自動車外板パネルのチッピングに及ぼす要因の解析

金丸辰也*, 山崎一正*, 新井勝利*, 山下行秀**

Analysis of Factors Affecting Chipping on Exposed Panels of Automobile

Tatsuya KANAMARU*, Kazumasa YAMAZAKI*,
Katsutoshi ARAI* and Yukihide YAMASHITA**

Chipping on exposed automobile panels was investigated in the laboratory using a gravel-o-meter and a model tester. The results show that upon impact with a flying stone, the force of friction plays a significant part in causing chipping damage to the panel. Finite element computation based on the elastic-plastic deformation model considering frictional force revealed that the paint film suffers more chipping damage than the metallic coating does. This is in agreement with the experimental results of the gravel-o-meter test. Chipping damage is greatly affected by the Young's modulus of the chipping primer. Thus the proposed method is confirmed to be useful for analyzing the chipping mechanism and designing the paint system.

Key Words : Chipping, Finite Element Method, Frictional Force, Chipping Primer, Gravel-o-meter,

1. 緒 言

道路の凍結防止対策として、従来は岩塩などの融雪剤の散布が行われていたが、環境汚染の問題があることから、最近是小碎石の使用が増加してきている。自動車の外板は、この小碎石が飛来し塗膜がはがれる、いわゆるストーンチッピングという損傷を受ける。これは自動車の美的損傷と腐食の発生を促すので、チッピング対策は重要な課題になっている。

ストーンチッピングは衝撃によって複層塗装システムおよびその下のめっき層に応力が発生し、材料の破壊強さを越えとはく離が発生する現象である。有限要素法を適用した応力解析が試みられているが^{1), 2)}、著者らの考えによれば、従来の研究は実際のストーンチッピングを必ずしも代表していない。その理由は、従来の研究では形状が明確に規定できる単純な投射体を用いた実験を基礎にして、塗装板に垂直な対称負荷がかかると仮定して、塗膜にかかる応力分布を計算しているからである。しかし、実際の小碎石の衝撃モードは単純なものではない。そこで本研究では、実際のストーンチッピングに近いと考えられるグラベロ試験でのチッピングはく離状況を観察し、それと類似のはく離を起こす衝撃モードを実験的に確定し、その前提条件のもとに有限要素法を適用して解析する手法を採った。

* 新日本製鐵(株) 名古屋技術研究部 (〒476 愛知県東海市東海町5-3)
Nagoya R&D Lab., Nippon Steel Corp. (5-3, Tokai-cho, Tokai-shi, Aichi 476)
** ホンダエンジニアリング(株) 第三技術ブロック (〒350-13 埼玉県狭山市新狭山1-10-1)
Honda Engineering Co. (1-10-1, Shinsayama, Sayama-shi, Saitama 350-13)

Table 1 Description of specimens used for chipping test.

Material	Cold rolled		Zn or ZnFe coated	
Thickness (mm)	0.7		0.7	
Coating weight (g/m ²)	No		25-70	
Pretreatment	Zinc phosphate			
Paint system*	A	B	C	D
ED primer	Yes	Yes	Yes	Yes
Chipping primer	Yes	Yes	Yes	No
Surfacer	Yes	Yes	Yes	Yes
Topcoat	Yes	Yes	Yes	Yes

*Total paint thickness; 120-170 μm.

2. 実験方法

2. 1 チッピング試験

チッピング試験には小碎石を用いるという点で実際の使用環境に最も近いと考えられるグラベロメーター（スガ試験機(株)製 JA-400S型）を用いた。-20℃の恒温室の中で、JIS 7号碎石（粒径2.5~5mm）50gを空気圧力500kPaで30cmの距離から70mm×150mmの塗装試験片に打ちつけた。投射角度は塗装板面に対し90°および45°である。試験片は表1に示した材料に自動車用塗装系A~Dを施したものをを用いた。

グラベロ試験後の試験片はセロテープで2回浮き上がった塗膜をはく離した後、画像解析装置（(株)ニレコ製 LUZEX-ⅢU型）を用いて中塗り以下の塗膜が露出した箇所を識別し、塗膜はく離個数としてカウントした。各層の露出状態の分別はできなかった。

