S8-4-2 カーボン系すり板接着舟体の接着面温度の検討

○森本文子 土屋広志 久保俊一 久保田喜雄 ((財)鉄道総合技術研究所)

Investigation of the Temperature of the Metal-impregnated Carbon Contact Strip with Direct Bonding Method

Fumiko Morimoto, Hiroshi Tsuchiya, Shunichi Kubo, Yoshitaka Kubota (Railway Technical Research Institute)

The authors have examined the direct bonding of contact strip with glue as one of the ways to attach the metal-impregnated carbon strip to pantograph head. For practical application of this method, it is necessary that the base-surface temperature of the strip does not reach the heat-resistant temperature of the glue when the strip is collecting current from the contact wire. In order to investigate the temperature rise of the strip under several conditions, the authors carried out sliding-contact experiments with electrical current and simulated the experiments with Finite Element thermal analysis. According to the results of the experiments and the analysis, the base-surface temperature of the strip during collecting the current in normal application is assumed lower than the heat-resistant temperature of the glue.

キーワード:カーボン系すり板、有限要素法、熱解析 Keyword: metal-impregnated carbon contact strip, FEM, thermal analysis

1. はじめに

カーボン系すり板の舟体への装着方法の一つとして、接 着剤を用いた直接接着法が検討されている。この方法では、 ボルトやさやを用いる従来法に比べて大幅な軽量化が可能 であるが、すり板と取付板の接着面の温度が使用中に接着 剤の耐熱温度に達しないことを確認する必要がある。そこ で、実物を用いた通電摩擦試験およびこの試験を模擬した 有限要素熱解析を行って、すり板の温度特性を検討した。

2. 通電摩擦試験

2.1 試験装置

試験には、パンタグラフと銅製の模擬トロリ線との集電 摩擦が可能な「パンタグラフ総合試験装置」を用いた。試 験台上に設置されたパンタグラフ上を、円周 10m、幅 10mm の銅製模擬トロリ線が取付けられた円盤(直径約 3.2m)が 回転する。トロリ線偏位によるすり板上の接触点移動を模 擬するため、円盤はすり板の摩擦方向と直角に左右動が可 能である。最大通電電流は約 400A、最大摩擦速度は 300km/h、パンタグラフと模擬トロリ線の接触力は 54N で ある。

2.2 供試体

図 1 に試験に用いたすり板体の形状を示す。材質は、す り板が銅含浸カーボンSX801A、取付板がアルミ合金A2017 である。すり板底面と取付板上面はエポキシ樹脂系接着剤 で接着され、その耐熱温度は150℃である。図1に黒丸で示 した12点には、取付板側より直径1mmの穴を開けて熱電 対を挿入した。温度測定点をすり板上面から1mm深さとし た供試体Aと、すり板底面(接着面)とした供試体Bを用 いて試験を行った。

2.3 試験条件および測定項目

表1に試験条件を示す。供試体A、Bに対して同条件の



温度測定点(すり板中心より±5,53,100,134,191,265mm) 図1 直接接着すり板体

表	1	試験条件

試番	電流(A)	摩擦速度 (km/h)	模擬トロリ線 左右動	測定時間 (分)	
1	100			30	
2	200		4115-		
3	300	0	M		
4	400				
5		25		10	
6	400	100	有		
7		300			
8		25		5	
9	0	100	無		
10		300			

試験を行った。模擬トロリ線はすり板中央部で接触するも のとし、左右動のある場合にはすり板中央部を基準位置と した。測定項目は、通電電流、模擬トロリ線の電位、模擬 トロリ線の摩擦速度、模擬トロリ線の左右偏位、すり板温 度および外気温である。また、有限要素解析の境界条件に 用いるために、摩擦速度に応じてすり板中央部における風 速を測定した。サンプリング周波数は、温度と風速は1Hz、 その他は12kHz とした。

2.4 試験結果

(1) 電流および電位

測定結果例として、供試体Aに対する試番4と試番7に おける電流および模擬トロリ線の電位の波形を図3に示す。 本装置では交流電源電流を全波整流して通電電流として用 いているため、すり板と模擬トロリ線が接触して通電して いる場合には図3(a)のような50Hzの全波整流波形が測定



