

アルミニウム合金押出形材を用いた新しい 橋梁用ビーム型防護柵開発に関する研究

伊藤 義人¹・吉野 彰宏²・酒見 真志³・佐藤 遼一⁴

¹フェロー会員 名古屋大学大学院教授 情報基盤センター長 工学研究科社会基盤工学専攻
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)
E-mail: itoh@civil.nagoya-u.ac.jp

²正会員 JFEエンジニアリング (〒230-8611 横浜市鶴見区末広町2-1) (研究当時名古屋大学大学院生)
E-mail: yoshino.akihiro@h.mbox.nagoya-u.ac.jp

³正会員 住軽日軽エンジニアリング (〒464-8603 東京都江東区亀戸2-35-13 新永ビル)
E-mail: shinji-sakemi@sne.co.jp

⁴学生会員 名古屋大学大学院院生 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)
E-mail: sato.ryoichi@e.mbox.nagoya-u.ac.jp

アルミニウム合金押出形材を用いた、景観に配慮した新しい形式の橋梁用防護柵支柱を開発し、静的載荷実験とその数値解析シミュレーションを行った。最初に、板材から切り出した断面寸法が実寸であるモデル供試体で実験を行い、その変形性能を明らかにした。その後、ダイスを製作し、押出形材を製作し、実防護柵の指定の幅に切断した支柱の供試体を製作した。新たに開発した多室ホロー断面の押出形材の支柱は、防護柵設置基準・同解説で要求されている橋梁用ビーム防護柵支柱の極限支持力などの性能を持つことを、静的載荷実験と数値解析シミュレーションによって明らかにした。また、支柱幅を変えることによって、異なる種別の防護柵に適用できることも示した。

Key Words: *aluminum-alloy railing, static test, numerical analysis, extruded post*

1. はじめに

防護柵設置基準は、平成 10 年 11 月に仕様規定から性能規定へと改訂され、続く平成 16 年 3 月の改訂では道路上の景観形成へ配慮することが盛り込まれた¹⁾。また、防護柵を設置する上での景観への配慮についての考え方として「景観に配慮した防護柵の整備ガイドライン」²⁾も策定された。その中で防護柵の景観上の課題として、周辺環境の中で浮き立った存在になりやすく、透過性の低い防護柵は眺望を阻害しやすいこと等が挙げられている。これに対応し、景観に配慮した鋼製防護柵やアルミニウム合金製防護柵が研究開発されている³⁾⁴⁾。

アルミニウム合金製防護柵支柱は大きく分けて鋳物支柱と押出形材支柱がある。近年は橋梁改修に伴い、防護柵支柱は埋め込み型でなく、アンカー式の需要が増えている。鋳物支柱はベース部と一体で成形できるが、1 体ずつ製作するので製作効率が高い。また、鋳物では防護柵の種別ごとにそれぞれ鋳型を用意する必要があり、

さらに鋳物では押出形材ほどの部材の角部の意匠的な鋭さや面の平滑さが得られにくい。一方、従来の押出形材支柱は、押出方向が支柱軸方向になっており、アンカー式の場合、別体のアンカーベースを製作する必要があり、コスト高となっている。

図-1(a)に示す、今回研究対象とした新たに開発したアルミニウム合金押出形材を用いた防護柵は、支柱の透過性を高めることで遠景が望めるような景観性に優れたものを考えた。この押出形材は、長尺の同一断面部材を製作し、それを指定の幅に切断して、多くの支柱を一度に製作できるので、生産性が高くコスト縮減も可能と考えた。また、押出方向を図-2 に示すように橋軸方向のホロー押出とすることで、ベース部を一体成型でき、かつ、異なる防護柵種別に対しては、切断する支柱幅を変えることで、新たなダイスを製作する必要がなく対応することができるよう考えた。なお、比較のため従来型のアルミニウム合金防護柵の写真を図-1(b)に示す。

