

道路防護柵の衝撃エネルギー吸収に関する実験的研究

The Experimental Study On the Absorbing Shocking Energy of the Guard Fences in Road

張 星[†] 青木 徹彦[‡]
Zhang Xing Aoki Tetsuhiko

The guard fence in the road is one of important equipment that can prevent vehicles from running outside the road when they have deviated from the normal direction. It also can enhance the security of passengers, decreasing the damage of the vehicles and goods on it. So we should ensure the guard fences designed that have enough strength to avoid rupture form the shock by high-speed vehicles and also have enough plasticity to absorb shocking energy for lightening the damage of the people and vehicle. At present, the replacing and repairing of guard fences cost a great deal of money and time and effect the daily traffic badly because it is easily damaged. The purpose of the thesis is to develop a new type of guard fence that can satisfy the request of strength and plasticity and can be replaced and repaired easier and cheaper.

1. はじめに

道路防護柵は走行中に進行方向を誤った車両が路外、対向線または歩道に逸脱するのを防ぐとともに、乗員の被害および車両の破損を最小限にとどめて、車両を正常な進行方向に復元させることを目的として設置されている。また、副次的に運転者の視線を誘導し、また、歩行者および自転車の転落もしくはみだらな横断を抑制するなどの目的をそなえた施設である。

近年、道路交通網の整備や車両性能の向上などにより、物流の中に占める自動車の役割はますます重要となってきた。また、道路交通の高速化や車両の大型化・高重心化が進み、自動車のみならず道路構造や安全施設に対しても、それに対応してさらに安全性を増やした設計が強く要望されている。この安全施設の一つに防護柵があげられるが、近年、車両の高速化、大型化、高重心化があり、それらに対応する必要にせめられている。

車両衝突時における防護柵の変形や車両の離脱角、加速度、転倒条件などは防護柵の材料特性や形状などに依存するため、これらの影響を設計段階で推定するとともに、実

物を用いた実験によって検討する。

日本における近代的な道路防護柵の歴史は、1956 年 8 月に製鉄メーカーによってはじめてガードレールが製造販売したことに始まっている、1998 年までは、日本では道路防護柵を 150628 キロメートル分設置した。1998 年の交通事故は 803878 件、負傷者 990675 人、死者 9211 人であった。この中で車両単独の事故は交通事故総数の 23.5% 占めるが、車両単独の事故では、防護柵などへの衝突が最も多く、防護柵についても、これらの交通状況に適合した強度や構造を持つものが求められてきている。

2. 防護柵の性能要求

防護柵とは以下の 4 つの性能が重要である。

(1) 防護柵の車両路外逸脱防止性能

1) 強度 防護柵は大型貨物車の衝突に対して突破されない強度を有すること。

2) 変形 防護柵は大型車の衝突に対して所定の変形以上が生じないこと（静荷重実験で荷重高さ 80 cm での塑性変形能力水平方向に 30cm 以上）。

(2) 乗員の安全性に対する性能

防護柵への衝突とき車両が受ける減速度は乗員被害度

[†] 愛知工業大学 大学院建設システム工学専攻

[‡] 愛知工業大学 土木工学科 (豊田市)

と直接関係があるので、防護柵は衝撃エネルギーを吸収して、衝突車両が最小限で減速度になって、乗員の安全性が向上すること。

(3) 車両の誘導性能

衝突車両が防護柵への衝突により急停止したり、横転、転覆を起こし車線上停止することは避けなければならない、さらに、対向車や併走車に大きな影響を与えるような挙動も生じないようにする必要がある。それは防護柵が車両を円滑に誘導する性能に頼る。

(4) 防護柵の構成部材の飛散防止性能

車両の衝突時に大きな荷重を受けるがその際、防護柵の構成部材が道路上や道路外に飛散することにより、当事者や、第三者に被害を及ぼすことがないようにしなければならないこと。