⁽b) 離線時(試番7)図3 電位・電流波形例

表2 離線率と平均アーク電力

試番	供試体 A		供試体 B	
	離線率	$P_{dis}(W)$	離線率	P_{dis} (W)
5	0.028%	3643.7	0%	0
6	10%	4190.7	7%	3406.4
7	26%	3824.4	33%	3915.6

される。電位と電流の比より、すり板とトロリ線との間の 接触抵抗 R_l とすり板内部抵抗 R_2 との和 Rが求められる。 試番 1~4の平均値は、 $R=4.5m\Omega$ であった。なお、 $R_l \gg R_2$ であるため、 $R_l \simeq R=4.5m\Omega$ と見なし、この値を有限要素解 析に用いる。

離線によるアーク放電が発生した試番 5(供試体 A のみ)、 6、7 では、図 3(b)のような電流・電位波形が測定された。 離線時には模擬トロリ線とすり板との間に大きな電位差が 生じ、電流波形が崩れている。一回あたりの離線継続時間 は 2~7ms 程度で、測定時間中、繰り返し定常的に離線が発 生した。定常状態の数分間を対象として、模擬トロリ線電 位がしきい値 V_t=10V を越えた場合を離線と見なして算出 した離線率 rと、離線中の平均アーク電力 P_{dis}を表2に示す。 なお、離線率および平均アーク電力は、対象時間中の測定 データ数 N、そのうち V>V_{th}を満たす測定データ数を N_{dis} として、次式により算出した。

$$r = N_{dis}/N, P_{dis} = \sum_{V_i > V_{ik}} V_i I_i/N_{dis}$$

(2) 摩擦速度、左右動偏位および風速

左右動偏位は、すり板中心を基準位置として+200~-175mm で、その周期は約 27.5 秒である。また、すり板中 央部における風速は摩擦速度に比例し、その比例係数は 0.324 であった。

(3) すり板測定点での温度

図5(a)~(f)に温度分布を示す。試番 1~4 については定常 状態に達したと見られる 30 分後の温度、それ以外の試番に ついては試験開始から 2~3 分後以降の定常状態における平 均温度である。試番 5~7 では左右動範囲の中心からの距離 に換算し、それ以外の左右動のない試番ではすり板中心か らの距離が等しい 2 測定点で平均して示した。なお、外気 温は 30~35℃であった。

最も高温に達した試番 4 においても、すり板中央部での 温度は供試体 A、B でそれぞれ 120℃、100℃で、接着剤の 耐熱温度以下であった。試番 5~7 では、模擬トロリ線の回 転風による空冷効果に加えて左右動により接触点が移動す るため、試番 4 に比べてすり板温度が低かったと考えられ る。従って、左右動があり定常的な離線のない通常の走行 状態では、150℃までには十分な余裕があると考えられる。

3. 有限要素解析

3.1 モデル形状

すり板体の有限要素モデルを図4に示す。左右動がある 場合、模擬トロリ線はすり板上を移動するため各時刻では 左右非対称である。しかし、左右動の周期は測定時間に対 して短いため、すり板上の接触可能領域内に時間的・空間 的に平均してトロリ線が接触するとみなして 1/4 モデルと した。また、すり板と取付板は、実際には接着剤を介した 二物体であるが、簡略化のため接着面において材料定数を 変えた一物体とした。

3.2 物性值

表3に、解析に用いた物性値を示す。SX801Aの比熱、熱 伝導率については、温度依存性を考慮し、密度および抵抗 率は常温における値を用いた。取付板についてはアルミ合 金A2017の常温における値を用いた。



図4 すり板体有限要素モデル

		表3	物性值		
材料名	温度 ℃	密度 kg/m ³	比熱 J/kgK	熱伝導率 W/mK	抵抗率 μΩm
SX801A	25	- 3061	562	13.8	1.4
	300		883	18.7	
A2017 1)	25	2790	837	134	0.582

3.3 境界条件

(1) 電流密度および電位

通電のある試番 1~7 では、模擬トロリ線との接触可能領 域内(面積 S)に一様に電流が流れるとして、*I/S*の電流密 度を課し、取付板底面を等電位 0Vとした。接触可能領域に は、左右動のない場合にはすり板中心線から距離 5mm 以内 の面、左右動のある場合にはすり板中心線から 187.5mm 以 内の面を含む。これらの条件下での電気伝導解析により電 流分布を求め、電流値と抵抗値から算出した内部発熱量を 熱流束として加えることにより通電ジュール熱を考慮する。 (2) 熱流束

