

軟質の地盤にあるトンネルコンクリート保護用耐火材の曲げ疲労に関する研究

九州工業大学大学院 学生会員 山口 斉
 九州工業大学工学部 正会員 山崎竹博
 九州工業大学工学部 フェロー会員 出光 隆
 九州工業大学大学院 学生会員 出水陽一

1. はじめに

トンネル内部で、一旦自動車火災が発生するとトンネル内部の温度は 1000°C を超える高温の達し、コンクリートの耐荷力が低下する原因となる。軟質の地盤中にあるトンネルは、コンクリートが地圧を支持するため、火災からの保護目的にトンネル内部を耐火材で覆うといった施工が行われる。トンネル躯体を断熱保護する耐火材は、車両が通過する際におこる風圧（負圧）が繰り返し荷重となって作用する。

耐火材は断熱性能では卓越するが強度が低いため、これらの荷重に対し、疲労性状を考慮してボルト取り付け位置、固定方法等を設計する必要がある。本研究では耐火材の任意形状と取り付け位置との関係に応じた疲労設計ができるように、疲労試験から得られる $S-N$ 線図をもとに耐火材の疲労強度式を算定し、耐火材の疲労特性について把握することを目的とした。

2. 実験概要

2. 1 供試体概要

本実験で使用した耐火材について、製作ロットの違いから A・B の 2 グループに分けて実験を行った。

耐火材供試体はビニロン繊維を製造段階において混入することによって曲げ補強されている材料である。また、繊維混入量は重量比で 1%，空気量は 50% である。

2. 2 実験方法

疲労試験に先立ち、圧縮強度試験、曲げ強度試験を行った。その試験結果を表 1 に示す。

耐火材は繊維補強した材料であるため、求めた曲げひび割れ強度を 100% として、最小応力を曲げひび割れ強度の 10% に固定し、最大応力を変化させ疲労試験を行った。繰返し荷重は 300 回/分（周波数：5Hz）の正弦波荷重とし、オシロスコープにて波形の確認を行った。なお、繰返し回数が 200 万回を超えても破壊しない場合はその時点で試験を終了した。

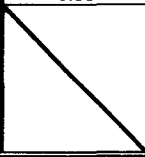
供試体の取り付け方法は、治具との間に 10mm のスペーサーを入れることで、固定部で供試体と治具が接することがないように試験を行った。

3. 実験結果および考察

疲労試験結果を対数正規分布にあてはめて考察するとき、本試験のように少ない標本数であれば、各測定疲労寿命 N までに破壊しない確率、生存確率 $p(N_i)$ を求める必要がある。これに対し、順序統計量の理論を適用し計算で求めた $p(N_i)$ を疲労試験結果とあわせて表 2 に示す。

ここで、A グループは供試体数が各応力比において 1 体ずつしか疲労試験を行っていないので、 $p(N_i)$ は B グループでのみ求めた。

表一1 圧縮・曲げ強度試験結果

供試体 No	最大圧縮応力 σ_c (N/mm ²)	最大曲げ応力 σ_b (N/mm ²)
A-1	6.83	1.78
A-2	7.13	2.29
A-3	6.58	2.46
A-4	7.91	2.46
A-5	7.08	2.29
平均	7.10	2.25
B-1	4.72	2.17
B-2	4.39	2.33
B-3	4.58	2.11
B-4	4.37	1.89
B-5	5.10	2.23
B-6	4.97	2.09
B-7	5.07	1.84
B-8	4.87	1.89
B-9	4.49	2.34
B-10	5.38	1.98
B-11		2.28
B-12		2.15
B-13		2.07
B-14		1.88
B-15		1.96
B-16		2.04
平均	4.79	2.08

