

建設機械用ゴム材の耐カット性の評価

河原荘一郎¹・室 達朗²

¹正会員 工博 松江工業高等専門学校助教授 土木工学科 (〒690-8518 松江市西生馬町 14-4)

²フェロー 工博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町 3)

ダンプトラックやホイールローダの OR タイヤは、転石や岩砕による偶発的なカットが原因で廃棄される割合が大きい。カットをできるだけ抑制し、完摩に至らせることで、OR タイヤに代表されるゴム製の足回りの寿命は大きく向上する。ここでは、建設機械用ゴム材の耐カット性を解明することを目的とした。そのため、新たに製作した試験装置を使用し、転石や岩砕に見立てた切断刃の刃物角およびゴム厚の条件を組み合わせ、代表的な耐摩耗性ゴム材からなる試験片に対する静的および動的切断実験を行い、ゴム材の耐カット性を定量的に評価した。さらに、静的と動的切断の関連性、耐摩耗性にもバランスのとれたゴム材についても言及した。

Key Words : rubber, cutting, OR tire, construction machinery, laboratory experiment, static, dynamic

1. まえがき

今日、ダンプトラック、ホイールローダ、ブルドーザ等の土工機械が、様々な施工現場で使用されている。こうした土工機械の足回り(OR タイヤ、ゴム製履帯)に使用されているのが耐摩耗性ゴムである。

土工機械の足回りには、4 つの大きな機能がある。それは、(1)荷重を支える、(2)駆動・制動力を路面に伝える、(3)路面からの衝撃を緩和する、(4)方向を転換・維持することである。これらの機能を十分に満たした上で、過酷な路面での使用に対してゴム材の寿命を向上させることが、さらに求められる課題である。このことは、施工計画の合理化やコスト削減に大いに役立つ。

耐摩耗性ゴム材、特に OR タイヤの廃棄原因は、大きく3つに分けられる。それは、(1)稼働条件に適合した耐摩耗性ゴム材を選定しなかったために、ゴム内部が発熱して起こるもの、(2)走行路面にある障害物によって発生するカットバースト・ショックバースト等、(3)摩耗によってタイヤの寿命を全うする完摩によるものに分類される¹⁾。

例えば、ある鉱山での45トン積み重ダンプトラック用 OR タイヤの廃棄原因の内訳は、完摩46%、カットバースト36%、トレッドセパレーション8%、ショックバースト5%、サイドカット2%、その他2%となっている²⁾。また、ダム建設現場での OR タイヤでは、完摩21%、カット48%、カットバース

ト17%、トレッドセパレーション7%、その他7%となっている³⁾。

完摩については、種々の原材料からなるゴム試験片に対するアブレイブ摩耗試験結果により、天然ゴムおよびイソプレンゴムが耐摩耗性に優れていること⁴⁾を既に明らかにした。

完摩を除くと、廃棄原因は転石や岩砕によるゴム材のカットが引き金となることが多い。カットは偶発的に起こるので、完摩よりも OR タイヤの寿命が短く、またそのばらつきも大きい。乗用車用タイヤでは、ほとんどが完摩により廃棄されるのに対し、OR タイヤはカットにより廃棄されるものが多いか、現場路面や使用条件の過酷さを意味している。カットをできるだけ抑制し、完摩に至らせることで、OR タイヤに代表されるゴム製の足回りの寿命は大きく向上する。しかし、ゴム材にカットが発生するメカニズムに関する研究は、ほとんどなされていない。

ここでは、建設機械用ゴム材の耐カット性を解明することを目的とした。そのため、新たに製作した試験装置を使用し、転石や岩砕に見立てた切断刃の刃物角およびゴム厚の条件を組み合わせ、代表的な耐摩耗性ゴム材からなる試験片に対する静的および動的切断実験を行い、ゴム材の耐カット性を定量的に評価した。さらに、静的と動的切断の関連性、耐摩耗性にもバランスのとれたゴム材についても言及した。

表-1 ゴム供試体の性状

供試体	原材料	H_s	E_b (%)	T_b (MPa)	T_r (kN/m)
A	NR/SBR	63	573	20.8	64.4
B	NR/SBR	55	635	23.5	40.2
C	NR/SBR	70	541	22.0	69.6
D	NR	63	575	23.4	94.1
E	SBR	63	679	22.3	45.1

H_s : ゴム硬さ E_b : 伸び T_b : 引張強さ T_r : 引裂強さ

2. 実験装置および方法

(1) ゴム供試体

土工機械の足回りとして、ゴム材には耐摩耗性と耐カット性の両者に優れていることが要求される。一般に天然ゴム(NR)は耐摩耗性に優れているが、耐カット性には劣る。一方、スチレンブタジエゴム(SBR)は耐カット性に優れているが、耐摩耗性には劣るといわれている。そこで、両者のゴム材を経験的にブレンドして使用しているのが現状である。

ここでは、ゴム供試体として表-1 に示す代表的な耐摩耗性ゴム 5 種類を使用した。ゴム供試体 A, B, C は天然ゴム(NR)を主としてスチレンブタジエゴム(SBR)をブレンドしたもの(NR/SBR)で、ゴム硬さ H_s を変化させている。ゴム供試体 D, E は NR, SBR であり、原材料の影響を調査するためゴム硬さ $H_s=63$ に揃えている。ゴム供試体は切断幅 50 × 長さ 100 mm であり、厚さを $t=10, 20, 30, 40, 50$ mm の 5 通りに変化させた。