模擬トロリ線とすり板の接触面には、摩擦熱および接触 抵抗によるジュール熱が発生する。すり板に流入する単位 時間当たりの摩擦熱 Q_fと接触抵抗ジュール熱 Q_o, は、すり 板への接触時の熱分配率を a₁としてそれぞれ以下のように 表される。

$$Q_{fr} = a_1 \mu P v, \quad Q_{cr} = a_1 R_1 I^2$$

Pは接触力、νは摩擦速度である。今回は摩擦係数の測定は 行わなかったため、SX801A と同種の銅含浸カーボンである PC78A と銅製模擬トロリ線との測定例 20 より、 μ =0.15 と した。電流 Iには測定結果より算出した実効値を用いた。接 触抵抗 R_I には、すり板内部抵抗を無視して試番 $1\sim4$ の平 均値 R=4.5m Ωを用いた。

また、離線中にすり板に流入する単位時間当たりのアーク熱 Q_{ds}は、離線時の熱分配率を α₂ として次式となる。

$$Q_{dis} = a_2 P_d$$

離線率 rの場合、離線中は Q_{dis} 、接触中は $Q_{fr} + Q_{cr}$ がすり 板に入熱する。累積離線時間と累積接触時間の比は r:(1r)であるため、すり板への熱流束として

$q = \left\{ r Q_{dis} + (1 - r) (Q_{fr} + Q_{cr}) \right\} / S$

を課した。なお、すり板への熱分配率 *α*₁、 *α*₂は実験結果を 再現するように決定した。

(2) 熱伝達

熱伝達率は、試番 1~4 では自然対流中の値として 5W/m²K を用いた。試番 5~10 では、強制空冷中の平板の 熱伝達率として、風速測定結果に基づき摩擦速度 25、100、 300km/h の場合にそれぞれ 22、45、78W/m²K を用いた。 雰囲気温度は 30℃とした。

(3) 熱輻射

SX801A の放射率として黒鉛の値 0.78 ³⁾、A2017 の放射 率としてアルミ(普通研磨面)の値 0.04 ⁴⁾を用いた。 3.4 解析試番

表1の各試番を模擬した定常熱伝導解析を行った。加え て、10試番の中では最も実際の使用条件に近い試番6の条 件で、著大な離線率30%(z=0.3)を想定した解析(試番11と する)を行った。解析には汎用有限要素ソフト Marc 5)を用 いた。

3.5 解析結果と実験の比較と考察

図5(a)~(f)に、解析結果の温度分布を実験結果と合わせ て示す。全試番においてすり板への熱分配率 a1=0.08、 a2 =0.15 とした。解析結果の温度分布状態は実験結果をほぼ 再現した。定量的にも図5(b)を除いて大きな差はなく、接 着面では実験を良く再現した。図5(e)に試番 11 の結果を合 わせて示す。すり板中央部における接着面温度は 113℃で、 耐熱温度以下であった。実際の車両走行時には、離線率 30% 程度の離線が定常的に発生することは通常は考え難いため、 すり板の接着面温度が接着剤の耐熱温度に達する可能性は 低いと考えられる。なお、図5(b)で解析と実験が大きな差 となった原因は、実際には非定常現象である離線と左右動 を定常モデルで模擬した影響が、熱流束を与えた面の付近 では無視できなかったためと考えられる。しかし、本解析 では接着面温度を良く再現できたため、接着面温度を評価 する手段として今後有効に活用できるツールと考えられる。

4. まとめ

カーボン系すり板接着舟体の接着面温度を確認するため、 集電摩擦試験および試験を模擬した有限要素熱解析を行っ た。その結果、通常の使用条件下ではすり板の接着面温度 が接着剤の耐熱温度に達する可能性は低いことが分かった。

文献

- アルミニウムハンドブック 第4版、社団法人軽金属 協会編、1990
- S. Kubo and K. Kato, Tribology International 32, 367-378, 1999
- 3) 金属データブック、日本金属学会編、1974
- 4) 伝熱工学資料、日本機械学会、1973
- 5) MSC.Marc2005、日本エムエスシー株式会社



図5 実験および解析によるすり板温度分布