防護柵の基本性能を満足すると同時に、防護柵は外形美観、低価格、修復しやすいことが望まれる。

車両が防護柵へ衝突する時、衝撃エネルギーは防護柵の変形や衝突車両自身の変形によって吸収されている。防護柵には支柱と横梁があり、両者によって衝撃エネルギー吸収性能を図れるが、大きな変形能力をもつ支柱の開発は現在でも十分おこなわれておらず、支柱には大きな変形能力が要求されるが、高吸収エネルギー性能を持つ新しい支柱構造の開発が当面の課題となっている。

本研究では、防護柵の基本性能と報酬性能とを考慮して、衝撃エネルギーの吸収性能の高い防護柵の支柱形式を開発するために、何種類かの支柱形式に静的載荷実験し、それぞれの性能を確認すると同時に、エネルギー吸収性能に優れた支柱形式を提案する。

3. 防護柵の設計について

3.1 設計基本条件

1998 年に改正された基準¹⁾では、設計基本条件については最大車両重量が 14tf から 25tf へ、衝突速度が 80km/h から 100km/h へ、また衝撃度が 232KJ から 650KJ へと変更された。衝突角度については大型車で 15 度、乗用車で 20 度を前提としている。

3.2 防護柵の種類

防護柵基準によると、防護柵は図 3-1 に示す種別に区分されている。

車両用防護柵の種類は衝撃強度によって適用する道路が違っている。防護柵種別を適用する道路は、表 3-1 のように定められている¹⁾。

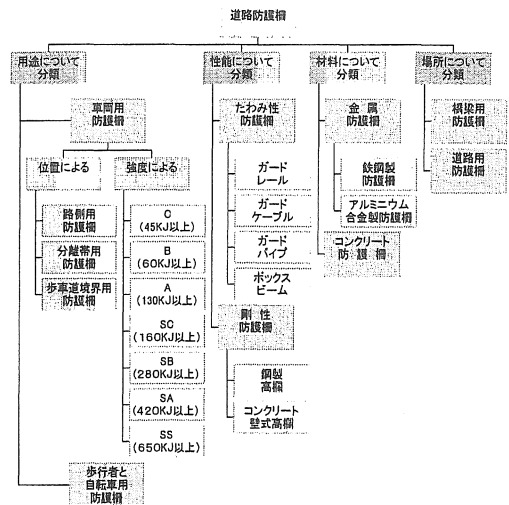


図 3-1 防護柵の分類¹⁾

表 3-1 防護柵種別を適用する道路¹⁾

| 道路の区分 | 設計速度 (km/h) | 一般区間 | | 重大な被害が発生するおそれのある区間 | | 新幹線などと交差または近接する区間 | |
|-----------|-------------|------|-----------|--------------------|----------|-------------------|----------|
| | | 種別 | 衝撃度* (KJ) | 種別 | 衝撃度 (KJ) | 種別 | 衝撃度 (KJ) |
| 高速自動車専用道路 | 100以上 | A | 130 | SB | 280 | SS | 650 |
| | 80 | | | | | | |
| | 60以上 | | | | | | |
| その他の道路 | 60以上 | B | 60 | A | 130 | SB | 280 |
| | 50以下 | C | 45 | B | 60 | | |

*註：衝撃度の計算式は式 (1.1) による。

$$I_s = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \left(\frac{V}{3.6} \cdot \sin \theta\right)^2 \quad (1-1)$$

ここで I_s : 衝撃度または衝撃強度 (KJ)
 m : 衝突車両の質量 (t)
 v : 衝突速度 (km/h)
 θ : 衝突角度 (度)

