

論文 耐アルカリ性ガラス繊維ネットを使用したコンクリートの耐久性評価

竹下 永造^{*1}・郭 度連^{*2}・杉山 基美^{*3}

要旨：耐アルカリ性ガラス繊維ネットは、耐アルカリ性を付与した連続繊維ネットであり、コンクリート中の所定の位置に埋設し、コンクリートと一体化させた状態でひび割れを制御することが可能となる材料である。しかし、ひび割れを制御するためであるとはいえ、コンクリート中に使用して良い材料かどうかの判断については、コンクリート自身の耐久性確保の観点から確認する必要がある。そこで、耐アルカリ性ガラス繊維ネットの有無を水準としたコンクリートの各種耐久性試験を実施し、比較・検討することで耐久性を評価した結果、耐アルカリ性ガラス繊維ネットはコンクリートの耐久性を阻害しないことが確認された。

キーワード：耐アルカリ性ガラス繊維ネット、連続繊維、耐久性、ひび割れ制御

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の劣化問題を契機とし、コンクリート構造物の耐久性上有害となるひび割れが重要視されるようになり、様々な手法のひび割れ抑制方法が対策として講じられるようになってきた。その中で、耐アルカリ性ガラス繊維ネット（以下 HN と略す）は、ひび割れの発生は許容するものの、耐久性上有害となるひび割れ幅とならないように制御する連続繊維材料として広く使用されている¹⁾。その使用および施工は、写真-1 に示すように、コンクリート打設前の鉄筋に、よじれ・緩み・たわみが無いように設置することを特徴としており、コンクリートの打設と締固めにてコンクリートと HN を一体化させるものである。

一方で、各種基規準や指針によると、コンクリート中に使用される材料は、コンクリートおよび鋼材に有害な影響を及ぼすものであってはならないとされている²⁾。連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針³⁾によると、連続繊維シートにより補修補強された構造物の耐久性能を低下させるほど著しい変化が生じないことが確認されている場合、構造物中の連続繊維シートの劣化を考慮するだけでよいとされている。また、連

続繊維補強コンクリート系構造設計施工指針案⁴⁾によると、連続繊維補強材を用いた鉄筋コンクリート部材の耐久性は、維持管理の有無および程度に応じて連続繊維補強材および鉄筋コンクリートに重大な劣化が生じないものとするとしてされている。このように、本論文にて使用する HN は上記指針に示されている連続繊維シートとは使用用途は異なるが、環境条件や使用条件により発生する各種劣化外力により、コンクリートや構造物に影響を生じないものとしなければならないとされている。

さらに、既往の研究では、白田ら⁵⁾は、連続繊維補強材の耐久性評価に関して実験的検討を行っており、連続繊維補強材の劣化外力や評価方法について検討を行った結果、連続繊維補強コンクリート部材の耐久性状を適切に評価することが極めて重要であるとしている。また、住ら⁶⁾は、ビニロン繊維補強コンクリートの基礎検討として、各種耐久性試験を実施しており、繊維混入によるコンクリートの耐久性は、若干向上するといった報告がなされているが、そのメカニズムは明らかとなっていないようである。

このように、連続繊維である耐アルカリ性ガラス繊維ネットをコンクリート中に使用する際には、使用したコンクリートへの影響を適切に評価する必要があるが、使用方法に応じた耐久性評価手法が確立されておらず、また、連続繊維の有無による耐久性の評価等の既往の研究や知見も少ないのが現状である。そこで、本論文は、耐アルカリ性ガラス繊維ネットを使用したコンクリートの耐久性を評価するため、HN の有無と配合強度を水準としたコンクリートの各種耐久性試験を実施し、その結果を比較・検討し報告するものである。



※白い帯状のものが HN で、鉄筋に設置されている

写真-1 HN の施工例（左：壁、右：スラブ）

*1 太平洋マテリアル（株） 開発研究所 工修（正会員）

*2 太平洋マテリアル（株） 開発研究所 博士（工学）（正会員）

*3 日本電気硝子（株） ガラス繊維事業部 開発部

2. 試験概要

2.1 使用材料の特性とコンクリート配合

(1) 耐アルカリ性ガラス繊維ネットの特性

HN は、数千本の耐アルカリ性ガラス繊維を集束したストランドを網状に織り上げ、浸漬法によってアクリル樹脂を塗布し、乾燥固化させることによって製造したものである。表-1 に HN に使用した耐アルカリ性ガラス繊維の特性を示す。また、使用した HN の外観を写真-2 に示す。写真より、本論文に使用した HN は、一軸配向の連続繊維となっている。

