—原 著—

車両の衝突事故における速度推定のための標識支柱等のエネルギー吸収量の評価

田中俊輔¹, 大野友則²

¹神奈川県警察科学捜査研究所
〒231-0023 神奈川県横浜市中区山下町155-1
²防衛大学校システム工学群建設環境工学科
〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20

A study on the energy absorption capacity of traffic signs to estimate the vehicle collision speed

Shunsuke Tanaka¹ and Tomonori Ohno²

¹*Scientific Criminal Invest. Lab., Kanagawa Pref. Police H.Q.
155-1, Yamashita-cho, Naka-Ku, Yokohama, Kanagawa 231-0023, Japan*
²*Department of Civil and Environmental Engineering, National Defense Academy
1-10-20, Hashirimizu, Yokosuka, Kanagawa 239-8686, Japan*

(Received 9 July 2014; accepted 27 April 2015;
Published online 15 June 2015 in J-STAGE DOI: 10.3408/jafst.685)

When traffic accidents happen, investigators observe the state of the vehicle at the crash site of the accident. Here the energy conservation law can be used to estimate the vehicle collision speed. Since the collision speed of the vehicle can be estimated from the energy of its deformed volume, investigators observe and measure the vehicle's crash state. However, when a vehicle collides into traffic signs, both the vehicle and sign will be deformed. Consequently, to estimate correctly the vehicle collision speed, the energy absorption capacity of the signs should be taken into account with the vehicle deformation after the crash.

In this study, to improve the estimation of the collision speed of the vehicle, the drop weight tests were done to examine the absorption energy of the signs. The traffic signs used in this test are a road sign, a road mirror and a guard-rail on the roadside. From test results, it can be concluded that the input energy is linearly proportion to the deformed angle of the sign. Also from this test, the relationships between energy and deformed angle of the signs can be formulated. Identification for estimating the vehicle collision speed at an accident hereafter can be done properly with ease.

* 本論文の内容は、日本法科学技術学会第20回学術集会発表（平成26年11月）において奨励賞を受賞した。

Key words: Vehicle collision speed, Traffic sign, Energy absorption capacity, Drop weight test, Bending deformed angle

緒言

交通事故時の車両の衝突速度は、被疑者の過失を立証する主要な判断材料の一つであり、公判においては争点となりやすい。このため、その算出にあたっては精度の高い鑑定結果が求められる。従来用いられるエネルギー保存則は、速度鑑定の主要な方法の一つである。この際、事故時に消費されたエネルギーの正しい算出は不可欠な要因となり、一般的には事故後の変形状態を基にして実験的に導かれた手法から算出している。例えば、車両のエネルギー吸収量については、実車実験データに基づいて導かれた石川ら¹⁾、久保田ら²⁾、大賀ら³⁾などによるエネルギー吸収分布図が存在しているので、車両の変形量を計測することにより算出が可能である。

一方、交通事故は道路上で発生するため、Fig. 1で示すように道路標識柱やガードレール支柱などの道路上に設置された支柱に対して車両が衝突することが多い。この場合、車両と支柱の両者が変形する事例は珍しくはない。したがって、標識柱等に質量 M (kg) の車両が衝突した際の衝突速度 V (km/h) を算出するためには、車両のエネルギー吸収量 E_C (J) と支柱のエネルギー吸収量 E_P (J) を求め、エネルギー保存則を変換した式(1)に適用する必要があるが、支柱のエネルギー吸収量 E_P については車両のようにその変形状態から推定する手法が存在しないため鑑定上問題となっている。

Fig. 1 Conversion of Vehicle motion energy (E) into its energy absorption (E_C) and energy absorption of post (E_P).

$$V = 3.6 \sqrt{\frac{2(E_C + E_P)}{M}} \quad (1)$$

ガードレールなどの車両用防護柵については、車両の逸脱防止と車内の乗員の安全性確保などを目的として、車両が衝突した時に突破されない強度（衝撃度）を設定し^{4,5)}、この強度基準に対する適合性を確認する実車衝突実験⁶⁾などが行われているほか、防護柵支柱の支持力と地盤との関係について記された文献^{7,8)}は存在する。また、土石流発生時の巨礫対策に鋼管が鋼製砂防構造物の構成要素として用いられており、この鋼管の衝撃吸収エネルギーについて記された文献^{9,10)}は存在するが、変形状態との関係は導かれていない。一方、海外においては、木製支柱の破壊エネルギーに関する文献¹¹⁾、道路標識柱への実車衝突実験などの文献¹²⁾が存在するが、変形状態との関係について導かれた文献は少なく、また支柱の設置状況など道路環境が日本と異なるため参考に留まる。このように、支柱（鋼管）に対する種々の研究・実験は行われているものの、いずれも交通事故鑑定への適用を想定した支柱の変形状態からエネルギー吸収量を推定する具体的な知見や手法は得られていない。