(2) 切断刃

土工機械の足回りとしてのゴム材のカット現象は、路面に点在する転石や岩砕によって発生することが多い。しかも、その先端角度が鋭利なほどカットが入りやすい。

ここでは、ゴム材のカット現象を基本的に再現するため、転石や岩砕に見立てた鋼製(SS400)の切断刃を使用した。切断刃は、刃幅 100 × 長さ 80 × 厚さ 16 mm であり、刃物角を $\theta = \pi/6, \pi/4, \pi/3, 5\pi/6, \pi/2$ rad の 5 種類に変化させた。

(3) 静的切断実験

ゴム材の耐カット性を評価するための標準的な試験法は特にないので、ゴム材の静的・動的カット現象を基本的に再現する実験装置を新たに製作した。

図-1 に示すゴム供試体の静的切断実験装置は、アムスラーの下部昇降台が上昇することにより、切断刃に荷重を与え静的にゴム供試体を切断する機構である。

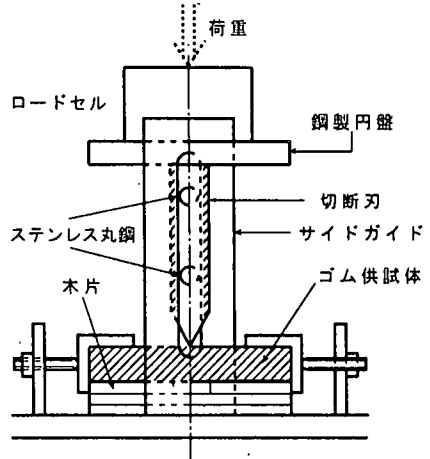


図-1 ゴム供試体の静的切断実験装置

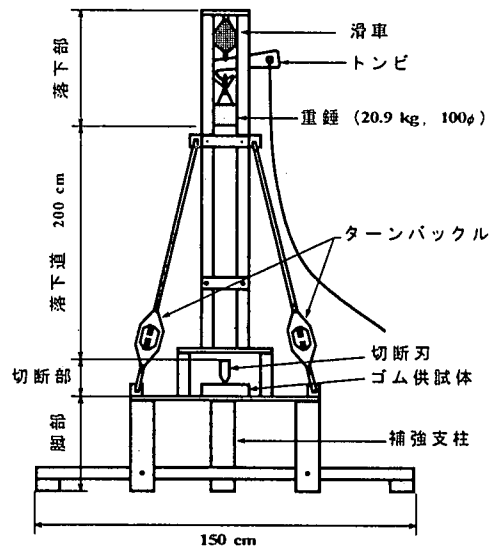


図-2 ゴム供試体の動的切断実験装置

切断刃の回転を防止し鉛直方向への貫入を保つため、切断刃の側面に装着された左右各 2 本のステンレス製丸鋼(直径 8 mm)がサイドガイドの鉛直溝を滑っていく構造となっている。ゴム供試体の両端は固定されている。さらに、ゴム供試体の下部には 3 層からなる木片(層厚 10 mm)を設置して刃先を保護しており、刃先が当たる部分(幅 20 mm)は実験毎に交換した。

垂直荷重はアムスラーの下部クロスヘッドと切断刃の間に装着したロードセル(20 kN 用)により、切断刃の貫入量は変位計により測定した。切断刃の貫入速度は約 0.2 mm/s に設定した。

(4) 動的切断実験

土工機械の足回りとしてのゴム材には、路面の凹

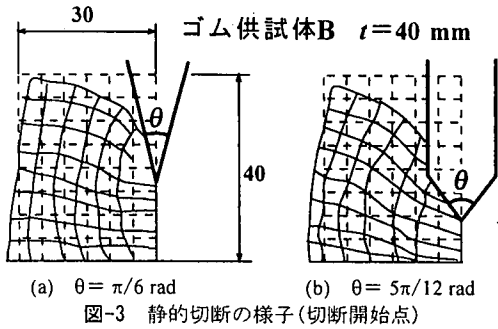


図-3 静的切断の様子(切断開始点)

凸や急発進・急加速による衝撃が加わることが多い。したがって、その衝撃力によってゴム材にカットが入ることが、むしろ静的な外力によるものよりも多いと考えられる。

図-2 に示すゴム供試体の動的切断実験装置は、重錘の自由落下時の衝撃力によりゴム供試体を切断する機構である。脚部を含めた全高は約 4 m であり、標準貫入試験で使われるトンビの紐を引張ると重錘(質量 $M=20.9$ kg, 直径 100 mm の鋼製円柱)が最高約 2 m の高さより自由落下する。

4 本の支柱からなる落下道は、ターンバックルにより鉛直性を微調整することができる。厚さ 9 mm の鋼製台の上にはゴム供試体と切断刃がセットされており、細部は静的切断実験装置と同じものである。

また、切断刃に衝撃力を確実に伝えるため、鋼製円盤(厚さ 10 mm, 直径 100 mm)を装着している。脚部には重錘落下による衝撃力を緩和させないように落下箇所下部に支柱をいれて補強している。

3. 静的切断特性

(1) 切断形態

まず、ゴム供試体の側面に 5 mm 間隔のメッシュを描き、静的切断の様子をビデオ撮影した。図-3 はゴム供試体 B に対する切断開始点におけるゴム供試体の変形状況である。切断刃の貫入にともないゴム供試体上部は引張られ、切断刃直下はかなり圧縮された後、ゴム供試体にわずかな切れ目が生じ切断が開始される。これは切断刃貫入方向に伸びていたメッシュが復元する挙動により判断できる。この切れ目に切断刃がくさびのごとく貫入し、ゴムは引き裂かれるように切断される。また、刃物角 $\theta=5\pi/6$ rad では $\pi/6$ rad に比べ切断開始点のゴムの変形がかなり大きいため、ゴムの復元がかなり速く比較的激しい引裂きがみられた。