2. 2 衝撃モデル実験

先端形状が半径5mmの半球状で、重さ5gの鋼製の

投射体を3 mの高さから落下させる方法を用いた。このとき、塗装試験片は水平面に対して30~60°の角度を設けた定盤の上に固定した。衝突時に摩擦力がかかることを想定し、その効果を調べるために、投射体の先端を#80あるいは#400のエメリー紙で研磨したもの、および#400エメリー紙で磨いた上にスピンドル油を塗布した3種類の投射体を用いた実験を行った。

2. 3 解析方法

有限要素法を用いて応力計算を行うにあたり、解析用プログラムとしてはEPIC-IV³⁾を用いた。

塗膜の構成は、10μmのめっき層の上に電着プライマー30μm、チップングプライマー10μm、中塗り40μm、上塗り40μmからなる4層とした。なお、チップングプライマーのない3層構成の解析も一部実施した。解析のための要素を図1に示すが、各要素の厚さは10μmとした。図の↓印部分に表面に対して45°の方向に衝撃力を負荷するものとした。塗膜の-20℃における物性は文献^{1), 4)}を考慮して、図2に示す値を採用した。めっき層のヤング率は合金化溶融Znめっきにおける値294GPaとし、鋼板のヤング率は206GPaとした。

3. 実験結果

3. 1 チッピング試験結果

図3はグラベロ試験結果を塗装システム、鋼板の種類および投射角度についてまとめたものである。はく離個数は塗装システム、鋼板が同一でも投射角度に大きく影

Fig. 1 Finite element grid and direction of imposed force.

Fig. 2 Stress-strain curves and Young's moduli for paints at -20℃ used for computation.

Fig. 3 Number of chipping damage spots at impact angles of 90° and 45° with a gravel-o-meter.

Fig. 4 Effect of coating weight on number of chipping damage spots.
Impact angle; 90°.
Paint system; B. Substrate; ○: ZnFe coated, △: Zn coated, □: cold rolled

響することがわかる。投射角度の効果は塗装システムによって異なっており、塗装系AおよびBでは投射角度45°ではく離しやすく、塗装系Cでは投射角度90°で比較的是く離しやすい。これは塗装システムによっては衝撃力の水平成分が無視し得ない影響を及ぼすことを示している。鋼板に関しては、めっき層の有無の影響は比較的小さい。

めっき層の影響をより詳細に調べた結果が図4であるが、めっき量の影響はほとんどなく、めっき層が柔らかい(ヴィッカース硬度; Hv=50) Zn系めっきと比較的硬い(Hv=250) ZnFe系めっきとの差異も認められない。塗膜厚さの効果を図5に示す。塗膜は厚いほうがはく離を緩和する傾向が見られる。

図6は投射角度90°のグラベロ試験でのチッピング痕の写真である。塗膜ははく離の形態は複雑であり、特に右側は塗膜が垂直にはく離されているのに対して、左側は斜方に破壊されている。図7の断面写真を見れば、塗膜破壊の非対称性は更に明瞭である。これは投射角度90°で衝撃を受けたときでも塗膜中の応力の分布が非対称

Fig. 5 Effect of thickness of paint film on number of chipping damage spots.
Impact angle ; 90°.
Paint system ; B.

Fig. 6 Morphology of a typical chipping damage spot.
Impact angle ; 90°.
Paint system ; D.

であることを示すものである。グラベロ試験で用いられる砕石は必ずしも球形ではなく、重心の周りに自転しながら飛行し、塗膜に衝突する。このことは実際高速ビデオカメラで確認された。このとき塗膜に対して剪断力を及ぼし、応力分布を非対称にすると考えられる。実際の走行中の車に当たる砕石も車輪に跳ね上げられたときに強いスピンをもつことは十分考えられる。投射角度45°で衝突したときには、投射体にスピンのなくても塗膜に剪断力を及ぼす。投射角度45°のときにチップングはく離が激しい塗装システムが存在することを考慮すれば、衝突時の剪断力がチップング機構に重大な影響を及ぼしていることが示唆される。

3. 2 衝撃モデル実験結果

衝突時に塗装板にかかる剪断力の効果を評価するために、スピンの代わりに衝突時の摩擦力を変化させたモデル実験を行った。その結果を図8に示す。先端粗さの同じ投射体を当てた場合、投射角度が小さくなるに従って

Fig. 7 Cross-sectional view of chipping damage spot shown in Fig. 6.