本研究は、交通事故鑑定における上記の背景から、道路上での設置数が多く車両の衝突による変形が散見される支柱を対象として、支柱に対する落錘衝突実験を通じて支柱の変形状態から支柱のエネルギー吸収量を推定する手法の構築を試みたものである。

材料および方法

1. 対象とする支柱

本研究では、Table 1 および Fig. 2 に示す道路標識柱¹³⁾（Road sign post 直径 ϕ 60.5 × 肉厚 t 2.3）、道路反射鏡支柱¹⁴⁾（Road mirror post ϕ 76.3 × t 3.2）、および路側用ガードレール支柱^{4,5)}の種別 B・C（Guardrail post on roadside ϕ 114.3 × t 4.5）と同支柱の種別 A（ ϕ 139.8 × t 4.5）の4種類の支柱を対象とした。支柱の材質はいずれも STK400（一般構

Table 1 Dimensions and material properties of specimens.

Post		Tension strength (N/mm ²)	Yield point (N/mm ²)	Sectional area (cm ²)	Geometrical moment of inertia (cm ⁴)	Unit mass (kg/m)
Use	$\phi \times t$ (mm)					
Road sign post	STK400 $\phi 60.5 \times t 2.3$	400 or more	235 or more	4.21	17.8	3.30
Road mirror post	STK400 $\phi 76.3 \times t 3.2$			7.35	49.2	5.77
Guardrail post on roadside	Type B・C STK400 $\phi 114.3 \times t 4.5$			15.5	234	12.2
	Type A STK400 $\phi 139.8 \times t 4.5$			19.1	438	15.0

Fig. 2 Examples of Road sign post, Road mirror post, and Guardrail post on roadside.

造用炭素鋼鋼管 JIS G 3444) であり, 実験には実物の支柱, または同径同肉厚の市販の STK400 鋼管を使用した。

道路標識柱と道路反射鏡支柱の鋼管諸元については, 設置場所の状況に応じて異なるため, 本研究ではいずれも代表的なものを対象とした。

路側用ガードレール支柱の鋼管諸元については, 文献^{4,5)}において定められ, 車両用防護柵の一つとして強度 (車両が衝突した時に突破されない衝撃度の大きさ), および設置場所に応じた C~SS の 7 種別が設定されている。本研究ではこのうち, 設置数の多い種別 B・C と種別 A に使用される支柱を対象とした。種別 B・C は主に市街地の一般道路で使用され, 種別 A は主に高速道路や大規模な国道で使用する。両種別の主な違いは支柱の直径とビーム (支柱間を横に結ぶはり) の肉厚であり支柱の間

隔は同じである。

2. 実験装置

本研究では, Fig. 3 に示す落錘式大型衝撃試験装置を使用した。Fig. 4 で示すように, 実際の交通事故は直立した支柱に対して水平方向から車両が衝突するが, 本研究ではこの装置を使用する制約上, 横倒しにした支柱に対して鉛直方向から重錘が落下衝突する状態で片持ちばりに関する実験として行った。なお, 支柱との衝突に際して実験に用いた剛な重錘は変形が生じないので, 衝突体側の変形を考慮する必要がなく支柱のエネルギー算定が容易となる。

3. 実験概要

実験は Fig. 5 および Fig. 6 に示すように, 支柱端をコンクリートに埋め込んで固定し, これを上下から H 鋼で挟み込んで水平に拘束した。この状態で, ガイドレールを通じて重錘を自由落下させ支柱

Fig. 3 Impact testing facility.

Fig. 4 Impact loading definition for tests.

Fig. 5 Configuration of test setup.

Fig. 6 Testing states.