このときの垂直荷重 F_s と貫入比 d/t の関係を図-4

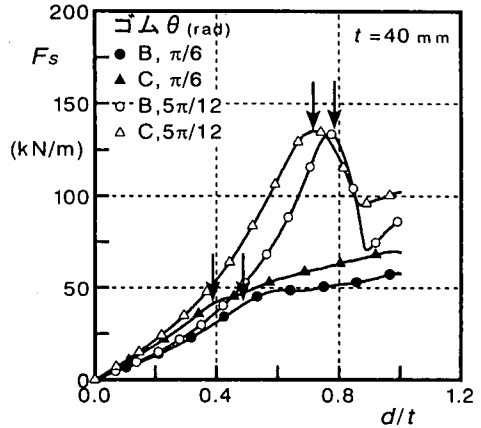


図-4 垂直荷重 F_s と貫入比 d/t の関係

に示す。垂直荷重 F_s はゴム切断幅 5 cm で除した単位幅当たりの荷重として kN/cm なる単位で、貫入比 d/t は貫入量 d をゴム厚 t で除した無次元値で表示している。

曲線の形状は垂直荷重 F_s が単調に増加するもの(パターン 1)およびピークを示すもの(パターン 2)の大きく 2 つに分けられる。ビデオのタイムカウンターを利用して求めた切断開始点を同図に ↓ で記す。切断開始点は、パターン 1 ($\theta=\pi/6$ rad, ゴム供試体 B, C) では曲率最大点もしくは 2 つの直線の折れ点に、パターン 2 ($\theta=5\pi/12$ rad, ゴム供試体 B, C) では最大垂直荷重点に相当する。したがって、その他のケースの $F_s \sim d/t$ 曲線においても、これにならぬ切断開始点を決定した。

表-2 に切断開始点貫入量 d_{sy} と切断パターンを示す。ゴム厚 $t=10, 20$ mm にパターン 1 が、 $t=40, 50$ mm にパターン 2 が多く現れる。また、刃物角 θ についてみると、 $\theta=\pi/6$ rad においては $t=40, 50$ mm にもパターン 1 が多く現れる。刃物角 θ , ゴム厚 t が増加するにつれてパターン 1 の切断からパターン 2 の切断に移行する傾向がみられる。

(2) 切断開始点貫入量

次に、図-5 に切断開始点貫入量 d_{sy} と刃物角 θ の関係をゴム供試体 E について示す。切断開始点貫入量 d_{sy} はゴム厚 $t=10$ mm では刃物角 θ の影響はほとんど受けませんが、ゴム厚が増加するにつれて刃物角が大きいくほど d_{sy} は大きくなる傾向がみられる。

図-6 に切断開始点貫入量 d_{sy} とゴム厚 t の関係をゴム供試体 E について示す。図中の直線は、次式の比例式である。

$$d_{sy} = k \cdot t \quad (1)$$

式(1)による回帰結果を表-3 に示す。全てのケースにおいて相関係数 r が高いので、切断開始点貫入量

表-2 静的切断開始点貫入量 d_{SY} および切断パターン

t (mm)	θ (rad)	ゴム供試体 A		ゴム供試体 B		ゴム供試体 C		ゴム供試体 D		ゴム供試体 E	
		d_{SY} (mm)	切断パ ターン	d_{SY} (mm)	切断パ ターン	d_{SY} (mm)	切断パ ターン	d_{SY} (mm)	切断パ ターン	d_{SY} (mm)	切断パ ターン
10	$\pi/6$	9.5	1	8.8	1	6.8	1	7.7	1	8.6	1
	$\pi/4$	9.1	1	7.8	1	7.1	1	8.2	1	8.6	1
	$\pi/3$	8.5	1	8.1	1	8.4	1	9.4	1	9.9	1
	$5\pi/12$	8.9	1	9.1	1	8.4	1	8.9	1	9.7	1
	$\pi/2$	9.6	1	8.8	1	8.2	1	9.1	1	9.1	1
20	$\pi/6$	17.5	2	17.0	2	12.1	1	12.6	1	14.8	1
	$\pi/4$	14.1	1	13.7	1	12.6	1	14.1	1	15.5	1
	$\pi/3$	14.1	1	14.9	1	11.8	1	15.8	1	17.0	1
	$5\pi/12$	15.9	1	16.8	1	15.6	1	18.6	2	17.3	1
	$\pi/2$	16.9	1	18.7	2	17.6	1	18.9	2	18.6	1
30	$\pi/6$	22.3	1	22.0	2	15.1	1	16.3	1	19.9	1
	$\pi/4$	21.4	1	19.8	1	18.8	1	27.2	2	23.6	1
	$\pi/3$	24.4	2	24.0	2	24.8	2	25.1	2	24.2	1
	$5\pi/12$	24.7	2	24.5	2	24.5	2	24.6	2	27.4	2
	$\pi/2$	26.4	2	25.6	2	25.6	2	25.1	2	26.5	1
40	$\pi/6$	24.2	1	23.7	1	17.2	1	21.7	1	25.5	1
	$\pi/4$	32.2	2	31.8	2	30.5	2	29.7	2	30.2	1
	$\pi/3$	29.5	2	28.0	2	29.3	2	31.0	2	33.0	2
	$5\pi/12$	32.1	2	31.4	2	29.0	2	29.7	2	36.0	2
	$\pi/2$	32.5	2	32.9	2	32.0	2	32.5	2	38.6	2
50	$\pi/6$	43.2	2	44.8	2	42.8	2	42.5	2	31.9	1
	$\pi/4$	35.7	2	35.4	2	33.8	2	33.3	2	39.6	2
	$\pi/3$	36.1	2	36.0	2	33.2	2	35.5	2	39.5	2
	$5\pi/12$	39.7	2	39.7	2	38.0	2	39.6	2	43.5	2
	$\pi/2$	42.0	2	41.4	2	39.6	2	41.7	2	46.0	2