Fig. 8 Effects of impact angle and frictional force on chipping damage length.

はく離長さは小さくなるが、はく離長さを衝撃力の垂直成分で補正すれば、逆に投射角度とともに大きくなる。これは衝撃力の水平成分および摩擦力がチップングに影響を及ぼしているからである。投射体の先端を#80エメリー紙で研磨して粗くした、すなわち摩擦係数の大きい場合には、はく離長さが最も大きく、次いで#400エメリー紙で研磨した場合、油を塗布した場合と、摩擦係数の低下とともにはく離長さが減少している。実際のストーンチップングにおいても砕石は回転しており、表面粗さがあるので、衝突時に塗膜に摩擦力を及ぼすであろう。この摩擦力が塗膜はく離に重大な影響を及ぼしていることが推察される。

4. 解析および考察

4. 1 解析条件

飛来物が衝突したときパネルに摩擦力を及ぼすことは従来の有限要素法による解析には考慮されなかった要因である。摩擦力を考慮すれば、チップング現象はプレス成形における摺動の問題と類似の静的な弾塑性変形問題として扱うことができる。そこで、衝撃の負荷力と摩擦係数がわかれば、塗膜の各層に働く応力分布を有限要素法を用いて解くことができる。ヤング率の変化によって層間に応力が集中するとき、最も弱い界面がはく離する。

従って、界面間の剪断応力の大きさにでチップングはく離の発生傾向を評価することにした。

衝撃の負荷力は実験で求めることが困難なので、以下に述べる根拠で設定した。すなわち、飛来してくる石の中で塗膜はく離を起こす最も軽い石の質量を、グラベロメーターで用いられる碎石を考慮して、0.1gとする。衝撃速度は、50km/hで走行している車が石を跳ねあげ、これが対向車に衝突したとすると相対速度は100km/h (27.8m/s) であるため、この値を採用する。外板パネルにかかる力 F は、反発係数を ρ 、衝突時間を t 、投射体の質量を m 、速度を v とすると、力積と運動量の変化の関係から、

$$Ft = (1 + \rho) mv$$

となる。ここで、反発係数 ρ と反発に要する時間 t が不明であるが、反発係数は0.5と仮定し、また、反発に要する時間は数十から100 μ sと考えられるので^{1), 2)}、ここでは100 μ sとする。以上の仮定から、 $F=41.7$ Nとなる。図2から塗膜の破断強度は30~60MPaであり、接触面積が小さければ、この力でも塗膜の破壊を起こすに十分であることがわかる。実際の解析では、はく離初期の傾向を把握することに主眼を置き、 $F=20$ Nとした。

摩擦係数に関しては、図9に示すように、摩擦係数 $\mu=0.9$ とした場合、剪断応力-投射角度曲線形が図8の#80エメリー紙研磨の曲線形に似ており、実際のチップングにおいても起こり得ると考え、この値を採用した。

4. 2 剪断応力分布

図10、図11にチップングプライマーなし、ありの場合の剪断応力 τ_{xy} の分布を示す。図中の各節点の変位は実際の値を20倍に拡大して表示してある。図10から、チップングプライマーがない場合には、図中に●印で示

しためっき層/電着プライマー間、電着プライマー/中塗り間に剪断応力の高い部分が発生することがわかる。これは、上塗り/中塗り間ではヤング率の差が少ないのに対し、電着プライマー/中塗り間、電着プライマー/めっき層間でのヤング率の差が大きく、ヤング率の差の大きな部分に大きい剪断応力が作用するためである。これに対し、図11のようにチップングプライマーがある場合には、電着プライマー/めっき層間に高い剪断応力は作用していない。柔らかいチップングプライマーが変形を吸収し、剪断応力がこの層より下に作用することを防いでいる。従って、チップングプライマーのような柔らかい層の存在により、めっき層/電着プライマー間あるいは電着プライマー/中塗り間のはく離が抑制できると言える。

Fig. 10 Shear stress distribution across layers without a chipping primer.