に衝突させた。重錘の衝突位置の中心は、支柱の固定端から0.6 mの位置とした。これは、普通乗用自動車の前面衝突を想定し、一般的なフロントバンパーの高さを採用したものである。

支柱の変形状態は事故現場での計測を容易にするために、その曲げ変形角度をもって評価し、重錘の落下高さを段階的に変えながら、実験後の支柱の曲げ変形角度 θ (°) を固定端から重錘の衝突中心ま

での範囲 (0~0.6 m) でデジタル式角度計を用いて計測した。また、衝突後の支柱の挙動を見るために高速ビデオカメラによる撮影(撮影速度420コマ/秒)を行った。

支柱に与えた入力エネルギーについては、重錘の質量 m_w (kg) に、重力加速度 g ($=9.8 \text{ m/s}^2$)、および支柱との衝突面を基準とした重錘の落下高さ h (m) に衝突後の支柱のたわみ変位 h' (m) を加えた $h+h'$ (m) を乗じた位置エネルギー E_p (J) として式(2)で評価し、入力エネルギーは全て支柱の曲げ変形に変わったものとした。式(2)に衝突後の支柱のたわみ変位 h' (m) を加えた理由については次のとおりである。

後述するように、実際は重錘が支柱に衝突してから永久(塑性)変形に至るまでの間も重錘は支柱を押しながら落下し続けている。よって、入力エネルギーの算出に際しては、Fig. 5 で示す重錘の衝突位置の中心点における支柱のたわみ変位 h' (m) を加える必要があると考えられ、支柱の固定端から重錘の衝突中心までの距離 L ($=0.6 \text{ m}$) と各実験より得られた支柱の曲げ変形角度 θ ($^\circ$) から式(3)を用いて求めた。

$$E_p = m_w \cdot g \cdot (h + h') \quad (2)$$

$$h' = L \cdot \tan \theta \quad (3)$$

実験条件の詳細を、下記の(1)、(2)および Table 2 に示す。

(1) 重錘質量と落下高さ

道路標識柱と道路反射鏡支柱に対する衝突用重錘の質量 m_w (kg) は、100 kg (先端形状は $\phi 0.15 \text{ m}$ の円盤) とした。また、路側用ガードレール支柱は剛性が大きいので、質量 m_w (kg) は1000 kg (先端は $\phi 0.33 \text{ m}$ の円盤) の重錘を使用した。重錘の落下高さは、Table 2 に示すとおりである。

(2) 支柱の地上部長さ、および支柱先端の付加質量(標示板・鏡面)

道路標識柱と道路反射鏡支柱については、設置場所の道路状況に応じて付加質量(標示板・鏡面)の枚数、大きさおよび形状が変化し、これに伴い地上部長さ(固定端から先端までの長さ)も変化する。また、地上部長さについては装置上の制約から2.2 m を上限としたが、これは多くの場合において実

際より小さめの支柱を想定していることになる。そこで、支柱に対して同じエネルギーを与えた時に、支柱の地上部長さの違い、あるいは付加質量の違いが支柱の曲げ変形角度に及ぼす影響について調べるため、Table 2 に示すように複数の条件を設定した。

支柱先端に取り付けた付加質量は、道路標識柱に対しては直径 $\phi 0.6 \text{ m}$ の丸型標示板、道路反射鏡支柱に対しては直径 $\phi 1.0 \text{ m}$ の丸型鏡面としたが、道路標識柱の標示板3枚の実験については、標示板を直列に3枚取り付けると標示板が重錘と接触することから、根元側に1枚、先端側に2枚重ねて取り付けている。

路側用ガードレール支柱の地上部長さについては、文献⁵⁾に規定されている0.7 m とした。実際は支柱先端側にビームが取り付けられており、ガードレールは車両衝突時の衝撃に対してビームの引張りや支柱の変形で対抗する防護柵⁴⁾であることから、ビームを取り付けずに実験を行うと支柱の変形に影響を及ぼす可能性が考えられるが、装置上の制約からビームの取り付けは困難であり、本研究では支柱単体のみとした。

(3) コンクリート基礎

文献⁵⁾および既設の支柱の値を参考にして、基礎幅については支柱の直径 ϕ の概ね3倍、基礎深さについては各支柱に対して一律0.4 m とした。基礎コンクリート作製時のコンクリート設計強度は27 N/mm² とし、またコンクリート側に破壊が生じることなく重錘のエネルギーが全て支柱の曲げ変形に費やされるようコンクリート内部には補強用の異形鉄筋を配置した。

結果および考察

1. エネルギーと支柱の曲げ変形角度の関係について

(1) 実験後の変形状況について

各支柱の実験後の変形状況を Fig. 7~9 に示す。図では支柱全体、支柱固定端、および支柱とコンクリートとの隙間について実験毎に写真を示している。なお、図中に示す支柱全体の写真はいずれも真横から撮影したものであるが、Fig. 7~8 については標示板および鏡面を正面(または裏面)に向けて撮影し、標示板および鏡面の存在を容易に確認出来

Table 2 Test conditions.