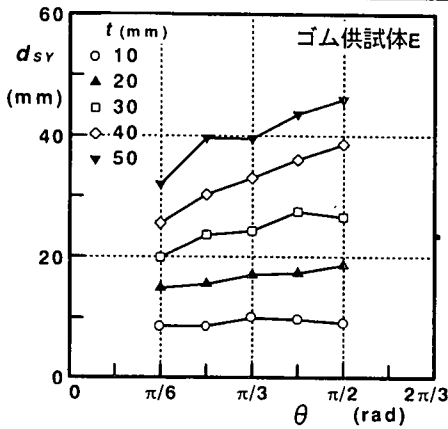


図-5 切断開始点貫入量 d_{SY} と刃物角 θ の関係

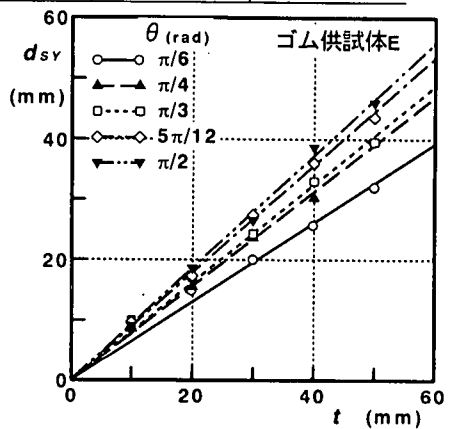


図-6 切断開始点貫入量 d_{SY} とゴム厚 t の関係

d_{SY} (mm) はゴム厚 t (mm) に比例するといえる。比例定数 k は 0.65~0.93 の範囲にあり、刃物角 θ が大きくなるにつれて切断開始点貫入量が増加する傾向がある。

同一原材料(NR/SBR)のゴム供試体 A, B, C について、比例定数 k とゴム硬さ H_S の関係を図-7 に示す。比例定数 k はゴム供試体 A, B ではかなり似た値を示すが、ゴム供試体 C ではゴム供試体 A, B に比べ小さく、すなわちゴム硬さ H_S が増加するにつれ

てより小さい貫入量で切断が開始される傾向がある。また、ゴム供試体 E は 5 種類のゴム材の中で、切断開始点を決定しにくい $\theta = \pi/6$ rad を除き比例定数 k が最大となっている。

(3) 切断開始点荷重

図-8 に切断開始点荷重 F_{SY} と刃物角 θ の関係をゴム供試体 E について示す。切断開始点を決定しにくいゴム厚 $t = 10$ mm を除き、刃物角 $\theta = \pi/3 \sim 5\pi/6$ rad

表-3 静的切断開始点貫入量 d_{SY} ~ ゴム厚 t 関係の
 回帰結果(式(1))

供試体	θ (rad)	k	r	供試体	θ (rad)	k	r
A	$\pi/6$	0.771	0.939	D	$\pi/6$	0.693	0.914
	$\pi/4$	0.743	0.988		$\pi/4$	0.733	0.956
	$\pi/3$	0.742	0.992		$\pi/3$	0.759	0.983
	$5\pi/12$	0.803	0.999		$5\pi/12$	0.794	0.987
	$\pi/2$	0.841	0.997		$\pi/2$	0.838	0.995
	全部	0.780	0.976		全部	0.763	0.953
B	$\pi/6$	0.777	0.931	E	$\pi/6$	0.659	0.987
	$\pi/4$	0.725	0.988		$\pi/4$	0.780	0.998
	$\pi/3$	0.731	0.993		$\pi/3$	0.810	0.995
	$5\pi/12$	0.801	0.998		$5\pi/12$	0.888	0.998
	$\pi/2$	0.840	0.996		$\pi/2$	0.928	0.998
	全部	0.775	0.971		全部	0.812	0.958
C	$\pi/6$	0.652	0.860				
	$\pi/4$	0.690	0.986				
	$\pi/3$	0.708	0.972				
	$5\pi/12$	0.762	0.995				
	$\pi/2$	0.812	0.996				
	全部	0.725	0.942				

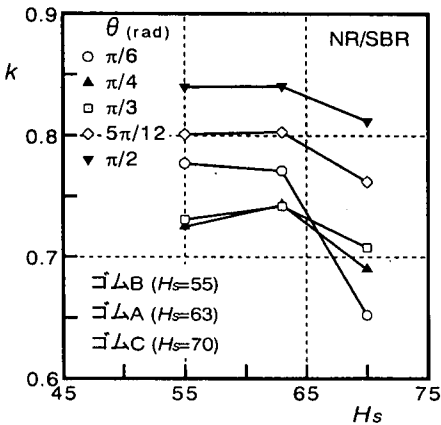


図-7 比例定数 k とゴム硬さ H_s の関係

にかけて切断開始点荷重 F_{SY} が急増する。

図-9 に切断開始点荷重 F_{SY} とゴム厚 t の関係をゴム供試体 A について示す。ゴム厚 $t=30$ または 40 mm において切断開始点荷重 F_{SY} は最大値をとる。図-8, 9 と同様の傾向が他のゴム供試体や最大荷重 F_{SC} についてもみられた。ここで、最大荷重 F_{SC} とは、切断パターン 1 では貫入量 d がゴム厚 t に等しい時の垂直荷重 F_S 、パターン 2 では切断開始点荷重 F_{SY} に等しい、したがって、ゴム厚を増加させることが必ずしも耐静的カット性の向上には繋がらないといえる。しかし、切断開始点荷重 F_{SY} や最大荷重 F_{SC} が、 $t=30$ または 40 mm で最大値をとる原因については今のところよくわからない。