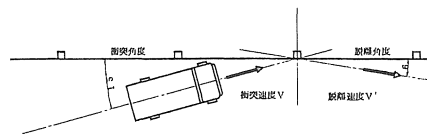


図 3-2 車両と防護柵衝突示図

3.3 支柱の設計

(1) 新形式支柱構造

本研究では、図 3-3 に示すように車両用たわみ性防護柵

の新しい形式として長ボルトを支柱のエネルギー吸収装置とすることを考える。ここで、長ボルトとは丸棒の両端にボルトと結合したものである。

支柱供試体は角形鋼管と長ボルトと短ボルトで道路路面に定着し、防護柵が水平方向に30度程度回転できるように設置する。

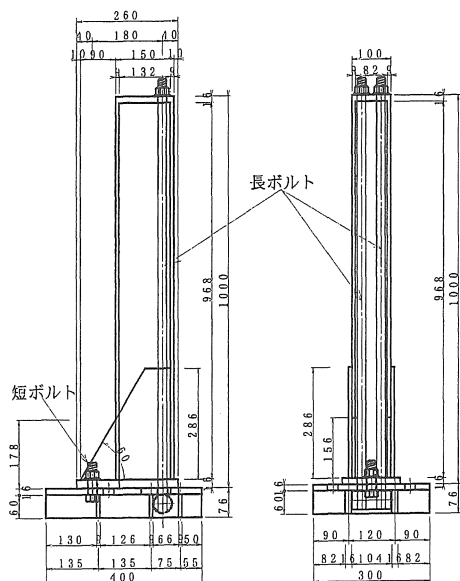


図3-3
ボルト回転軸と専用台座を使った新形式支柱

(2) ボルトの引張力

図3-3に示す支柱を図3-4のようにモデル化し、外力Fが作用するときの長ボルトが受ける引張力Tを求めると

$$F \times H = 2 T \times L \quad (3-1)$$

よって

$$T = \frac{F \times H}{2L} \quad (3-2)$$

あるいは

$$F = T \times 2L / H$$

ここに、H:外力の作用高さ、L:支柱下端のモーメント。

長ボルトの直径dは

$$d = 2 \times \sqrt{\frac{T}{\pi \sigma_u}} \quad (3-3)$$

ここに、 σ_u はボルト用鋼材の引張り強度 (SS400 で $\sigma_u = 45\text{kg/mm}^2$ とする)。

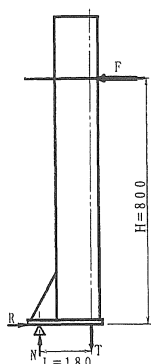


図3-4
支柱の簡化受力モデル

(3) 作用力F

車両の保護柵への衝突は図3-5に示すステップで進行すると考える。同図のように簡化した衝突モデルで車両の重心点の変位を用いて、車両が防護柵支柱に及ぼす衝撃力を計算する。すなわち、衝突車両の道路直角方向での重心移動から、減加速度を求める。

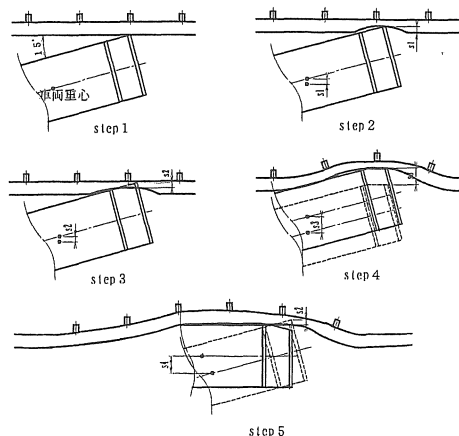


図3-5 車両衝突瞬間モデル

図3-5に示すように、衝突車両の道路直角方向での重心変位 ΔS は

$$\Delta S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4$$

である。ただし、

S_1 : 防護柵の横梁変形により衝突車両の道路直角方向での重心変位

S_2 : 衝突車両変形により車両の道路直角方向での重心変位

S_3 : 防護柵の支柱変形により衝突車両の道路直角方向での重心変位

S_4 : 衝突車両と防護柵との角度が 15° から 0° に変化することによって衝突車両の道路直角方向での重心変位。

また、

$$S_4 = h \cdot \sin\theta + b \cos\theta - b - S_2$$

ここでは、

h : 車両最前部から車両重心までの距離

b : 車両寛度の半分

θ : 車両と防護柵との衝突角度。

一方、衝突車両の道路直角方向での平均速度 \bar{V} は次の式に与えられる。

$$\bar{V} = \frac{V_1 + V_2}{2} \cdot \sin\theta = \frac{V_1}{2} \cdot \sin\theta \quad (3-4)$$