Post (Test number)	Configuration	Length of post (m)	ground part (m)	Concrete size (m)	Sign board /Mirror (Additional mass)	Drop weight m_w (kg)	Fall height h (m)
Road sign post STK400 $\phi 60.5 \times t 2.3$ mm	(60.5-2.2-P3)	2.6	2.2	$\square 0.2 \times 0.4$	3 boards	100	0.5 1.0
	(60.5-2.2-P2)	2.6	2.2	$\square 0.2 \times 0.4$	2 boards	100	0.5 1.0
	(60.5-2.2-P1)	2.6	2.2	$\square 0.2 \times 0.4$	1 board	100	0.25 0.5 0.75 1.0
	(60.5-2.2-P0)	2.6	2.2	$\square 0.2 \times 0.4$	—	100	0.25 0.5 0.75 1.0
	(60.5-1.0-P0)	1.4	1.0	$\square 0.2 \times 0.4$	—	100	0.25 0.5 0.75 1.0
Road mirror post STK400 $\phi 76.3 \times t 3.2$ mm	(76.3-2.2-P1)	2.6	2.2	$\square 0.25 \times 0.4$	1 mirror	100	0.5 1.5 2.5 3.5
	(76.3-1.0-P0)	1.4	1.0	$\square 0.25 \times 0.4$	—	100	0.5 1.5 2.5 2.75
	Type B·C STK400 $\phi 114.3 \times t 4.5$ mm	1.1	0.7	$\square 0.4 \times 0.4$	—	1000	0.25 0.5 0.75
Guardrail post on roadside	Type A STK400 $\phi 139.8 \times t 4.5$ mm	1.1	0.7	$\square 0.4 \times 0.4$	—	1000	0.25 0.5 0.75 1.0 1.5

※Example

60.5-2.2-P1
 Diameter(ϕ)
of the post Length of
ground part of the post Piece of the sign board/mirror

Number	h (m)	0.25	0.5	0.75	1.0
60.5-2.2-P3		-		-
	θ (deg.)		6.8		14.8
	h' (m)	-	0.07	-	0.16
	$h+h'$ (m)		0.57		1.16
	E_p (J)		559		1137
60.5-2.2-P2		-		-
	θ (deg.)		7.2		16.4
	h' (m)	-	0.08	-	0.18
	$h+h'$ (m)		0.58		1.18
	E_p (J)		568		1156
60.5-2.2-P1
	θ (deg.)	3.7	7.6	11.3	18.0
	h' (m)	0.04	0.08	0.12	0.19
	$h+h'$ (m)	0.29	0.58	0.87	1.19
	E_p (J)	284	568	853	1166

Fig. 7 Bending deformed angle of Road sign post ($\phi 60.5 \times t 2.3$) against various loadings.

Number	h (m)	0.25	0.5	0.75	1.0
60.5-2.2-P0
	θ (deg.)	2.7	9.1	12.4	21.9
	h' (m)	0.03	0.10	0.13	0.24
	$h+h'$ (m)	0.28	0.60	0.88	1.24
	E_p (J)	274	588	862	1215
60.5-1.0-P0
	θ (deg.)	5.1	10.5	19.9	35.1
	h' (m)	0.05	0.11	0.22	0.42
	$h+h'$ (m)	0.30	0.61	0.97	1.42
	E_p (J)	294	598	951	1392

Fig. 7 (Continued)

るようにしている。

これらの図から、支柱はコンクリート基礎上端付近から曲がり始めて固定端に座屈変形が生じ、与えたエネルギーに応じて曲げ変形角度が大きくなる傾向を示していることがわかる。なお、支柱とコンクリート基礎上端（固定端）との隙間、およびコンクリート基礎に生じたひび割れについては軽微であったことから、コンクリート基礎側で消費されたエネルギーについては無視している。また、高速ビデオ撮影を行った支柱の変形時の挙動について、各支柱の代表的な例を Fig. 10 に示す。支柱は最大変形に至った後、若干復元して永久（塑性）変形に至り重錘

を乗せた状態で静止していることから、重錘は支柱に衝突してから永久（塑性）変形に至るまでの間も落下し続けていることが分かる。

(2) エネルギーと支柱の曲げ変形角度の関係

式(2)によるエネルギー E_p と支柱の曲げ変形角度 θ の関係を、Fig. 11～13 に示す。図から、本実験の範囲内においては、両者は最小二乗法を用いて直線での近似が可能な線形関係にあるとみなすことができる。ここで、近似式の傾きは変形のしやすさ（値が大きくなるほど変形しにくくなる）、切片は永久（塑性）変形開始時のエネルギーを示していると考えた。