(2) コンクリート材料の特性

表-2 に使用したコンクリートの材料一覧を示す。また、表-3 にコンクリートの配合を示す。コンクリートの目標フレッシュ性状は、目標スランプ $18.0 \pm 2.5(\text{cm})$ 、目標空気量 $4.5 \pm 1.5(\%)$ と設定し、混和剤にて調整した。配合については、配合強度(F_c)を参考に設定した。

2.2 試験水準

表-4 に試験水準を示す。試験水準は、コンクリートの配合強度($F_c=21, 40\text{N/mm}^2$)と HN の有無を組み合わせた 4 ケースとした。

2.3 試験項目

表-5 に試験項目を示す。各種試験方法については、それぞれの規格等に準じて実施した。

2.4 試験体の作製方法⁹⁾

試験体の作製は、各種試験方法の規格に準じて行った。ただし、試験対象面については、 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ 試験体の場合、図-1 に示す通り、試験体の中央に HN を設置し、左右面と側面をシーリングすることで試験対象面を HN と平行面である上下面に限定した⁹⁾。これは、HN の設置に必要である鉄筋の最小かぶり厚さで 50mm を想定し、

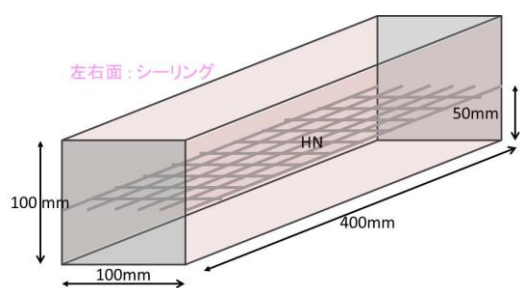


図-1 試験体概要と HN 設置位置

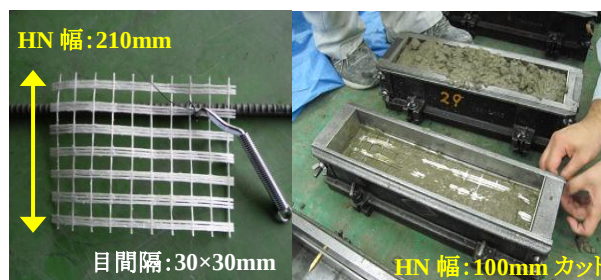


写真-2 HNの外観

写真-3 試験体の作製状況

表-1 耐アルカリ性ガラス繊維の特性

項目	単位	特性値
引張強度	N/mm^2	1500
引張弾性率	N/mm^2	74000
破断時の伸び	%	2
軟化点	$^{\circ}\text{C}$	800
密度	g/cm^3	2.8
熱膨張係数	$\times 10^{-6}/\text{K}$	9.0

表-2 コンクリートの使用材料一覧

材料名	記号	備考
水	W	上水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm^3
細骨材	S	掛川産山砂、表乾密度 2.56g/cm^3 吸水率 2.2%, F.M.2.78
粗骨材	G	桜川産砂岩碎石、表乾密度 2.65g/cm^3 吸水率 0.67%, F.M.6.74
AE 減水剤	Ad	リグニンスルホン酸化合物 密度 1.06g/cm^3

表-3 コンクリートの配合

配合	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)				
			W	C	S	G	Ad
Fc21	68.5	50	185	270	867	894	1.00
Fc40	50.0	50	185	370	826	852	1.37

表-4 試験水準

水準名		配合強度	HNの有無
No.1	Fc21-HN なし	21	×
No.2	Fc21-HN あり		○
No.3	Fc40-HN なし	40	×
No.4	Fc40-HN あり		○