ここで、 V_1 、 V_2 はそれぞれ衝突初期と停止ときの速度を表す。したがって、衝突の進行時間は $\Delta t = \Delta S / \bar{V}$ である。

よって、衝突車両の道路直角方向での減加速度 a_g は

$$a_g = \frac{V_1 - V_2}{\Delta t} \cdot \sin\theta$$

$$= \frac{V_1^2 \cdot \sin^2\theta}{2[S_1 + S_3 + h\sin\theta - b(1 - \cos\theta)]} \quad (3-5)$$

であり、衝突力は

$$F = m \cdot a_g$$

$$= \frac{m \cdot V_1^2 \cdot \sin^2\theta}{2[S_1 + S_3 + h\sin\theta - b(1 - \cos\theta)]} \quad (3-6)$$

である。ここで、 m は衝突車両の質量を表す。

防護柵の剛性をサインと理想化できるならば、衝突力と時間との関係曲線はサイン曲線である。従って、最大減速度 $a_{g\max}$ は $\frac{\pi}{2} a_g$ であり、最大衝突力 F_{\max} は $\frac{\pi}{2} F$ である。

ここで、 $S_1 = 0.05m$ 、 $S_2 = 0.3m$ (静荷重実験で規定された防護柵支柱の最大斜変位)。 $V_1 = 100kg/h$ 、 $\theta = 15^\circ$ 、 $m = 2500kg$ 、 $h = 6m$ 、 $b = 1.25m$ とおくと、 $F_{\max} = 54,530kgf$ 。この最大衝突力を 14 本の防護柵支柱に平均的に分配すると、一本あたりの最大衝突力は $\bar{F}_{\max} = 54,530/14 = 38,950kgf$ である。一般的に、この平均値の 2 倍、77,900kgf を支柱の最大支持力とする。

4. 静的載荷実験

防護柵の設置基準の関連通達「車両用防護柵性能確認試験方法について」^りでは設計に用いる防護柵の構成部材の強度は、静荷重試験により確認することとしている。

4.1 実験計画

実験は表 4-1 に示す 7 種類の供試体を用いて行った。Type I -a、I -b の 2 体は横方向作用力が 6.5tf に対し設計して、式(3-3)より $\phi 22$ のボルトを用いる供試体である。Type II ~ Type IV の 5 体の試験は 8tf の作用荷重に対し、 $\phi 24$ のボルトを用いた供試体である。Type II と Type III のボルト本体の材質は S35C であり、引っ張り試験の結果、ボルト本体の伸び率は極めて小さく、8% しかなかった。Type IV、V のボルト用丸棒は引っ張り試験から伸び率は 33% と大きかった。応力-ひずみ曲線を図 4-1 に示す。

長ボルト用素材の静荷重試験のデータから得られた素材定数を表 4-2 に示す。

表 4-1 実験計画

| Type 番号 | 長ボルトの直径 (mm) | ねじとボルトの接合方法 | 支柱最大変位 (cm) | 供試体最大載荷 (tf) |
|-------------|--------------|--------------|-------------|--------------|
| Type I -a | 22 | 摩擦圧接 | 30 以上 | 6.9 |
| Type I -b | 22 | 摩擦圧接 | 30 以上 | 6.5 |
| Type II | 23.6 | 溶接溶接断面未補強 | 20 | 11 |
| Type III -a | 23.6 | 摩擦圧接 | 17 | 13 |
| Type III -b | 23.6 | 摩擦圧接 | 22 | 12.5 |
| Type IV | 24.9 | ボルト用本体でねじを作る | 25 | 8.5 |
| Type V | 24.9 | 溶接溶接断面補強有 | 30 以上 | 12 |

