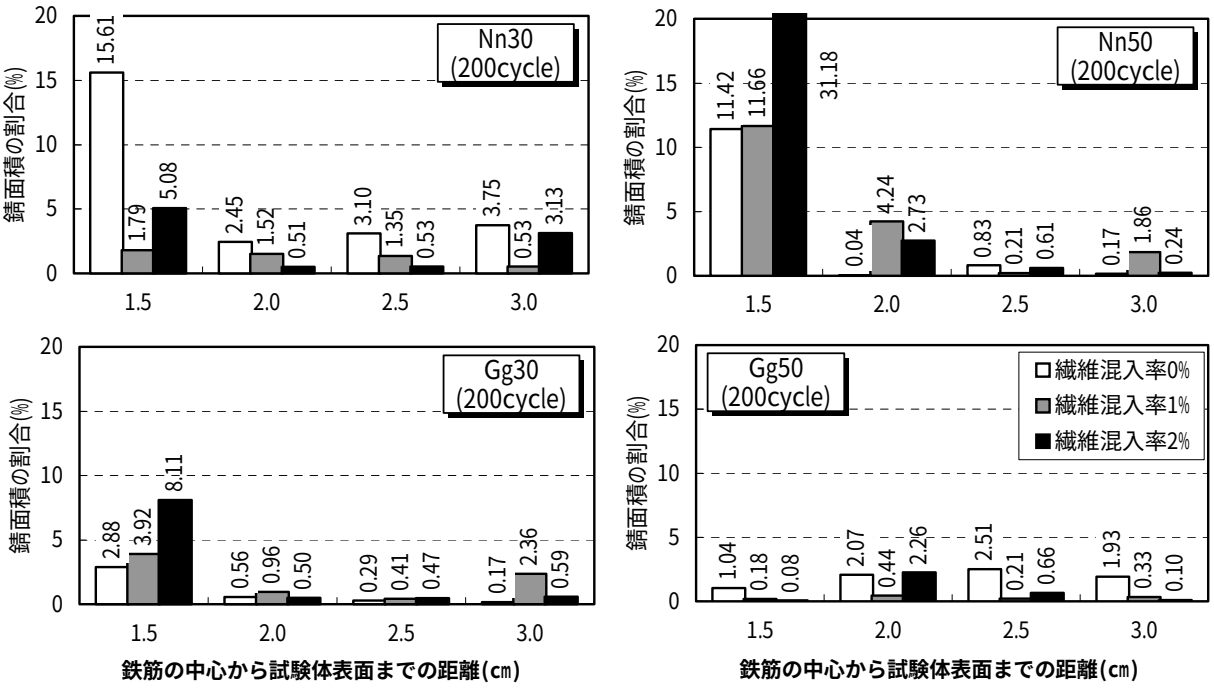
ト比および骨材による影響が大きく，繊維混入によって塩分浸透が抑えられている。

しかし，**図－6**に示す塩分浸透深さとサイクル数の関係によると，サイクルが進むごとに塩分浸透深さは大きくなっているが，繊維混入による効果は小さくなった。また，骨材内部組織の粗な Gg において塩分浸透深さが大きくなると予測されたが，逆に普通コンクリートより塩分浸透深さが進行しにくい傾向にあった。これについては，廃ガラス系超軽量骨材は成分にガラス分を含んでおり，コンクリート骨材として利用するためにアルカリ対策として表面に処理が施されているためと推測できる。

本実験では，試験体内部に埋め込んだ鉄筋を取り出し，鉄筋表面に発錆した面積の割合を求めた。200cycle における鉄筋の発錆状況を**図－7**に示す。これによると，鉄筋の発錆はかぶり厚さによる影響が最も大きい。また，Nn は Gg より鉄筋の発錆割合が大きくなっているが，これは 200cycle における塩分浸透深さが大きい傾向と一致している。なお，繊維混入による影響は，Nn50 および Gg30 では繊維混入率が大きくなるにつれて錆面積割合が大きくなっている。200cycle 時には試験体表面に錆汁が浮き出るほどのひび割れが生じている試験体もあったため，局所的な錆を正確に評価できなかったものと考えられ，今後の課題である。