表-5 試験項目

耐久性評価項目	判定項目	試験方法(規格等)
1) 凍結融解抵抗性	相対動弾性係数	JIS A 1148:2010 コンクリートの凍結融解試験方法
2) 透気性(中性化抵抗性)	中性化深さ	JIS A 1153:2012 コンクリートの促進中性化試験方法
3) 透水性	透水量	JIS A 1404:2013 建築用セメント防水剤の試験方法
4) 乾燥収縮特性	長さ変化率	JIS A 1129-2:2010 モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法
5) アルカリ抵抗性	引張強度保持率	NEXCO トンネル施工管理要領:2013 「非鋼繊維品質規格」 ⁷⁾

かつ、適用部材を壁や床のような部材と想定しており、シーリング面からの劣化因子の進行はないと考えたためである。写真－3 に試験体の作製状況を示す。なお、 ϕ 15×10cm 試験体を使用する透水試験用の試験体作製については、3. 試験結果 3.3 コンクリートの耐久性試験 (3) 透水性にて説明する。

3. 試験結果

3.1 コンクリートのフレッシュ性状

表－5 に使用したコンクリートのフレッシュ性状一覧を示す。

3.2 コンクリートの強度試験

表－6 に使用したコンクリートの材齢 28 日における圧縮強度試験結果を示す。

3.3 コンクリートの耐久性試験

(1) 凍結融解抵抗性

図－2 および図－3 に相対動弾性係数（実線）と質量減少率（破線）の経時変化図を示す。また、写真－4 および写真－5 にサイクル数が 300 回を超えた時の試験体状況（Fc21 試験体のみ）を示す。最後に、サイクル数が 300 回を超えた時における相対動弾性係数と質量減少率の結果を表－7 にまとめて示す。

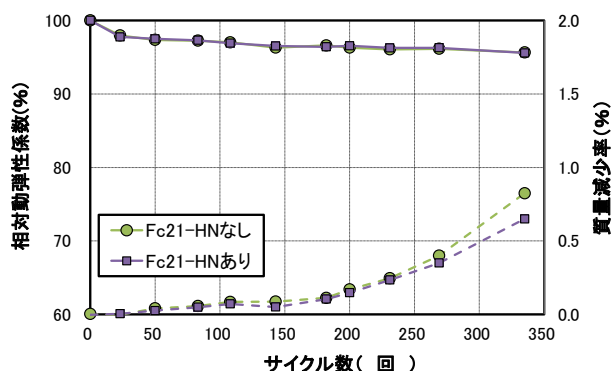
図表より、HN の有無によらず、相対動弾性係数は 60% 以上を満足しつつ、その経時変化は変わらないということが分かった。また、コンクリートの配合強度が変化しても、その傾向は変わらないことが分かった。質量減少率については、相対動弾性係数の結果と同様であり、写真からも判断できるように、HN の有無や配合強度の影響は特になことが分かった。これらの結果をまとめると、HN を使用したコンクリートの凍結融解抵抗性は、それを使用していないコンクリートの凍結融解抵抗性と同様な傾向を示し、HN をコンクリート中に使用することによる凍結融解抵抗性への影響はほぼ無いことが認められた。

表－5 コンクリートのフレッシュ性状

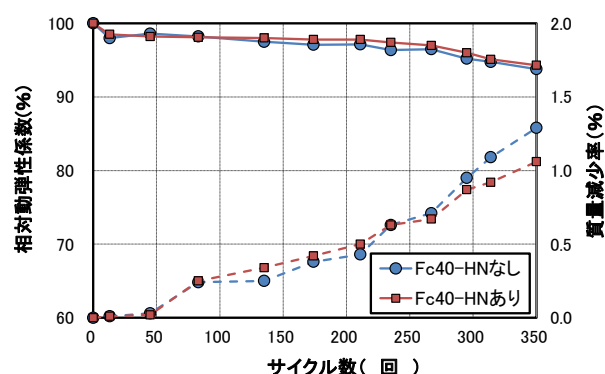
配合	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度(℃)
Fc21	20.0	4.5	21
Fc40	19.0	5.4	21

表－6 コンクリートの圧縮強度試験結果

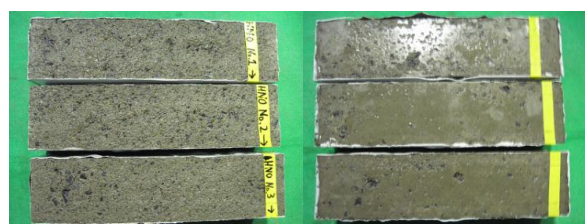
配合	圧縮強度(N/mm ²)			平均値 (N/mm ²)
	No.1	No.2	No.3	
Fc21	25.6	24.7	25.5	25.3
Fc40	42.4	40.8	41.3	41.5