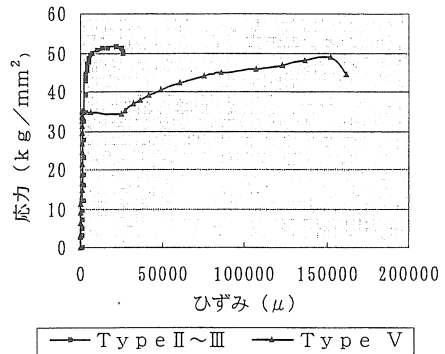


図 4-1 Type II ~ V の長ボルト用丸棒応力とひずみ関係線

表 4-2 長ボルト素材の定数

| 定数 | 伸び率 (10 ⁻⁴ kg/cm ²) | 降伏強度 (kg/mm ²) | 引張強度 (kg/mm ²) | 最大荷重 (kg/mm ²) | 最大荷重点ひずみ (μ) | 伸び率 (%) |
|-------------|--|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------|---------|
| $\phi 23.6$ | 2.176 | 40.01 | 51.38 | 23.82 | 20790 | 8 |
| $\phi 24.9$ | 2.432 | 32.53 | 48.83 | 22.46 | 164200 | 33.2 |

4.2 実験装置

加力には図 4-2 に示すように 100tf ジャッキを用い、水平変位 30cm 以上を目標に変位を与える。供試体の荷重-変形および荷重-ひずみ挙動を観察する。

計測は供試体基部からの高さが80cm 点の水平変位は糸巻き変位計を図 4-2 のように設置して計測し、支柱本体と長ボルトでは図 4-3 のように貼り付けるひずみゲージによるひずみ計測される。

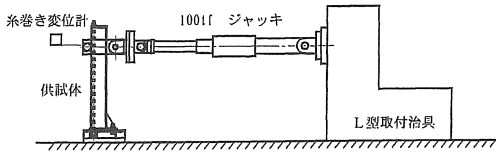


図4-2 防護柵支柱静荷重実験装置示図

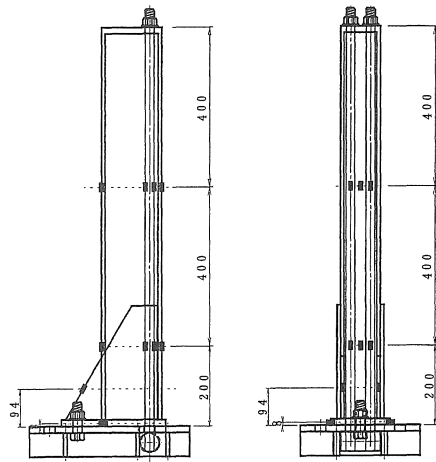


図4-3 ひずみゲージの位置

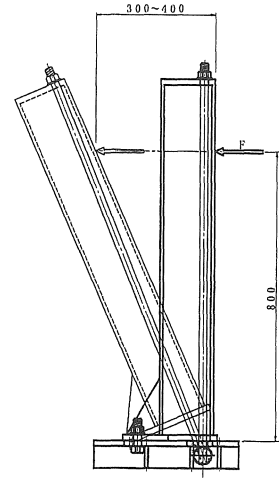


図5-1 静荷重実験で支柱変位示図(単位mm)

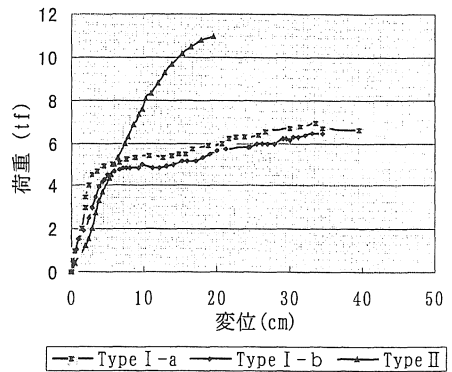


図5-2 Type I、Type II
荷重と変位関係曲線

5. 実験結果と考察

防護柵支柱について水平静荷重実験を行ったところ、変位 300mm で図 5-1 に示す変形状態となった。

実験結果にみると、支柱は設計荷重を耐えた、水平変位 30cm に達した時、支柱本体には下端板の短ボルトの付近に生じた小さい曲げ変形を除き、他の損傷は全く見られない。