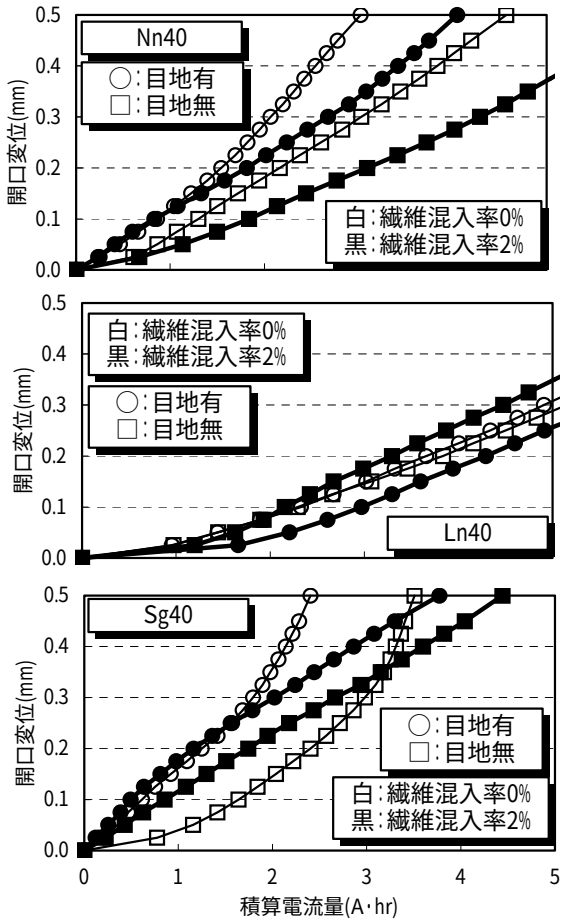
図－6　塩分浸透深さとサイクル数の関係



図－7　200cycle **における発錆状況**

3.3　電食実験

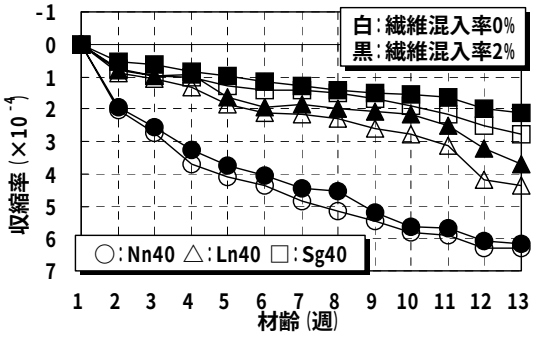
Nn40，Ln40 および Sg40 におけるひび割れ開口変位と積算電流量の関係を**図－８**に示す。積算電流量と錆生成量はファラデーの法則により比例関係にある [4]といわれ，各種コンクリートは積算電流量の増加に伴い，錆が生成され，ひび割れ幅は増大した。繊維混入の影響をみると，Ln40 の目地無のもの以外で繊維混入によってひび割れ幅の増大が抑制されている。特に Sg40 の繊維無混入のものは勾配が急，つまり脆性的にひび割れが発生したが，繊維混入することによって抑えられている。また，目地の有無による違いで比べると，目地有の方がひび割れの進行は早くなるが，繊維混入による効果が若干向上している。これは，目地無の試験体において，繊維無混入のものは 1 本の直線的なひび割れが生じるのに対し，繊維混入したものは細かな複数のひび割れに分散する傾向が観察できたことから，目地を設けることによって目地部分に応力が集中し，繊維混入によるひび割れ抵抗性の効果が明確に現れたものと考えられる。



図－８　開口変位と積算電流量の関係

3.4　乾燥収縮試験

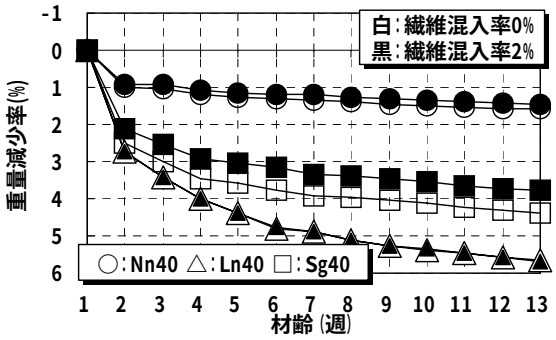
図－９に材齢と収縮率の関係を示す。軽量コンクリートは普通コンクリートに比べて収縮が抑えられているが，Sg40 より Ln40 の収縮率の方が大きい。これは，骨材の吸水率の大きさが原因であると考えられ，**図－１０**に示す重量変化より材齢 13 週（乾燥期間 12 週）の Ln40 および Sg40 はなお水分が発散し続けていることから，より長期の観察が必要と考えられる。また，繊維を 2%混入することで，各種コンクリートの収縮が若干抑えられている。このことについては，繊維による拘束効果が考えられるが，詳細なメカニズムについては今後の課題である。