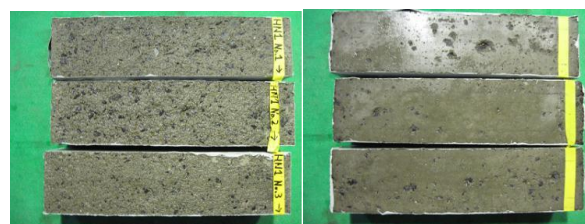
図－2 相対動弾性係数と質量減少率の経時変化図 (Fc21)



図－3 相対動弾性係数と質量減少率の経時変化図 (Fc40)



写真－4 Fc21-HN なし試験体状況
(335 回時、左：打設面、右：型枠底面)



写真－5 Fc21-HN あり試験体状況
(335 回時、左：打設面、右：型枠底面)

表－7 相対動弾性係数と質量減少率の試験結果(サイクル 300 回以上時)

配合	相対動弾性係数(%)		質量減少率(%)	
	HN なし	HN あり	HN なし	HN あり
Fc21	95.6	95.6	0.82	0.65
Fc40	93.8	94.3	1.29	1.06

(2) 透気性(中性化抵抗性)

図-4 および図-5 に促進中性化試験の経時変化図を示す。また、写真-6 に材齢毎のフェノールフタレイン溶液噴霧状況を示す。最後に表-8 に中性化深さの測定結果と中性化速度係数をまとめて示す。(中性化速度係数算出時の相関係数 R も併せて示す)

図表より、HNの有無によらず、中性化深さは変わらないという結果となった。また、コンクリートの配合強度の違いは、中性化深さの進行度(中性化速度係数)に影響を及ぼしているが、HNの有無による変化は特に見受けられなかった。これらの結果をまとめると、HNを使用したコンクリートの透気性(中性化抵抗性)は、促進材齢26週経過後においても、それを使用していないコンクリートと同様な傾向を示し、HNをコンクリート中に使用することによる透気性(中性化抵抗性)への影響はほぼ無いことが認められた。

(3) 透水性

透水試験の試験体概要を図-6 に示す。HNを所定の位置に設置した寸法φ15×30cmの試験体とHNを設置しない寸法φ15×30cmの試験体をそれぞれ3本ずつ作製し、材齢28日まで20℃の水中養生を行った後、ダイヤモンドカッターを用いて底面より10cmの位置で切断し、φ15×10cmの試験体(図-6(カット前)斜線部)とした。試験体は、20℃・60%R.H.の試験室で1ヶ月間乾燥させ、その後、図-6(カット後)の斜線部をエポキシ樹脂でシーリングし、透水試験に用いた。

図-7 に透水試験の経時変化図を示す。また、表-9 に透水量測定結果と透水比を示す。ここで、透水量と透水比については式(1)および式(2)によって求めた。

$$M = m_{48} - m_0 \quad (1)$$

$$P = M_{HN} / M \quad (2)$$

M: 透水量(g)

P: 透水比(48時間後)

m_t : 透水試験終了後(t時間後)の試験体質量(g)

m_0 : 透水試験開始前の試験体質量(g)

M_{HN} : HNを使用した試験体の透水量(g)

M: HNを使用していない試験体の透水量(g)

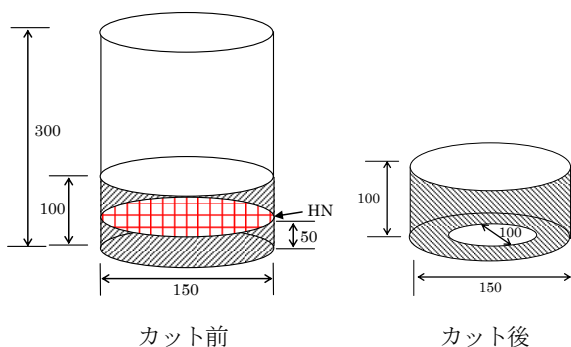


図-6 透水試験体概要(単位:mm)