Number	h (m)	0.5	1.5	2.5	2.75	3.5
76.3-2.2-P1					-
	θ (deg.)	1.4	4.9	10.3	-	16.5
	h' (m)	0.01	0.05	0.11	-	0.18
76.3-1.0-P0	$h+h'$ (m)	0.51	1.55	2.61	-	3.68
	E_p (J)	500	1519	2558	-	3606
		-

	θ (deg.)	4.0	12.7	28.0	30.7	-
	h' (m)	0.04	0.14	0.32	0.36	-
	$h+h'$ (m)	0.54	1.64	2.82	3.11	-
	E_p (J)	529	1607	2764	3048	-

Fig. 8 Bending deformed angle of Road mirror post ($\phi 76.3 \times t 3.2$) against various loadings.

一方で、複数の条件を加えて実施した道路標識柱と道路反射鏡支柱については、支柱の地上部長さおよび標示板・鏡面の枚数の違いがエネルギー E_p と支柱の曲げ変形角度 θ の関係に影響を及ぼし、同じエネルギーを与えても曲げ変形角度に差が生じることが認められた。この理由は、支柱先端側の付加質量が増加したことで、重錘の衝突に際して支柱の変形とは逆向きの慣性力の影響が大きくなったことによると考えられる。

Fig. 11～13に示すエネルギー E_p (J) と支柱の曲げ

角度 θ (°) の関係式のうち、Fig. 13に示す路側用ガードレール支柱2種については、式(4)および式(5)で定式化した。道路標識柱と道路反射鏡支柱については、後述するように複数の条件を考慮した補正式を導いている。

$$E_{P114.3-4.5} = 408.1 \theta + 1179.5 \quad (4)$$

$$E_{P139.8-4.5} = 653.4 \theta + 1665.3 \quad (5)$$

ここに、エネルギー E_p の下付添え字は、支柱の直径－肉厚を表している（以下同様）。

Post	h (m)	0.25	0.5	0.75	1.0	1.5
Guardrail post on roadside Type B・C					-	-
$\phi 114.3 \times t 4.5$
θ (deg.)		4.5	11.9	20.8		
h' (m)		0.05	0.13	0.23		
$h+h'$ (m)		0.30	0.63	0.98	-	-
E_p (J)		2940	6174	9604		
Guardrail post on roadside Type A
$\phi 139.8 \times t 4.5$
θ (deg.)		2.0	5.4	9.8	15.2	24.0
h' (m)		0.02	0.06	0.10	0.16	0.27
$h+h'$ (m)		0.27	0.56	0.85	1.16	1.77
E_p (J)		2646	5488	8330	11368	17346

Fig. 9 Bending deformed angle of Guardrail post on roadside ($\phi 114.3 \times t 4.5$, $\phi 139.8 \times t 4.5$) against various loadings.

(3) 理論式について

部材の荷重と変形との関係が弾性領域を超えて塑性領域に及んだ場合、部材はその時の曲げモーメントを維持して変形することになり、これを全塑性モーメント M_p と呼ぶ¹⁵⁾。全塑性モーメント M_p (Nm) は、部材の材料特性を示す降伏応力 σ_y (N/mm²) に、部材の断面形状を示す塑性断面係数 Z_p (cm³) を乗じて式(6)より求められる。

$$M_p = \sigma_y \cdot Z_p \quad (6)$$

本実験は横倒しにした支柱に対して重錘を落下させることから、片持ちばりに衝撃荷重が作用する実験と捉えることが出来る。片持ちばりの変形が塑性領域に及ぶと、その内部では全塑性モーメント M_p による仕事が発生し、支柱の曲げ変形角度を θ (rad) とすると内部仕事 U (J) は式(7)より求められる。

$$U = M_p \cdot \theta \quad (7)$$

ここで、式(2)で示した支柱に対する重錘の入力

Fig. 10 Transitional behaviors of the posts after impact by high-speed video camera.

エネルギー E_p (外部仕事) が、式(7)で示した支柱の曲げ変形 U (内部仕事) に全て変わったものとする、 $E_p = U$ の関係から式(8)が得られる。これより、 θ (rad) が微小領域においては、重錘の入力エネルギー E_p は支柱の曲げ変形角度 θ の一次関数として線形関係にあると考えられる。

$$m_w \cdot g (h + h') = M_p \cdot \theta \quad (8)$$

Fig. 11～13に示す実験結果は、エネルギー E_p (J) と支柱の曲げ角度 θ (°) が線形関係にあることを示しており、その傾向は式(8)で示す理論式とも一致している。一方で、式(8)は θ (rad) が微小領域で成立する関係であることから、本実験結果がその

Fig. 11 Relations between Energy E_P and Bending deformed angle θ (Road sign post $\phi 60.5 \times t 2.3$).