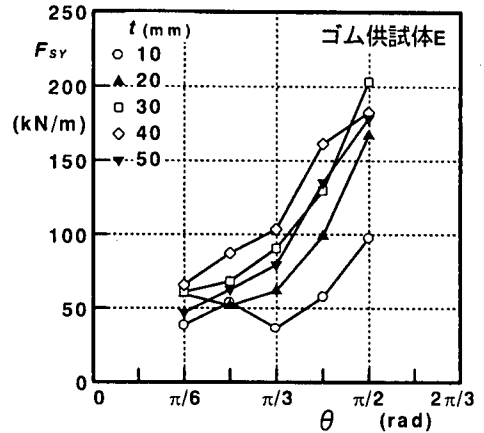


図-8 切断開始点荷重 F_{SY} と刃物角 θ の関係

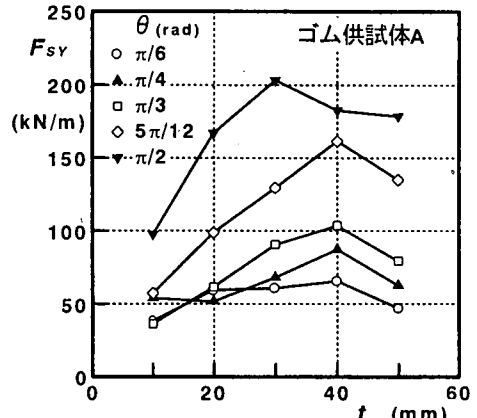


図-9 切断開始点荷重 F_{SY} とゴム厚 t の関係

(4) ゴム材料の影響

5 種類のゴム供試体の中でどのゴム材が耐静的カット性に優れているのかを検討する。代表例として刃物角 $\theta=5\pi/12$ rad, ゴム厚 $t=40$ mm について垂直荷重 F_S と貫入比 d/t の関係を図-10 に示す。この場合、切断開始点は最大垂直荷重点に等しい(切断パターン 2)。

ゴム供試体 A の切断開始点荷重 F_{SY} は 5 種類のゴム供試体の中で最大であり、切断開始点貫入量 d_{SY} も 2 番目に大きい。また、ゴム供試体 E は F_{SY} については最小であるが、 d_{SY} については最大である。なお、ゴム供試体 B, C, D については F_{SY} , d_{SY} とあまり違いがみられない。

切断開始点貫入量 d_{SY} , 同荷重 F_{SY} の最大を示すゴム材は一致しないが、総合的に判断して 5 種類のゴム材の中で耐静的カット性の最も優れているものはゴム供試体 A であるといえる。

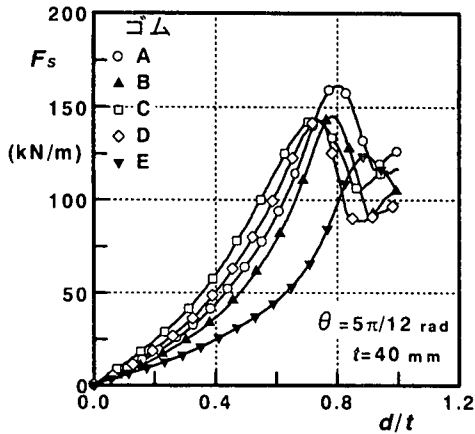


図-10 垂直荷重 F_s と貫入比 d/t の関係 (ゴム材料の影響)