Fig. 11 Shear stress distribution across layers with a chipping primer.

Fig. 9 Effects of impact angle and coefficient of friction on shear stress at interface between ED primer and surfacer.

Fig. 12 Effect of thickness of coating layer on shear stress acting around coating layer.

Fig. 13 Effect of Young's modulus of chipping primer on shear stresses acting across various layers.

剪断応力は塗膜表面で最も高く、表面から遠ざかるに従い減衰している。図5で塗膜が厚いほどはく離が抑制される傾向が見られるのはこのためである。

4. 3 めっき層厚さの影響

図12にめっき層の厚さを10~20 μm の範囲で変化させたときのめっき層/電着プライマー間、鋼板/めっき層間に働く剪断応力の変化を示す。めっき層/電着プライマー間の剪断応力はめっき層厚さが増加してもほとんど変化しないが、鋼板/めっき層間の剪断応力はめっき層厚さが増加するに従いわずかに減少する。このことは、めっき層の厚さが厚いほどめっき層はく離しないこと、すなわち地鉄の露出が少ないことを示している。しかし、この図に見られる剪断応力の変化は0.2MPa程度であり、後述するように塗膜物性を变化させたときの層間の剪断応力の変化に比べて小さい。このことから、めっき層の厚さが耐チップング性に及ぼす影響は小さいと判断できる。図4に示したグラベロ試験結果はめっき層界面でのく離に特定しているわけではないが、全くく離に対してめっき層界面が関与する効果が小さいという点で解析結果と一致している。

4. 4 チッピングプライマーの効果

図13にチップングプライマーのヤング率を変化させたときの各層間に働く剪断応力の変化を示す。チップングプライマーのヤング率を上げてゆくと、鋼板/めっき層間、めっき層/電着プライマー間の剪断応力は上昇する。これに対し、上塗り/中塗り間の剪断応力は減少する。このことから、チップングプライマーのヤング率が上昇するに従い、鋼板/めっき層間、めっき層/電着プライマー間ではく離しやすくなるのがわかる。

図14にチップングプライマーの厚さを変えたときの各層間の剪断応力の変化を示す。チップングプライマーが厚くなるに従い、鋼板/めっき層間、めっき層/電着プライマー間の剪断応力はわずかに減少するが、中塗り

Fig. 14 Effect of thickness of chipping primer on shear stresses acting across various layers.

／上塗り間の剪断応力は大きくなる。これは、チップングプライマーが厚くなるに従い変形量が大きくなり、かえって中塗り／上塗り間の剪断応力が増加するためである。従って、チップングプライマーを厚くしすぎると、中塗り／上塗り間でのく離を引き起こしやすくなる。

以上のように、チップングプライマーの物性、厚さを変えたときの剪断応力の変化は、めっき層厚さを変えたときの变化に比べて大きく、耐チップング性には塗膜の効果のほうが大きいと言える。また、塗膜の厚さの影響よりもヤング率の影響のほうが大きいと言える。

5. 結 言

自動車外板パネルの受けるチップング機構に関して、グラベロ試験での塗膜はく離状況の観察と衝撃モデル実験の結果から推定して、飛来する碎石が衝突する際に摩擦力が作用し、この摩擦力が塗膜はく離に影響を及ぼしている。摩擦力を考慮した弾塑性変形モデルによって塗膜中の剪断応力分布を有限要素法を用いて計算した結果、チップングに対してめっき層よりも塗膜の影響が大きいなど、グラベロ試験の結果をよく説明できる。特にチップングプライマーのヤング率の影響が大きいことがわかり、本方法はチップング機構の解析、塗膜の設計に有効な手段であることが確認された。

(Received July 3, 1995; Accepted September 1, 1995)

文 献

- 1) M. Oosterbroek; 13th Int. Conf. Org. Coat. Sci. Technol., p. 287 (1987)
- 2) A. C. Ramamurthy, W. Lorenzen and A. M. Rajendran; Polym. Mat. Sci. Eng., 67, 43 (1992)
- 3) 山田嘉昭, 横内康人; 有限要素法による弾塑性解析プログラミング-EPIC-IV解説(培風館, 1981)
- 4) 岩戸 進; 塗装工学, 23, 304 (1988)