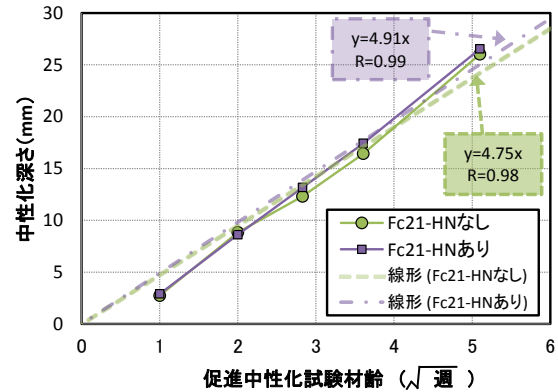


図-4 促進中性化試験の経時変化図(Fc21)

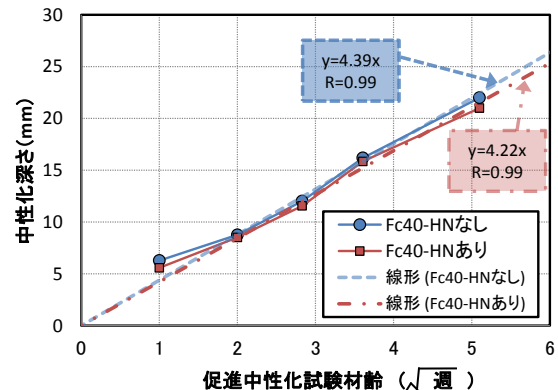


図-5 促進中性化試験の経時変化図(Fc40)

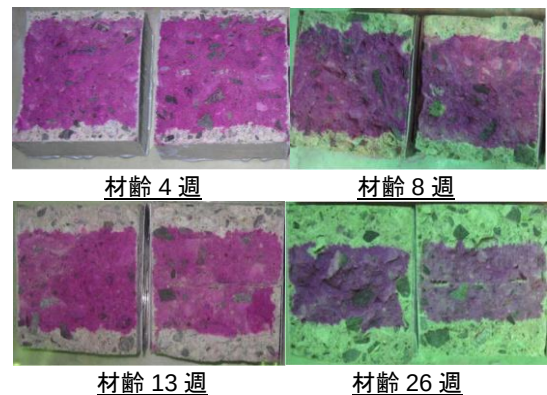


写真-6 Fc21試験体のフェノールフタレイン溶液噴霧状況(左: HNなし, 右: HNあり)

表-8 中性化深さ測定結果と中性化速度係数

材齢 (√週)	中性化深さ(mm)			
	Fc21 HNなし	Fc21 HNあり	Fc40 HNなし	Fc40 HNあり
1.0	2.74	2.90	6.28	5.58
2.0	8.83	8.61	8.77	8.52
2.8	12.31	13.17	12.02	11.55
3.6	16.43	17.43	16.19	15.86
5.1	26.01	26.53	22.00	21.00
中性化 速度係数 (mm/√週)	4.75 (R:0.98)	4.91 (R:0.99)	4.39 (R:0.99)	4.22 (R:0.99)

図表より、HNの有無によらず、透水量は同様であることが分かった。また、コンクリートの配合強度の影響は、透水量の違いに影響を及ぼしているが、HNの有無による変化は特に見受けられなかった。これらの結果をまとめると、HNを使用したコンクリートの透水性は、それを使用していないコンクリートと同様な傾向を示し、HNをコンクリート中に使用することによる透水性への影響はほぼ無いことが認められた。

(4) 乾燥収縮特性

図-8および図-9に長さ変化率の経時変化図を示す。また、表-10に長さ変化率測定結果を示す。図表より、HNの有無によらず、同様な乾燥収縮特性を示すことが分かった。また、コンクリートの配合強度による影響は特に見受けられなかった。これは、単位水量が同量であったことに起因するものと考えられる。これらの結果をまとめると、HNを使用したコンクリートの乾燥収縮特性は、それを使用しないコンクリートと同様な傾向を示し、HNをコンクリート中に使用することによる乾燥収縮特性への影響はほぼ無いことが認められた。ここで、HNによるひび割れ幅の制御に関して、HNのひび割れ抑制メカニズムは、ひび割れ発生後にひび割れ幅が開口していく現象に対して抵抗するものである。そのため、コンクリートの乾燥収縮特性に対して変化を与えるものではなく、さらに、HNの圧縮剛性はほとんどないということも分かる。