(1) 荷重—変位曲線

実験から得られた荷重—変位変位曲線を図 5-2 と図 5-3 に示す。

1) Type I と Type V どちらも変位 30cm を超え、防護柵基準を十分に満足している。Type II、Type III の最大変位は 22cm までしか至らず、基準を満たしていない。

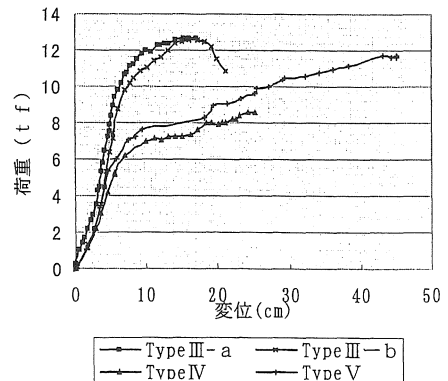


図5-3 Type III～V
荷重と変位関係曲線

2) 直径によって、荷重能力が異なる。Type V と Type I を比べると供試体の極限支持力は 30% 程度伸びる。

3) Type III-b により Type I と Type V のほうは塑性域での変形により耐荷能力も大きくなる。

(2) 応力とひずみ曲線

1) 図 5-4 には異なる支柱において同素材、同直径の長ボルトの応力-ひずみ関係曲線の比較である。この図に見ると、異なる支柱の供試体中での同素材、同直径のボルトの応力とひずみ曲線の特徴がほぼ同じであることがわかる。

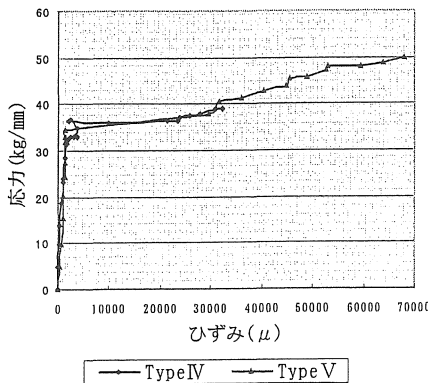


図5-4 同直径、同材質長ボルト
応力とひずみ関係曲線の比較

2) 図 5-5 には異なる支柱における異なる材質にボルトの応力-ひずみ曲線である。異なる材質にボルトの応力-ひずみ曲線の特徴が変わっている。

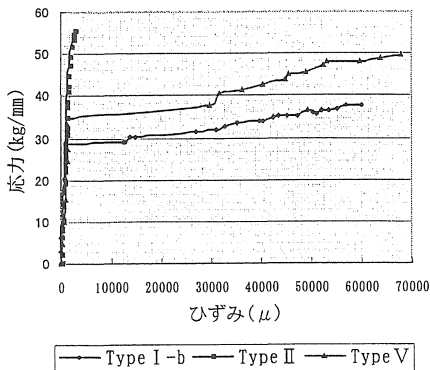


図5-5 異なる長ボルト
応力とひずみ関係曲線の比較

3) 図 5-6 には 2 種類の応力-ひずみ曲線が示されている。すなわち、ボルト本体の応力-ひずみ曲線とボルトね

じの応力-ひずみ曲線である。同図からボルトねじの応力が本体に対応する応力よりかなり大きいことがわかる。これは Type VI に用いられたボルトが φ25 の丸棒で直接切削することにより、φ24 のねじを作ったからである。支柱のボルトが塑性域で働くことが要求される。すなわち、ボルトが働く時の実際応力は材料の引張強度に近いということである。従って、もしボルトのねじ部分にボルト本体と同じ材質を使用すると、ねじの直径はボルト本体の直径より小さくなるため、先に引張強度に達し、降伏し、ボルト本体は完全に働かない恐れがある。よって長ボルトは SS400 丸棒を本体とし、高力ボルトをねじとし、摩擦圧接により作る。