図－９　乾燥収縮

3.5　凍結融解試験

凍結融解試験における相対動弾性係数を**図－１１**に，重量変化を**図－１２**に示す。超軽量コンクリートは骨材吸水率が大きいため，普通コンクリートに比べて耐凍結融解性に劣る [5]。また，繊維混入率 2%のものは無混入のものより



図－１０　乾燥による重量変化

相対動弾性係数が低くなった。これは，繊維とマトリックスとの間に存在する間隙水による影響などが考えられる。繊維補強コンクリートの耐凍結融解性能を向上させるためには，繊維とマトリックスの付着を高める必要がある[6]といわれ，今後検討が必要である。

4．まとめ

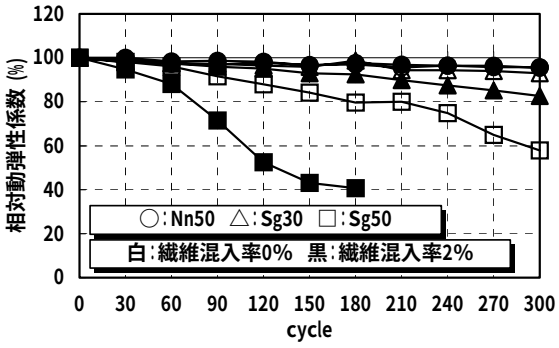
(1) 中性化および塩分浸透は水セメント比および骨材による効果が大きい。また，繊維混入は塩分浸透初期（50cycle）においては有効であるが，長期でみると影響は小さい。

(2) 鉄筋の発錆状況は，かぶり厚さによる影響が最も大きく，塩分浸透深さの傾向と一致した。また，繊維混入によって発錆割合が大きくなるものもあった。

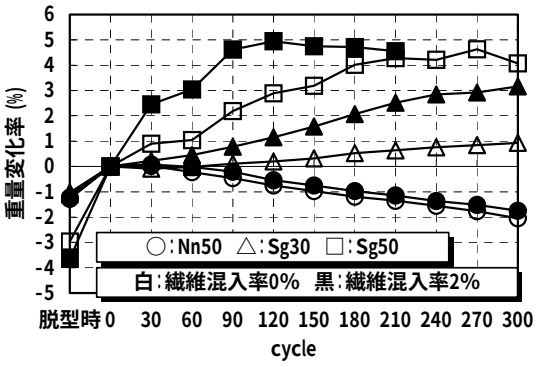
(3) 電食実験から，繊維混入は細かなひび割れに分散させる傾向があり，ひび割れ幅の増大を抑制する。

(4) 軽量コンクリートは普通コンクリートより乾燥初期の収縮が小さい。また，繊維混入することによって若干収縮を抑えられる。

(5) 超軽量コンクリートの耐凍結融解性は，普通コンクリートに比べて劣る。また，繊維混入によって相対動弾性係数は低くなった。



図－１１　相対動弾性係数



図－１２　重量変化

謝辞

本研究に際し日本メサライト工業（株），クリスタルクレイ（株），（株）クラレ，（株）エヌエムビーの各社にご協力いただきました。また，2000～2002 年度本学卒論生にご協力いただきました。ここに深く謝意を表します。

本研究の一部は平成 11～14 年度文部省科学研究費補助金:基盤研究（B）（2）（課題番号:11555153，研究代表者：橘高義典）によるものであり，ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

1) 国府勝郎ほか：委員会報告「高性能軽量コンクリート研究委員会報告」，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.1，pp.1-10，2000

2) 小山明男，菊池雅史，三浦隆広，榎本浩士：高強度軽量コンクリートの細孔構造に関する研究，日本建築学会構造系論文集，516 号，pp.7-13，1999.2

3) 大岡督尚，橘高義典，小林康人，宮下真一：廃ガラス発泡骨材を用いたコンクリート耐震壁の破壊性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.1219-1224，1999

4) 小若正倫：金属の腐食損傷と防食技術，アグネ，1983

5) 洪　悦郎，鎌田英治：人工軽量骨材コンクリート初期凍害，セメント技術年報 28，pp.302-306，1974

6) 石田裕哉，岩瀬裕之，六郷恵哲，小柳　治：鋼繊維混入による軽量コンクリートの耐凍結融解性能の改善，第 7 回コンクリート工学年次論文講演会論文集，pp.237-240，1985