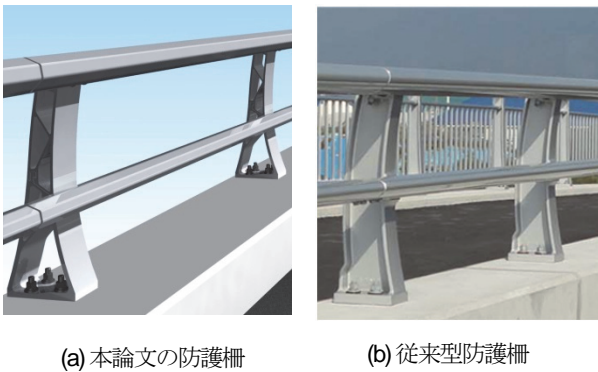


図-1 新しい防護柵（イメージ）と従来型支柱

本研究では、アルミニウム合金押出型材を用いた橋梁用の新しい防護柵支柱を、防護柵設置基準・同解説¹⁾に示されている橋梁用ビーム防護柵の部材選定領域グラフを満足する構造を開発し、静的載荷実験と有限要素解析プログラムを用いた静的数値解析を行うことにより、その性能を明らかにすることを目的としている。

本論文では、まず、アルミニウム合金板材からワイヤカットで切り出した多室ホロー断面の支柱幅 70mm のモデル供試体を用いた静的載荷実験とその数値解析を行い、新しいタイプの防護柵の可能性を明らかにする。これは、押出型材用のダイスの製作には多くの費用が必要であり、形状を変えた試行錯誤が容易にはできないので、新しい防護柵支柱の形状を板材から切り出したモデル供試体を用いて、その性能を明らかにするためである。その後、実用化レベルのダイスを造り、押出型材を用いた実際の支柱を製作し、静的載荷実験およびその数値解析を行い、その性能を明らかにする。本論文では実際に適用数が多い A 種防護柵を中心に扱うが、その幅は 145mm としている。

2. アルミニウム合金型材の橋梁用ビーム型防護柵支柱への適用

(1) ダイスを用いた押出型材支柱の製作方法

アルミニウム合金の押出加工は、図-2に示すように、ビレットを加熱し、プレスでオス型ダイスとメス型ダイスを介して押出すことにより所定形状の製品を成形するものである。円柱状のビレットから一気に長尺の複雑な二次元断面形状に加工する。これを、指定の幅に切断することによって、多数の同一型材を同時に製造する。

(2) 押出型材の材料選定とその特性

アルミニウム合金は、その系により特性が異なるため、材料選定においては種々の要件を考慮し決定する必要がある¹³⁾¹⁶⁾。新開発の防護柵支柱は大型の押出ホロー材で

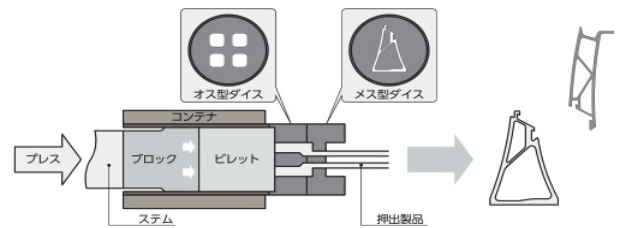


図-2 ダイスを用いた押出型材の製作



図-3 押出型材の下部支柱と上部支柱

あることを考慮して材料を選定した。大型の押出ホロー材に対応できるのは、Al-Mg-Si 系合金の A6063, A6N01, A6061 等のアルミニウム合金である。材料コストと強度の関係、およびこれまでに防護柵に一般的に使用されており、車両衝突実験⁹⁾などでも性能が確認されていることから A6061S-T6 を採用することにした。これより強度の高い A7003 もホロー押出可能であるが、応力腐食割れの問題やダイス寿命が短くなるので好ましくないと判断した。