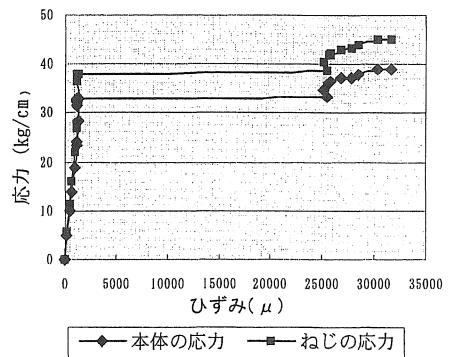


図5-6 Type VI 長ボルトの
本体とねじ応力-ひずみ関係曲線

(3) エネルギー吸収量

図 5-2 と図 5-3 の荷重-変位曲線の面積からエネルギー吸収量を求めた。これを図 5-7 と図 5-8 に示す。

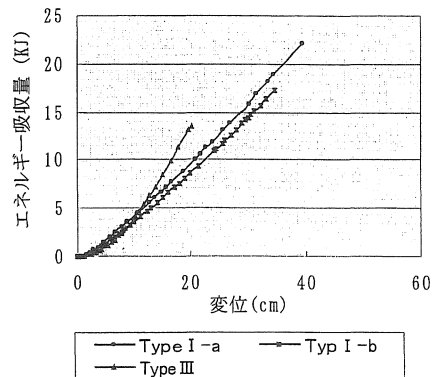


図5-7 Type I ~ II
エネルギー吸収量と変位関係曲線

1) 同じ材質、同じ直径のボルトを用いた支柱供試体はほぼ同じエネルギー曲線を持つことがわかる。

2) 前に述べる三つの供試体で同じ素材のボルトを使ったが、Type II のエネルギー吸収量が明らかに Type III-a と Type III-b より低くなっていることが分かる。これは、Type II に用いられたボルトが普通の溶接方法で作られた高力ボルトであるが、本体上部からの挿入を考慮して、溶接部の余盛を切削して母材と等断面としたため、境界面での補強溶材層が切削し、溶接部分が先に降伏し、破壊に至った結果である。

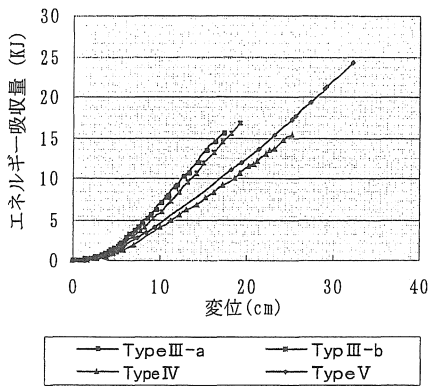


図5-8 Type III～V エネルギー吸収量と変位関係曲線

3) 図 5-7 と図 5-8 から、変位 30cm に達する時点と比べると、Type IV-a と Type V は Type I-a、Type I-b II よりエネルギー吸収量が多い。これは後者の長ボルトの直径の大きいためである。

6. 結論

本研究によって得られた結論は以下のようにまとめられる。

(1) 長ボルトと支柱支持力の関係

実験により、長ボルトは引張り部材として働き、塑性領域にわたって大きな伸び変形を生じつつ外力に抵抗していることが確認できた。このことから、長ボルトが防護柵支柱のエネルギー吸収性能に決定的な役割を果たす部材であることがわかった。

1) 長ボルトの直径が支柱の支持力に直接的な影響を与えるため、長ボルトの直径を増やすこと支柱の支持力を向上させる有効な方法である。

2) 長ボルトには高力ボルトを使うこと。高力ボルトは

摩擦圧接方法で鋼棒に溶接する。普通の溶接方法で溶接する場合には、接合点に余盛りを行って補強する。

3) 直径 24mm、材質 SS400 の丸棒と高力ボルトねじとの摩擦圧接による長ボルトを使用する防護柵は極限支持力が 8tf まで達するから、種別 SA 防護柵の性能を十分満足している。