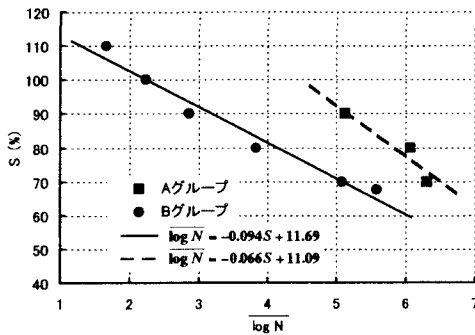


図-1 S-N線図

最大応力比 S と平均疲労寿命 $\log N$ の関係をプロットしたものを図-1に示す。Aグループに関しては3体の試験結果をそのままプロットした。図-1から最大応力比 S_1 と平均疲労寿命 $\log N$ との間に直線関係が認められる。

静的曲げ強度試験より得られた曲げひび割れ応力を100%として、最小応力比を10%に固定して疲労試験を行った結果は、 S_1 - N 線図と N 回疲労強度は表-3に示すようになった。その結果、200万回疲労強度の推定値はAグループで曲げひび割れ強度の72.9%、Bグループで57.0%となり、約15%もの差が生じる結果となった。疲労強度に対し、補強繊維の分散状況の良否が大きく影響を及ぼすものと考えられる。

普通コンクリートでは、コンクリートの配合、試験時材令の差異が疲労寿命に影響することはなく、繰返し応力比が同じであれば、測点はほとんど同一線上にあるとされている。

しかしながら、今回の結果ではAグループとBグループの S_1 - N 線図が大きく異なる結果となった。これは、耐火材供試体内に混入されたビニロン繊維の分散状況の違いが原因と考えられ、繊維分散状況の良否が耐火材の疲労強度に大きく影響する要因であることが分かる。

4. 結論

- (1) 圧縮・曲げ強度試験結果より、耐火材の最大圧縮応力は、製造ロットAでは 7.10N/mm^2 同じく製造ロットBでは 4.79N/mm^2 であり、曲げ強度は、製造ロットAでは 2.25N/mm^2 同じく製造ロットBでは 2.08N/mm^2 であった。
- (2) 補強繊維の分散状況の良否が、耐火材の疲労特性に影響を及ぼすことが分かった。
- (3) 疲労破壊に至るまでの耐火材の劣化の進行は緩やかに進展し、疲労破壊を起こす直前に急激に低下する傾向がみられた。
- (4) 200万回疲労強度に関しては、Aグループに対してBグループが約15%も低くなる結果となった。疲労強度に対しても補強繊維の分散状況の良否が大きく影響を及ぼすものと考えられる。

表-2 疲労試験結果

グループ	S (%)	r	N_r	$\log N_r$	$\rho(N_r)$ (%)
A	10~70	1	2000000→	6.30	
	10~80	1	1175367	6.07	
	10~90	1	134786	5.13	
	16~112	1	287	2.46	
		2	1021	3.01	
	16~132	1	120	2.08	
		2	190	2.28	
B	10~65	1	2000000→	6.30	
		2	2000000→	6.30	
		3	2000000→	6.30	
	10~67.5	1	10131	4.01	85.7
		2	40419	4.61	71.4
		3	86742	4.94	57.1
		4	778967	5.89	42.9
		5	2000000→	6.30	
	10~70	1	13239	4.12	83.3
		2	14723	4.17	66.7
		3	32636	4.51	50.0
		4	57535	4.76	33.3
		5	113505	5.06	16.7
	10~80	1	2330	3.37	75.0
		2	8405	3.92	50.0
		3	15733	4.20	25.0
	10~90	1	419	2.62	75.0
		2	740	2.87	50.0
		3	1250	3.10	25.0
	10~100 (ひび割れ荷重)	1	77	1.89	75.0
		2	144	2.16	50.0
		3	443	2.65	25.0
	10~110 (破壊荷重)	1	24	1.38	75.0
		2	38	1.58	50.0
		3	115	2.06	25.0

表-3 S_1 - N 曲線式と N 回疲労強度

	S_1 - N 曲線式	N 回疲労強度 S_{1N} (%)		
		$N = 10^6$ 回	$N = 2 \times 10^6$ 回	$N = 10^7$ 回
Aグループ	$\log N = -0.094S + 11.69$	77.5	72.9	62.3
Bグループ	$\log N = -0.066S + 11.09$	60.2	57.0	49.6