材料は JIS の A6061 の規定の範囲内で成分調整をして強度の向上を図った。押出型材を用いた初回の実験では、材料の機械的性質は JIS 規格値¹³⁾を満足していたものの、ひび割れにより防護柵としての強度および変形性能を満足しなかったため、参考文献¹⁴⁾¹⁷⁾を参考にして人工時効硬化処理温度を調整することにより、JIS 規格以上の伸び性能を確保した。ミルシート値は、引張強さ 316 N/mm²、耐力 271 N/mm²、伸び 20% となった。

(3) 押出型材の大きさ制限と接合方法について

橋梁用ビーム型防護柵の高さは路面から主要横梁上端まで 900mm 以上 1000mm 以下とされており、一般的な地覆高さは 250mm であるので防護柵本体は 650~750mm 必要となる。国内においては、一般の 1000~2500t (10MN~25MN) 程度の押出プレスの製造範囲は外接円 160mm までであり、4000t (40MN) 押出プレスでも外接円 300mm 程度までである。国内最大級である 9500t (95MN) プレスであれば外接円 530mm まで製作可能であるが、これでも 1つのダイス型で支柱を成形できないため、図-3に示すように、支柱を上部と下部の 2つに分

けて押出型材を製作することにした。上部と下部の支柱部材は、嵌合とずれ止めのためステンレス製のボルトにより接合することとした。

(4) 支柱の形状決定と変形特性

新しいアルミニウム合金押出支柱の開発において、防護柵の基本性能を満足しつつ、従来にない支柱である「新規性」、そして景観に配慮した「景観性(透過性)」を目指し、支柱のウェブは多室ホロー断面を採用した。まず断面形状と変形性能をおおまかに把握するための例として図-4に示すように(a)曲線タイプ、(b)くびれタイプ1、(c)断面寸法の異なるくびれタイプ2、(d)直線タイプの4種の断面形状を考えた。ここでは、まだ嵌合接合は考慮せず、一体型として考えた。シェル要素を用いてモデルを作り、有限要素法による材料非線形と幾何学非線形を考慮した複合非線形解析を行い、支柱頂部を300mmまで変位させた荷重-変位曲線を求め、支柱内の最大ひずみも求めた。なお、降伏点応力とヤング率は245MPaと70GPaを用い、ポアソン比は0.3とし、等方硬化則を用いた。応力-ひずみ曲線は、簡便化のためbilinearを用い、第2勾配は0.55GPaとした。

解析結果を、図-4に示す。形状が単純ではないので、荷重-変形特性との関係を個々に明確に説明する事は難しい。(a)曲線タイプと(c)くびれタイプ2は大きな最高荷重を得たが、その後変形が急に生じ、急激に除荷が生じたため、得られた荷重-変位曲線から等価台面積となる支柱の極限支持力 P_w との差が大きく不適である事が分かった。また、(b)くびれタイプ1は300mm変位しても座屈変形が生じず荷重がほとんど除荷しなくて、ひずみが大きくなりすぎ、部材が早くから破断する可能性があることが分かった。最終的に、従来型の支柱の荷重-変位曲線と極限支持力特性が似ている(d)直線タイプを採用することにした。

そして、これらの形状に関する基本検討と製作の合理化などから、以下のような形状を採用し、新たな防護柵支柱は最終的に図-5のような形式の支柱を考えた。

1) 支柱を上部と下部の2つに分けて、押出型材を製作

2) 嵌合接合とずれ止め用のステンレスボルトを使用

図-5に示す支柱の上部は厚肉のフランジと細めの斜め材からなる多室ホロー断面形状であり、車両の乗員から防護柵を見たときの透過性を持たせた。下部支柱断面の検討にあたっては、最大変位量300mmでフレキシブルに荷重を受けとめる性能が発揮されるように、下部支柱に変形エネルギー吸収機構を設けるとともに、アンカーボルトナット締め付けのための空間を確保した。その結果、この防護柵支柱の変形は、主要横梁に荷重が加わり、