(2) 支柱本体と支柱支持力との関係

実験には供試体の支柱本体を寸法 150×100 板厚 9mm 角形鋼管使用し、上下とも厚さ 16mm の鋼板を溶接して製作した。実験結果から、支柱本体は下端板および定着用短ボルトが少し曲がっているが、それ以外の損傷はまったく見られない。ひずみゲージにより測定した結果、支柱本体の変形は非常に小さかった。

また、下端板に対し、リップによる補強が不可欠である。よって角形鋼管の厚さをもっと薄くすることができると考えられる。

(3) ボルトの回転支持軸について考え方

図 6-1 に示すボルト回転支持軸は支柱が外力を受ける際に長ボルトがまっすぐな状態を保つために設置された部材である。今回の実験では半分以上の供試体の長ボルトが曲がった。その主な原因は回転軸の回転状況がよくないためである。したがって、回転軸の回転性能をよりよくする工夫が必要である。

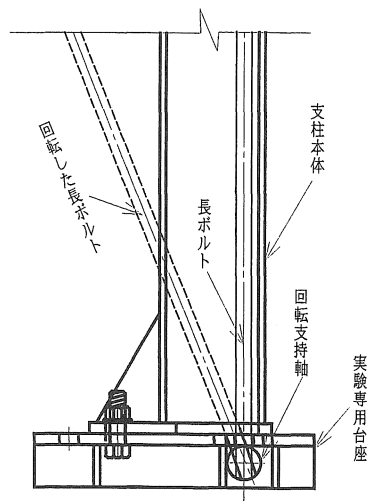


図6-1 長ボルト回転支持装置

参考文献：

- 1) 日本道路協会：防護柵の設置基準・同解説、日本道路協会（1998.11）

- 2) 建設省：建設白書（平成 11 年版）、大蔵省印刷局（1999.7）
- 3) 総務庁：交通安全白書（平成 11 年版）、大蔵省印刷局 pp5～80（1999.7）
- 4) 酒井洋一：防護柵衝突実験、土木技術資料 34-10 土木研究センター pp18～21（1992）
- 5) 建設省土木研究所道路部交通安全研究所：防護柵の開発に関する研究、木研究所資料第 2450 号（1987.2）
- 6) 建設省土木研究所道路部交通安全研究所：急カーブ用防護柵の構造形式および支柱補強に関する共同研究報告書、共同研究報告書整理番号第 41 号（1990.3）
- 7) 建設省土木研究所道路部交通安全研究所：防護柵衝突シミュレーションに関する研究、土木研究所資料第 3047 号（1992.2）
- 8) 建設省土木研究所道路部交通安全研究所・日本道路公団：高速化対応型防護柵の開発に関する共同研究報告書、共同研究報告書第 94 号（1993.10）
- 9) 瀬尾卓也・安藤和彦・酒井洋一：連結車両の防護柵衝突シミュレーション、土木技術資料 37-3 土木研究センター pp56～61（1995）
- 10) 徳増満・松本晃一・羽山章：車両の高速化・大型化に対応した防護柵の検討、日本道路公団試験研究所報告 pp171～185（1996.11）
- 11) 満田喬・高木世幸・松野敏行：アルミニウム製高欄型自動車用防護柵の機能および強度研究、土木技術資料 22-12 土木研究センター pp9～14（1980）
- 12) 伊藤義人・森 正樹・鈴木信哉・安藤和彦：車両衝突を受ける橋梁用防護柵に関する数値解析的研究、構造工学論文論文集 Vol. 45A（1999.3）
- 13) 瀬尾卓也・安藤和彦・岡田英之：防護柵衝突実験のため之 25ton 車構造の把握、第 21 回日本道路会議論文集 pp.332~333（1995）
- 14) 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研究、第 22 回日本道路会議論文集 pp.290~291（1997）
- 15) 中華人民共和国交通部：高速公路交通安全設施設計及施工技術規範、人民交通出版社（1994.6）

（受理 平成12年 3月18日）