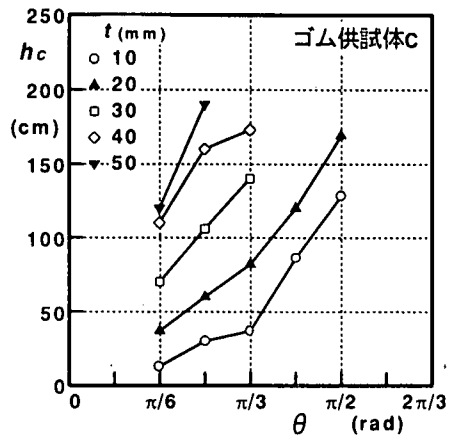


図-11 臨界切断点落下高 h_c と刃物角 θ の関係

表-4 臨界切断点落下高 h_c およびその下限幅 Δh_c

t (mm)	θ (rad)	ゴム供試体 A			ゴム供試体 B			ゴム供試体 C			ゴム供試体 D			ゴム供試体 E		
		h_c (cm)	Δh_c (cm)	$\Delta h_c/h_c$ (%)	h_c (cm)	Δh_c (cm)	$\Delta h_c/h_c$ (%)	h_c (cm)	Δh_c (cm)	$\Delta h_c/h_c$ (%)	h_c (cm)	Δh_c (cm)	$\Delta h_c/h_c$ (%)	h_c (cm)	Δh_c (cm)	$\Delta h_c/h_c$ (%)
10	$\pi/6$	13	2	15	6	1	17	13	1	8	11	1	9	13	1	8
	$\pi/4$	13	1	8	20	1	5	30	3	10	25	2	8	33	3	9
	$\pi/3$	13	2	15	27	3	11	37	4	11	33	3	9	42	2	5
	$5\pi/12$	27	2	7	76	6	8	86	1	1	48	5	10	81	7	9
	$\pi/2$	59	4	7	142	2	1	128	3	2	120	10	8	146	2	1
20	$\pi/6$	21	2	10	24	2	8	37	2	5	30	3	10	43	1	2
	$\pi/4$	35	2	6	52	5	10	60	6	10	53	1	2	72	7	10
	$\pi/3$	51	4	8	67	1	2	82	1	1	66	7	11	90	9	10
	$5\pi/12$	75	4	5	104	1	1	120	12	10	116	6	5	193	13	7
	$\pi/2$	131	8	6	188	7	4	169	7	4	148	3	2			
30	$\pi/6$	71	4	6	48	5	10	70	5	7	53	3	6	75	5	7
	$\pi/4$	83	4	5	83	8	10	106	6	6	80	8	10	120	20	17
	$\pi/3$	99	4	4	109	4	4	140	5	4	99	10	10	182	9	5
	$5\pi/12$	107	4	4	146	12	8				170	5	3			
	$\pi/2$	157	4	3							178	3	2			
40	$\pi/6$	95	9	10	75	7	9	110	10	9	82	8	10	127	7	
	$\pi/4$	139	13	9	120	10	8	160	5	3	128	3	2	176	10	6
	$\pi/3$	155	7	5	150	15	10	173	1	1	142	9	6			6
	$5\pi/12$															
	$\pi/2$															
50	$\pi/6$	125	10	8	97	7	7	120	5	4	93	1	1	144	4	3
	$\pi/4$	170	10	6	124	1	1	190	5	3	140	10	7			
	$\pi/3$				178	2	1				166	6	4			
	$5\pi/12$															
	$\pi/2$															

4. 動的切断特性

(1) 臨界切断点落下高

一般に、重錘の落下高を増加させていくと、ある落下高になったときゴムの切断が開始される。さらに落下高を増加させていくと、切断深さは大きくなるが、ちょうどゴム厚に等しくなる落下高が存在する。このときの落下高を臨界切断点落下高 h_c と定義

する。 h_c よりさらに大きな落下高ではゴム供試体が完全に切断される。

まず、重錘の落下高を適宜変化させて、臨界切断点落下高 h_c を決定した。臨界切断点落下高 h_c およびその下限幅 Δh_c を表-4 に示す。表中の h_c の空欄は、落下高を最高の 193cm にしても完全には切断されなかったものである。落下高は断続的にしか設定できないので、求めた臨界切断点落下高 h_c にはある

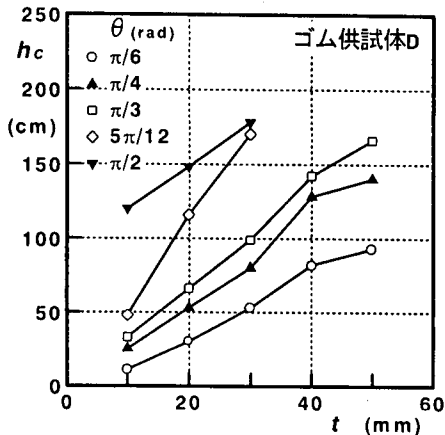


図-12 臨界切断点落下高 h_c とゴム厚 t の関係

幅が存在する。 $h_c - \Delta h_c$ は、完全には切断されないときの最高の落下高であり、 $\Delta h_c/h_c$ を最大 20% 以内に収まるように努めた。なお、真の臨界切断点落下高は、 $h_c - \Delta h_c$ から h_c の間に存在する。

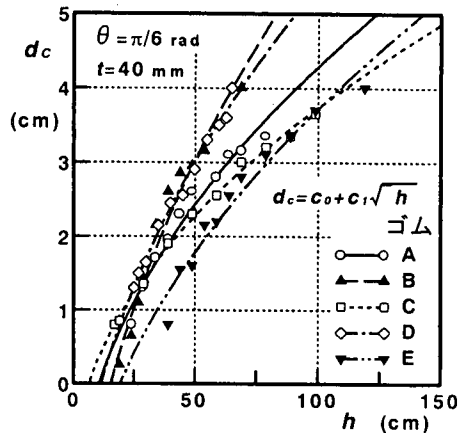
図-11 に臨界切断点落下高 h_c と刃物角 θ の関係をゴム供試体 C について、図-12 に臨界切断点落下高 h_c とゴム厚 t の関係をゴム供試体 D について示す。刃物角 θ およびゴム厚 t が大きくなるにつれて臨界切断点落下高 h_c が単調に増加する。しかし、ゴム厚 $t = 40$ mm 以降の臨界切断点落下高 h_c の増加度合はそれまでに比べてやや低くなっている。これは、静的切断開始点荷重 F_{SY} および最大荷重 F_{SC} が、 $t = 30$ または 40 mm で最大値をとることとは異なっている。