その梁を支柱が受け止めるとき、まず斜め材端部が降伏し、次いで後ろフランジが座屈することで変形し、エネルギーを吸収するメカニズムとなった。

前述したように上部支柱と下部支柱の接合は、嵌合とずれ止め用のステンレスボルトとしている。摩擦攪拌接合についても検討したが、製作時間が長くなりコスト高となるため、今回は採用しないこととした。なお、ステンレスボルトとアルミニウム合金の異種金属接触による腐食問題は、ジオメット処理をしたステンレスボルトを使うことによって避けられることがわかっている¹⁸⁾。

3. アルミニウム合金板材の支柱供試体を用いた予備実験と数値解析

(1) はじめに

新型のアルミニウム合金の防護柵支柱について、断面形状を決定し、支柱のダイスを起型する前に70mm厚の板材(A6061P-T651)をワイヤーカット加工により、幅70mmの防護柵支柱モデルを製作し、その性能を確認するため、静的載荷実験と複合非線形有限変位の数値解析を行った。

(2) 板材を用いた防護柵支柱の静的実験

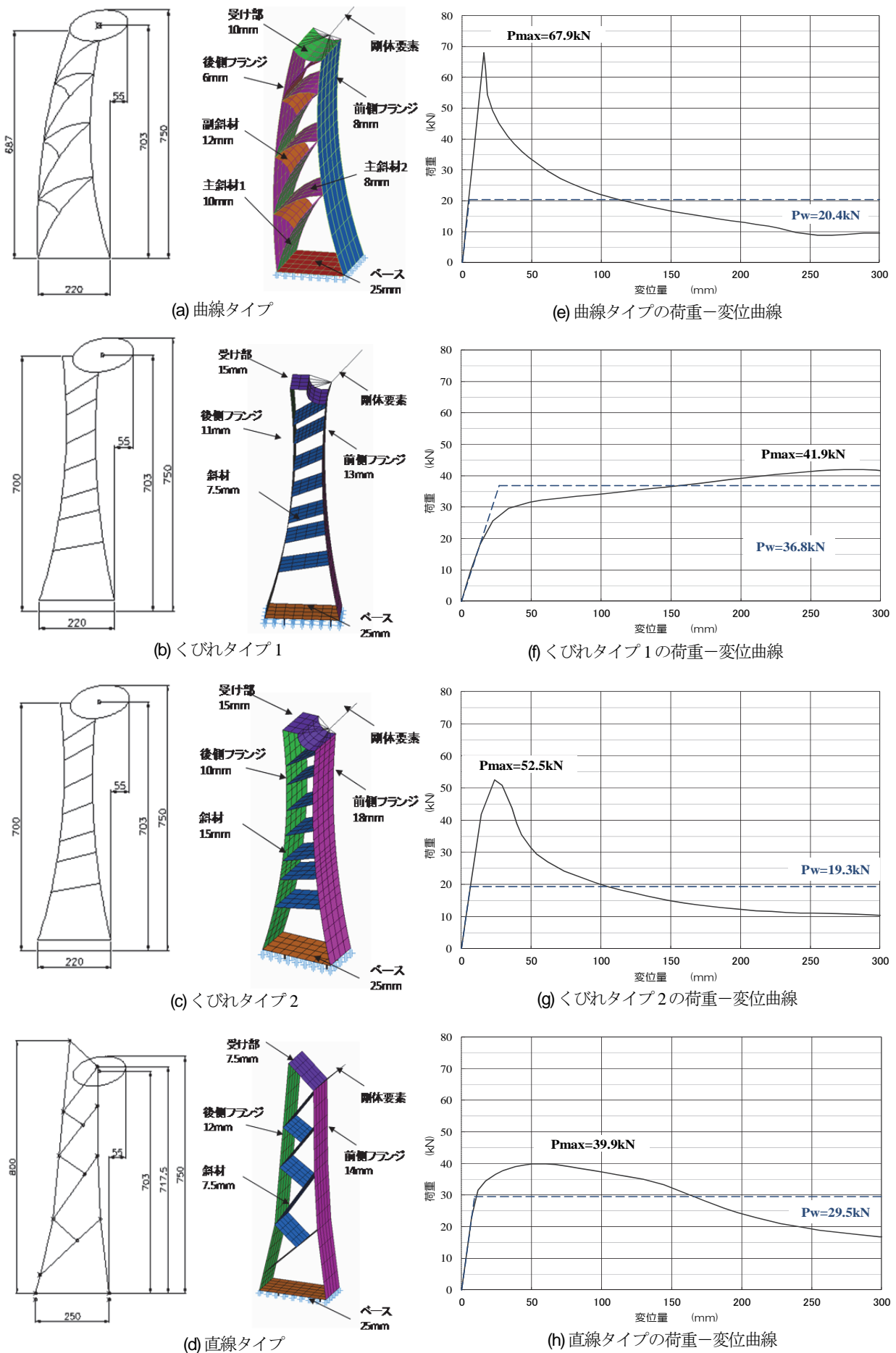
a) 板材の材料試験

本防護柵に用いられた板材の材料特性を確認するため、アルミニウム合金板材の引張試験を行った。引張試験片は、JIS14-B号試験片(板厚5mm、標点間距離45mm)であり、支柱の部材軸方向から切り出して3体製作した。測定項目は、ヤング率、ポアソン比、降伏点応力(0.2%耐力)、引張強さおよび伸びである。後で数値解析に実測の応力-ひずみ曲線を入力できるように伸び計を使って応力-ひずみ曲線(図-6)も求めた。

引張試験は、島津製作所製100kNオートグラフを使用し、JIS Z 2241に準拠して行った。ヤング率、降伏点応力(0.2%耐力)およびポアソン比の測定にはひずみゲージ(東京測器研究所製FLA-5-23、ゲージ長5mm、ゲージファクター2.16、FCA-3-23、2軸ゲージ長3mm、ゲージファクター2.15)を、応力-ひずみ曲線の測定には伸び計(島津製作所製SG50-50-1、標点間距離50mm)を使用した。試験速度は、0.2%耐力測定までは2mm/min、それ以後は5mm/minとした。3体の材料試験結果の平均値を表-1に示す。