Fig. 12 Relations between Energy E_P and Bending deformed angle θ (Road mirror post $\phi 76.3 \times t 3.2$).

Fig. 13 Relations between Energy E_P and Bending deformed angle θ (Guardrail post on roadside $\phi 114.3 \times t 4.5$, $\phi 139.8 \times t 4.5$).

領域に含まれているかを判断する必要がある．式(3)を式(2)へ代入し展開すると式(9)が得られる．式(9)における θ ($^\circ$) を微小領域とすると式(10)が得られ θ (rad) の一次関数となる．

$$E_P = m_w \cdot g \cdot h + m_w \cdot g \cdot L \cdot \tan \theta \quad (9)$$

$$E_P = m_w \cdot g \cdot h + m_w \cdot g \cdot L \cdot \theta \quad (10)$$

ここで，本実験では支柱の曲げ変形角度 θ がおおむね 30° までの範囲に収まっていることから， $\theta = 30^\circ$ を式(9)中の $\tan \theta$ に適用すると 0.577 ，また $\theta = 30^\circ$ を式(10)に適用するにあたり rad 単位に変換すると 0.524 となり，その誤差は 10% 以内に収まる．よって，式(10)において θ が微小領域で成立するエネルギー E_P との関係は，式(9)においてもおおむね成立すると考えられ，本実験の範囲内において両者の関係を線形近似することは妥当だと判断される．

(4) 本実験式の適用範囲について

Fig. 11において，支柱の曲げ変形角度 θ が本実験の中で最大となる 35.1° を記録した実験番号 60.5-1.0-P0 の近似式では，エネルギーの増加分に対する曲げ変形角度の増加分が 30° を超えると大きくなって両者は線形比例の関係とならない傾向にあることがわかる．1点のみなので断定は出来ないが，理論式による検討も合わせると， θ が 30° を大きく超えた領域で本実験式を適用するとエネルギーの見積りに精度を欠く可能性がある．

一方，Fig. 11～13の支柱の曲げ変形角度 θ が 5° 以下の領域においては，各実験結果と近似式との間には若干の差異が認められ，特に Fig. 11では5つの近似式が交差して切片の値にバラツキが生じている． θ が 5° 以下の領域については近似式の精度が十分とは言えず，エネルギーの見積りに精度を欠く可能性がある．

よって，線形近似した本実験式の適用範囲は $5^\circ < \theta < 30^\circ$ と考えられ， 30° を大きく超えた領域については现阶段では推定上の参考としての使用が望まれるが， 5° 以下の領域についてはエネルギーの値としては小さく車両の速度推定という目的であれば本実験式を適用しても影響はほとんどないと考えられる．

2. 任意の条件に応じたエネルギーと支柱の曲げ変形
角度の関係について（道路標識柱・道路反射鏡支
柱）

支柱の地上部長さ、および標示板（鏡面）の枚数の違いはエネルギーと曲げ変形角度の関係に影響を及ぼすことから、設置場所の道路状況に応じてこれらの条件が異なる道路標識柱と道路反射鏡支柱については任意の条件に応じた両者の関係を求める必要がある。

エネルギー E_p と支柱の曲げ変形角度 θ の関係式 $E_p = \alpha\theta + \beta$ の傾き α が支柱の条件に応じて変化する理由は、重錘衝突時に支柱に対して働く慣性力の影響だと考えられる。慣性力 F (N) は質量 m (kg) の物体に働くみかけの力として $F = -ma$ (a は加速度 (m/s²)) で示され、質量は物体の慣性力の大きさを表している。そこで、近似式の傾き α と、その傾き α を変化させる要因と考えられる支柱地上部の全体質量 (支柱本体の質量に標示板・鏡面の質量を加える。以下、「全質量 m_p (kg)」とする) との関係を導き、任意の条件に対応出来るよう補正を行った。

さらに、道路標識柱については、エネルギー吸収量が小さくかつ実験数が多いので、条件による差を無視した簡易的な検討も行った。

(1) 支柱地上部の全質量を変数とした補正式

Table 2 に示す各条件において、支柱地上部の全質量 m_p (kg) を求めると Table 3 のようになる。なお、支柱本体については STK400 鋼管の単位質量を採用しているため統一されているが、標示板（鏡面）については材質、厚み、大きさ、および形状によって異なるため統一されておらず事案に応じて調べる必要がある。

Table 3 に示した両支柱の全質量 m_p と近似式の傾き α との関係を, Fig. 14 に示す. 図から, 両者は最小二乗法を用いて直線での近似が可能な線形関係にあることがわかる (ただし, 道路反射鏡支柱については 2 点のみなので断定はできない). これ

Fig. 14 Determination of factor α .