(2) 切断深さ

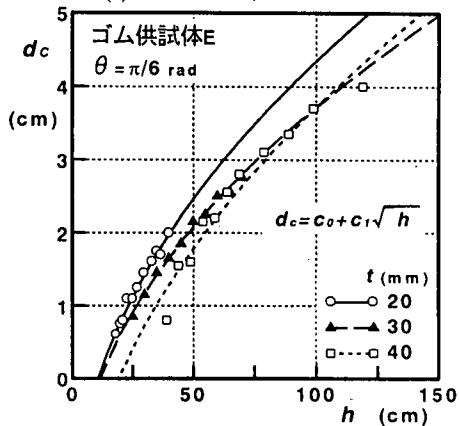
次に、落下高を変化させてゴムの切断深さを測定した。一例として、刃物角 $\theta = \pi/6$ rad, ゴム厚 $t = 40$ mm について切断深さ d_c と落下高 h の関係を図-13(a) に示す。切断深さはゴム供試体 E, C, A, B, D の順に大きくなり、ゴム供試体 B, D にはほとんど違いがみられない。したがって、ゴム供試体 E が耐動的カット性に最も優れている。また、同一原材料 (NR/SBR) のゴム供試体 A, B, C について、ゴム硬さ H_s が大きいほど切断深さが小さく、耐動的カット性に優れている。

さらに、ゴム供試体 E についてゴム厚 t を変化した場合の切断深さ d_c と落下高 h の関係を図-13(b) に示す。ゴム厚 t が厚いほど切断深さ d_c が小さくなる傾向がみられる。したがって、ゴム厚を増加させることはこの範囲では耐動的カット性の向上につながるという。

さて、重錘の落下により切断刃に衝撃力が加わりゴム供試体が切断されるので、切断深さは衝撃力に依存すると考えられる。衝撃力 F_d は運動量保存則に



(a) $\theta = \pi/6$ rad, $t = 40$ mm



(b) $\theta = \pi/6$ rad, ゴム供試体 E
図-13 切断深さ d_c と落下高 h の関係

より次式で算定することができる。

$$F_d = M \cdot v / T \quad (2)$$

M : 重錘質量, v : 重錘衝突時速度,

T : 衝撃力が作用する微小時間

ここで、衝突速度 v は力学的エネルギー保存則より次式で算定される (g : 重力加速度)。

$$v = \sqrt{2gh} \quad (3)$$

本実験における重錘質量 M は一定であるので、落下高 h (cm) のみの関数として切断深さ d_c (cm) を次式で回帰した (c_0, c_1 : 実験定数)。

$$d_c = c_0 + c_1 \sqrt{h} \quad (4)$$

図-13 より、ある落下高になったときに切断が始まるので、切片 c_0 を加えた。

式(4)による回帰結果を表-5 に示す。全てのケースにおいて相関係数 r が高いので、切断深さ d_c は落下高 h の平方根、すなわち衝突速度と直線関係が成立するといえる。

ゴム供試体により多少ばらつくが、切断開始点落

表-5 動的切断深さ d_c ~ 落下高 h 関係の回帰結果(式(4))

(a) $\theta = \pi/6 \text{ rad}, t = 40 \text{ mm}$				
供試体	c_0 (cm)	c_1	h_Y (cm)	r
A	-2.07	0.635	10.6	0.984
B	-3.80	0.964	15.5	0.983
C	-1.28	0.500	6.5	0.998
D	-2.77	0.815	11.5	0.994
E	-2.91	0.661	19.3	0.978
(b) $\theta = \pi/6 \text{ rad}, \text{ ゴム供試体 E}$				
t (mm)	c_0 (cm)	c_1	h_Y (cm)	r
20	-2.11	0.646	10.7	0.992
30	-1.91	0.562	11.6	0.997
40	-2.91	0.661	19.3	0.978

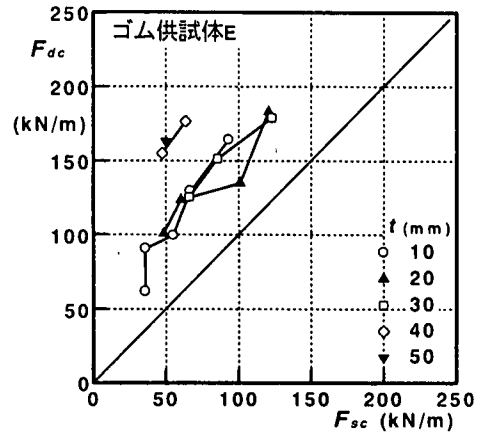


図-14 衝撃力 F_{dc} と最大荷重 F_{sc} の関係 (静的と動的の比較)

下高 h_Y (上式の h 軸切片 $= (-c_0/c_1)^2$) は刃物角 $\theta = \pi/6 \text{ rad}$ では最大 20 cm 程度、 $\theta = 5\pi/6 \text{ rad}$ では最大 120 cm 程度である。切断開始点落下高 h_Y は、ゴム供試体 E が最高である。

5. 考察

(1) 静的切断と動的切断との関連性

ここでは、静的切断と動的切断との関連性を検討する。まず、臨界切断点における衝撃力 F_{dc} と静的切断における最大荷重 F_{sc} の関係を調査する。臨界切断点における衝撃力 F_{dc} を算定するためには、そのときの重錘の落下高 h_c との関係を求める必要がある。

次式⁵⁾は衝撃力 F_d (kN) と重錘落下高 h (cm) の関係の実験式である。

$$F_d = 1.12 h^{0.400} \quad (5)$$

ここで、衝撃力 F_d はゴム厚 $t = 20 \text{ mm}$ のゴム供試体 A の上に設置されたロードセルより測定したものであり、重錘の落下により生じたその最大値である。

上式の h に h_c を代入して求めた F_d をゴム切断幅 5 cm で除すと、臨界切断点における衝撃力 F_{dc} (kN/m) を算定することができる。