(5) アルカリ抵抗性

本論文で使用したガラス繊維ネットは、アルカリ抵抗性に優れたものである。そこで、NEXCO トンネル施工管理要領:2013「8. 非鋼繊維品質規格」に準拠して、アルカリに対する耐久性試験を実施した。また、促進試験での長期的な耐久性確認も含め、70℃のセメント飽和溶液（質量比がセメント1に対して水4を混ぜた溶液でpHは12.5となる）に材齢28日まで浸漬し、浸漬前後のHNの引張荷重を測定し比較を行った。試験に用いた試験片を写真-7に示す。また、セメント飽和溶液浸漬状況を写真-8に示す。最後

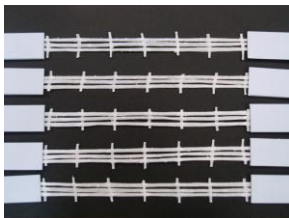


写真-7 試験片



写真-8 セメント飽和溶液浸漬状況



写真-9 引張試験状況

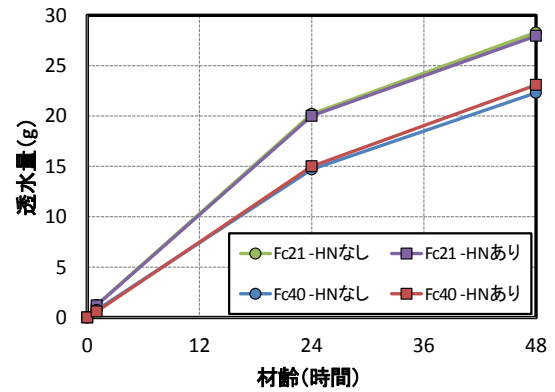


図-7 透水試験の経時変化図

表-9 透水量測定結果と透水比 P

材齢 (時間)	透水量 $m_t(g)$			
	Fc21 HN なし	Fc21 HN あり	Fc40 HN なし	Fc40 HN あり
1	1.24	1.20	0.75	0.60
24	20.21	20.01	14.70	15.01
48	28.30	27.95	22.30	23.09
透水比 P	—	0.99	—	1.04

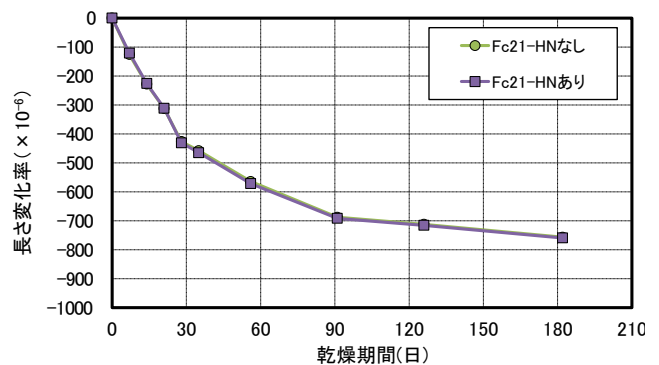


図-8 長さ変化率の経時変化図 (Fc21)

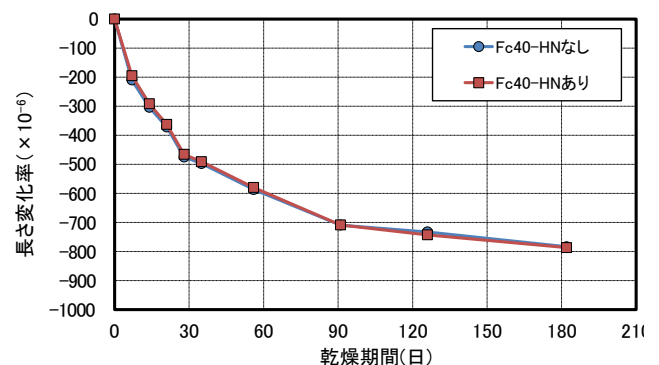


図-9 長さ変化率の経時変化図 (Fc40)

表-10 長さ変化率測定結果

水準名	長さ変化率 ($\times 10^{-6}$)				
	28 日	56 日	91 日	126 日	182 日
Fc21-HN なし	-427	-565	-688	-713	-757
Fc21-HN あり	-431	-572	-692	-716	-760
Fc40-HN なし	-475	-587	-710	-733	-784
Fc40-HN あり	-466	-580	-709	-743	-787