Table 3 Converted additional mass into whole mass of ground part.

Post	Test number	Post mass (Ground part)			Sign board/Mirror mass (Additional mass)			Whole mass of ground part m_P (kg)	Empirical equation		
		Lengh (m)	Unit mass (kg/m)	Total mass (kg)	Piece	Unit mass (kg/piece)	Total mass (kg)		Slope α	Intercept β	
Road sign post $\phi 60.5 \times t 2.3$	60.5–2.2–P3	2.2	3.30	7.26	3 boards	1.5	4.5	11.76	72.3	67.7	Ave. 122.1
	2 boards				3.0		10.26	63.9	107.8		
	1 board				1.5		8.76	61.7	91.3		
	0				0		7.26	49.5	164.0		
	60.5–1.0–P0	1.0	3.3	0	0	3.30	35.6	179.8			
Road mirror post $\phi 76.3 \times t 3.2$	76.3–2.2–P1	2.2	5.77	12.69	1 mirror	11	11	23.69	201.5	378.5	Ave. 329.7
	76.3–1.0–P0	1.0		5.77	0		0	5.77	90.5	280.9	

は、全質量 m_P の増加にともなう支柱の変形のしにくさを示していると考えた。この考えから、同近似式より任意の全質量 m_P における直線の傾き α を求めることができる。

一方、切片 β については、Table 3 で示すように道路標識柱の値にバラツキが見られ全質量 m_P との関係が導けない。これは、各条件 2~4 点で直線近似しこれを比較したことによる影響と思われる。しかし、切片の値に規則性は見られないものの 100 J 前後とほぼ類似の値となっており、車両の速度推定という目的で使用するならばエネルギーの値としては小さいことから、条件の違いによる差を無視して各条件の切片を便宜上単純平均し、道路反射鏡支柱についてもこれに準じた。その結果、道路標識柱については $\beta = 122.1$ 、道路反射鏡支柱については $\beta = 329.7$ の値が得られた。

これらより、任意の支柱地上部の全質量 m_P (kg) を変数とするエネルギー E_P (J) と支柱の曲げ変形角度 θ (°) に関する補正式は、道路標識柱について

は式 (11)、道路反射鏡支柱については式 (12) となる。

$$E_{P60.5-2.3} = (4.4m_P + 20.6)\theta + 122.1 \quad (11)$$

$$E_{P76.3-3.2} = (6.2m_P + 54.8)\theta + 329.7 \quad (12)$$

(2) 標示板を取り付けた 3 条件の結果から求めた簡易式 (道路標識柱のみ)

Fig. 11 に示した標示板を取り付けた道路標識柱 3 条件の近似式を比較すると、標示板の枚数の増加にともなって直線の傾きが大きくなる傾向にあるが、この範囲内においてはその差は必ずしも顕著ではない。また、本実験の範囲内においては支柱のエネルギー吸収量は 1200 J 程度であり、条件の違いによるエネルギーの差が車両の速度推定に与える影響は小さい。そこで、Fig. 15 で示すように、標示板を取り付けた 3 条件の全結果 (標本数 8) に対して最小二乗法を用いて 1 次式を求めると、エネルギー E_P (J) と支柱の曲げ変形角度 θ (°) の関係式が式 (13) のように得られ、これは有意水準 1% において有意であった。

$$E_{P60.5-2.3} = 64.5\theta + 94.1 \quad (13)$$

結 語

本研究では道路上での設置数が多く、車両の衝突による変形が散見される 4 種類の支柱を対象として、落錘衝突実験を行った。その実験結果から、支柱地上部の全質量 m_P (kg) を変数とした入力エネルギー E_P (J) と支柱の曲げ変形角度 θ (°) との関係求めた。Table 4 にその一覧を示す。今後は、事故現場で支柱の諸元と曲げ変形角度を計測し、支柱のエネルギー吸収量を具体的な数値で示すことによって、Fig. 1 で示すような事故形態であっても式 (1) を用いて車両の衝突速度が推定可能となる。

Fig. 15 Relation between Energy E_P and Bending deformed angle of posts θ ($\phi 60.5 \times t 2.3$).

Table 4 Formulae to estimate the energy E_P from deformed angle θ of various posts.