一例として、図-14 に衝撃力 F_{dc} と最大荷重 F_{sc} の関係をゴム供試体 E について示す。全てのゴム供試体において、衝撃力 F_{dc} が最大荷重 F_{sc} より大きな値を示す傾向がある。これは、切断刃を使用せずロードセルに作用する衝撃力を測定したので、式(5)で求められた衝撃力は実際の臨界切断点におけるものよりも若干大きいためであると考えられる。

さらに、動的切断ではゴム厚 $t = 40 \sim 50 \text{ mm}$ にかけて臨界切断落下高 h_c の増加の割合がやや低下するのに対して、静的切断ではゴム厚 $t = 30$ または 40 mm で最大荷重 F_{sc} の最大値が現れるので、これらのことも影響していると考えられる。

ところで、ゴム供試体 E は静的切断の切断開始点貫入量 d_{SY} が 5 種類のゴム供試体の中で最大であった。この特性はゴム供試体 E が耐動的カット性に最も優れていることに関連性があると考えられる。一般に、ゴム供試体によって変形特性が違うため同じ落下高から重錘を落下させてもゴム供試体に作用する衝撃力は同じであるとは限らない。ゴム供試体 E では静的切断でみられたように比較的小さな垂直荷重で大きな変形が起きるので、衝撃に対してはゴムが変形することにより衝撃力を緩和することができると考えられる。

(2) 耐カット性と耐摩耗性の総合評価

ゴム供試体 A は静的切断において耐カット性に最も優れており、動的切断においてもゴム供試体 E、C に次いで耐カット性に優れている。しかも、耐摩耗性に劣るわけでない⁴⁾。これに対し、ゴム供試体 E は動的切断において耐カット性には最も優れており、静的切断においてもゴム供試体 A に負けず耐カット性に優れている。しかし、耐摩耗性には劣っている⁴⁾。したがって、耐摩耗性と耐カット性にバランスよく優れているゴム材は、NR に SBR をブレンドしたゴム供試体 A であるといえる。

6. まとめ

建設機械用ゴム材の耐カット性を明らかにすることを目的とし、転石や岩砕に見立てた切断刃の刃物角およびゴム厚の条件を組み合わせて、代表的な耐摩耗性ゴム材からなる試験片に対する静的および動的切断実験を行い、ゴム材の耐カット性を評価した。その結果、以下の知見が得られた。

(1) ゴム供試体の静的切断パターンは垂直荷重と貫入量の関係において、垂直荷重が単調に増加するもの(パターン1)とピークを示すもの(パターン2)の大きく2つに分けられる。刃物角、ゴム厚が増加するにつれてパターン1の切断からパターン2の切断に移行する傾向がある。

(2) 静的切断開始点における貫入量はゴム厚に比例しており(比例定数 0.65~0.93)、刃物角が増加するにつれてより大きい貫入量で切断が開始される。5種類のゴム材の中で切断開始点における貫入量が最大のもはゴム供試体 E(SBR)である。

(3) 静的切断開始点荷重の最大値がゴム厚 30 mm または 40 mm で現れるので、単にゴム厚を増加させることが耐静的カット性の向上に繋がるとはいえない。

(4) ゴム供試体 A(NR/SBR, ゴム硬さ 63)の切断開始点荷重が最大であり、耐静的カット性に最も優れている。

(5) 動的切断において、ゴム厚および刃物角が大きいほど臨界切断落下高が大きくなる。また、ゴム厚が大きいほど切断深さが大きくなる。したがって、ゴム厚を増加させることは本実験範囲では耐動的カット性の向上に繋がるといえる。

(6) 動的切断深さは、落下高の平方根と直線関係が成立する。

(7) ゴム供試体 E(SBR)が最小の切断深さを示し、耐動的カット性に最も優れている。

(8) ゴム供試体 A(NR/SBR, ゴム硬さ 63)は耐カット性と耐摩耗性の両特性のバランスが最も良い。

ゴム材の耐カット性を評価する標準的な試験方法は今まで特に無かったので、本研究ではその方法を提案した。したがって、まだ第一段階にあるので、本実験結果の実車両の OR タイヤや履帯への適用性は不明であり、実車両の状態と今回の実験条件(ゴム厚、切断刃の刃物角、衝突速度等)との対比は、今後の課題である。

参考文献

- 1) 及川 晃：建設機械用タイヤの寿命と向上策，建設機械，23巻7号，pp.48-55，1987.
- 2) 島 昭治郎：建設機械学，鹿島出版会，pp.132-135，1987.
- 3) 平川利夫：建設車両用タイヤの摩耗要因，建設機械，30巻5号，pp.58-66，1994.
- 4) 河原莊一郎，室 達朗，深川良一，建山和由：碎石路面におけるゴム材の摩耗特性とゴム履帯の摩耗寿命予測，土木学会論文集，No.528/VI-29，pp.91-101，1995.
- 5) 室 達朗，河原莊一郎：ゴム履帯の摩耗特性と耐カット性，日本建設機械化協会関西支部摩耗対策委員会研究成果報告書，IV，pp.81-95，1991.

(1998. 12. 24 受付)

EVALUATION OF CUTTING RESISTANCE OF RUBBER FOR CONSTRUCTION MACHINERY

Soichiro KAWAHARA and Tatsuro MURO

The cutting of rubber for construction machinery occurs often due to crushed stones. The objective of the present paper is to investigate the cutting mechanism of rubber. The static and dynamic cutting tests for five kinds of rubber specimens were executed using several model cutting edges.

As a result, it is clarified that the static cutting begins when the penetration depth reaches about 75 % thickness of rubber. SBR rubber has the superior property for the dynamic cutting resistance. NR/SBR rubber has the well-balanced properties for both the cutting and abrasive wear resistances.