表-11 アルカリに対する耐久性試験結果

アルカリ溶液浸漬前の引張強度 (N/mm ²)	997
アルカリ溶液浸漬後の引張強度 (N/mm ²)	988
強度保持率 (%)	99

に、引張試験状況を写真-9に示す。

表-11にアルカリに対する耐久性試験結果を示す。表より、アルカリ溶液浸漬前の引張強度は 997 N/mm² であり、「NEXCO トンネル施工管理要領:2013」に定められた規格値である 450 N/mm² 以上となった。また、アルカリ溶液浸漬後の引張強度保持率は 99%であり、HN のアルカリ抵抗性は高いことが確認された。また、図-10 に 70℃セメント飽和溶液浸漬後の HN の引張荷重の経時変化図を示す。図より、70℃のセメント飽和溶液に浸漬した影響は見受けられず、引張荷重の減少も確認されなかった。これらの結果をまとめると、HN のアルカリ抵抗性は高く、また、セメント飽和溶液に対する抵抗性も高いことが認められた。

4. まとめ

耐アルカリ性ガラス繊維ネット(HN)を使用したコンクリートの耐久性を評価するため、HN の有無と配合強度を水準としたコンクリートの各種耐久性試験を実施し、その結果を比較・検討することで、以下の知見が得られた。

- (1) 使用した HN によるコンクリートの凍結融解抵抗性への影響は確認されなかった。
- (2) 使用した HN によるコンクリートの透気性（中性化抵抗性）への影響は確認されなかった。
- (3) 使用した HN によるコンクリートの透水性への影響は確認されなかった。
- (4) 使用した HN によるコンクリートの乾燥収縮特性への影響は確認されなかった。
- (5) 本論文で使用した HN は、アルカリ抵抗性やセメント溶液に対する抵抗性が高いことが確認できた。

本論文では、HN を使用したコンクリートの耐久性が、かぶりコンクリートの性能に大きく依存することが分かった。そのため、HN を設置したコンクリートの充填性能や施工性能を確認し、かぶりコンクリートが適切に施工されることに

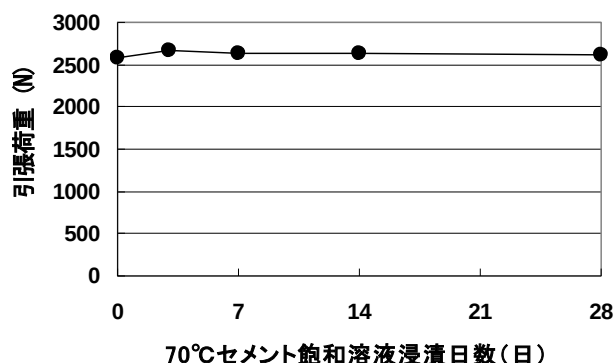


図-10 70℃セメント飽和溶液浸漬後の HN の引張荷重の経時変化図

加え、事前設置した HN が適切な場所でコンクリートと一体化されることを検証する必要がある、今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 竹下永造, 大塚久哲, 李靖: 耐アルカリ性ガラス繊維ネットを用いた鉄筋コンクリート梁のひび割れ抑制メカニズム, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.502-507, 2012
- 2) 日本工業規格: JIS A 5308:2014, レディーミクストコンクリート
- 3) 社団法人土木学会: 連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針, コンクリートライブラリー 101, 2000
- 4) 社団法人日本建築学会: 連続繊維補強コンクリート系構造設計施工指針案, 2002
- 5) 白田太, 棚野博之, 今井章博, 下井大輔: 連続繊維補強材の耐久性評価に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.253-258, 1998
- 6) 住学, 竹内博幸, 中出睦, 谷垣正治: ビニロン繊維補強コンクリートに関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.257-262, 2003
- 7) NEXCO: トンネル施工管理要領 (繊維補強覆工コンクリート編), 8. 非鋼繊維品質規格, 2013.7
- 8) 唐沢智之, 古賀一八, 浦川和也, 河野政典: 仕上塗材の中性化抑制効果と透気性に関する考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.645-650, 2008