Post		Empirical formula
Road sign post	STK400 $\phi 60.5 \times t 2.3$	$E_{P60.5-2.3} = (4.4m_P + 20.6)\theta + 122.1$
		$E_{P60.5-2.3} = 64.5\theta + 94.1$
Road mirror post	STK400 $\phi 76.3 \times t 3.2$	$E_{P76.3-3.2} = (6.2m_P + 54.8)\theta + 329.7$
Guardrail post on roadside	Type B・C	STK400 $\phi 114.3 \times t 4.5$
	Type A	STK400 $\phi 139.8 \times t 4.5$
		$E_{P114.3-4.5} = 408.1\theta + 1179.5$
		$E_{P139.8-4.5} = 653.4\theta + 1665.3$

ただし、本実験式の適用範囲は $5^{\circ} < \theta < 30^{\circ}$ と考えられることから、この範囲を大きく超えた変形の場合は推定上の参考としての使用が望まれる。適用範囲を拡大したエネルギーと支柱の曲げ変形角度の関係については今後の検討課題である。

また、道路標識柱と道路反射鏡支柱の実験式については、支柱の地上部長さや標示板等の取り付け位置を踏まえて検討したものではなく、支柱地上部の全質量で補正するという簡易的な検討から導き出しているため、例えば Fig. 2(2)の右側で示すような鏡面が並列に配置され支柱の中心軸から左右に張り出した2面鏡タイプの道路反射鏡支柱の場合には衝撃作用時の挙動が異なる可能性が考えられ、この形態の支柱に対して全質量のみで補正するには限度があることから推定上の参考としての使用が望まれる。

本研究は、路上工作物に対する研究としては導入的な段階であり、一般的な支柱だけを対象として検討を行った。したがって、多種多様な交通事故における鑑定に適用するためには、ガードレールなどの車両用防護柵についてはビームを含めた複合的な検討が必要である。また、本研究では重錘の衝突位置を支柱固定端から0.6 mに限定したが、転倒滑走した二輪車では固定端から0.2~0.3 m付近に衝突するケースがあるなど、実際の事故では支柱に対する衝突位置は異なる。このため、衝突位置の違いがエネルギーと支柱の曲げ変形角度の関係に与える影響についても検討する必要がある。

文 献

- 1) 石川博敏, 松川不二夫, 車体変形によるエネルギー吸収と固定壁換算速度. 自動車技術会講演前刷集, 792A67, 1979.
- 2) 久保田正美, 國分善晴, 前面形状別の車体エネルギー吸収特性. 自動車研究, 17-1, 19-22, 1979.
- 3) 大賀 涼, 井出芳和, 碓 孝浩, 自動車アセメントの試験データを用いた変形エネルギー吸収分布図の作成. 自動車技術会学術講演会前刷集, 49-07, 5-10, 2007.
- 4) (社)日本道路協会編, 防護柵の設置基準・同解説, 東京, 2011.
- 5) (社)日本道路協会編, 車両用防護柵標準仕様・同解説, 東京, 2004.
- 6) 建設省土木研究所道路部交通安全研究室, 日本道路公団試験研究所, 鋼製防護柵協会, 高速化対応型防護柵の開発に関する共同研究報告書 高規格幹線道路用鋼製防護柵に関する研究—その2—, 東京, 2000.
- 7) 鬼丸平吉, 車輛衝突時における防護柵支柱の挙動. 土木技術資料, 13-12, 616-622, 1971.
- 8) 濱田俊一, 安藤和彦, 岡田英之, 防護柵の動的支柱強度に関する一考察. 日本道路会議論文集, 22, 290-291, 1997.
- 9) 齋藤英明, 大野友則, 石川信隆, 水山高久, 局部変形を考慮した鋼管片持ちばりの衝撃吸収エネルギーに関する実験的研究. 土木学会構造工学論文集, 35, 1057-1068, 1989.
- 10) (社)日本道路協会編, 落石対策便覧, 東京, 1987.
- 11) Richard W. Kent. and Charles E. Strother., Wooden Pole Fracture Energy in Vehicle Impacts. SAE Technical Paper, 980214, 1998.
- 12) 安藤和彦, 米国における道路施設の緩衝対策とその性能. 土木技術資料, 53-10, 58-61, 2011.
- 13) (社)日本道路協会編, 道路標識設置基準・同解説, 東京, 2011.
- 14) (社)日本道路協会編, 道路反射鏡設置指針, 東京, 2010.
- 15) 石川信隆, 大野友則, 藤掛一典, 別府万寿博, 基礎からの衝撃工学. pp. 63-65, 森北出版株式会社, 東京, 2008.