b) 静的載荷実験方法

橋梁用ビーム型防護柵支柱は、防護柵設置基準・同解説において、静的載荷実験を行い、極限支持力 P_w が所定の値を満足することが求められている。本研究におい



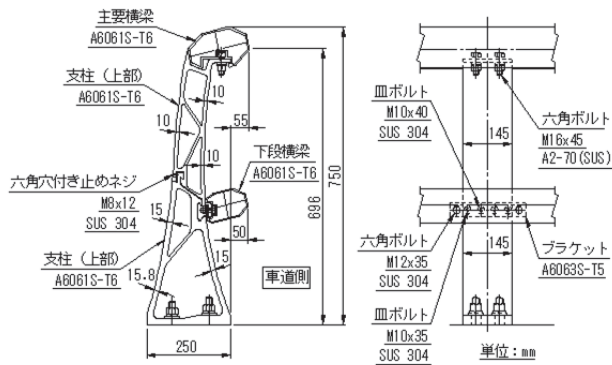


図-5 支柱形状

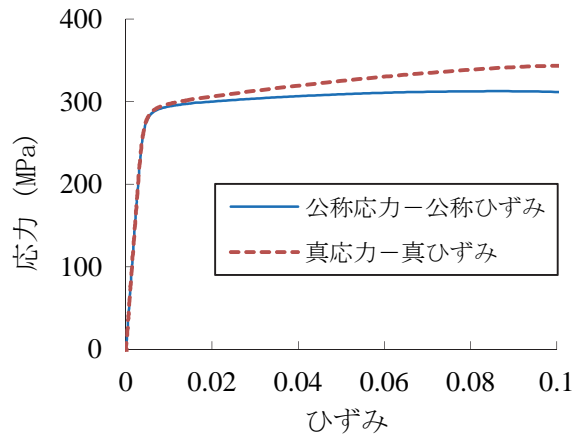


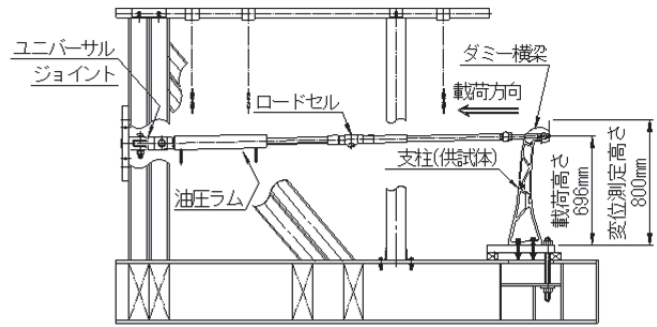
図-6 引張試験における応力-ひずみ関係

表-1 アルミニウム合金板材の材料試験結果

ヤング率 (GPa)	72.9
ポアソン比	0.362
降伏点応力 (MPa) (0.2%耐力)	280
引張強さ (MPa)	294
伸び (%)	20.1

でも、図-7に示すように、主要横梁中心高さに水平荷重 P を作用させ、変位 300mm まで载荷することによって、荷重と変位を測定し、極限支持力 P_w を算出した。

実験手順は、まず1) 支柱を図-7の実験装置の支柱ベースにセットしアンカーボルトで固定し、2) 支柱に主要横梁のダミー(アルミニウム合金製・機械加工)を所定のボルトにて固定し、3) 油圧ラムを用いてダミー横梁に荷重を载荷させ、支柱を载荷方向に 300mm 変形させるまで静的に荷重载荷する。なお、支柱の荷重は図-7(a)に示すロードセルにより計測し、変位は、測定位置は高さを 800mm とし、巻き取り式変位計により計測している。



(a) 実験装置概略図



(b) 実験装置写真

図-7 静的载荷実験装置



図-8 変形モード (300mm 変位時)

c) 静的载荷実験結果

実験における300mm変位後の支柱の変形を図-8に示す。支柱の強度実験は、2つの供試体で実施し、ほぼ同じ荷重-変位曲線が得られたが、支柱の極限支持力 P_w は小さい方の実験結果を採用することが基準において規定されている。また、静的载荷実験での荷重は、前述したとおりロードセルを用いて計測しているが、荷重载荷高さ

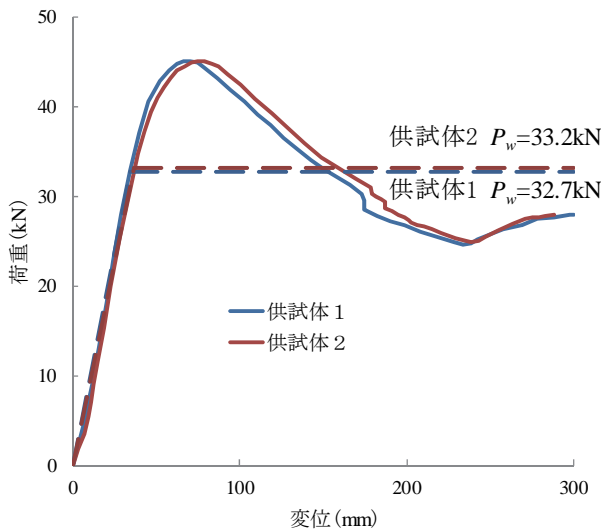


図-9 荷重－変位曲線

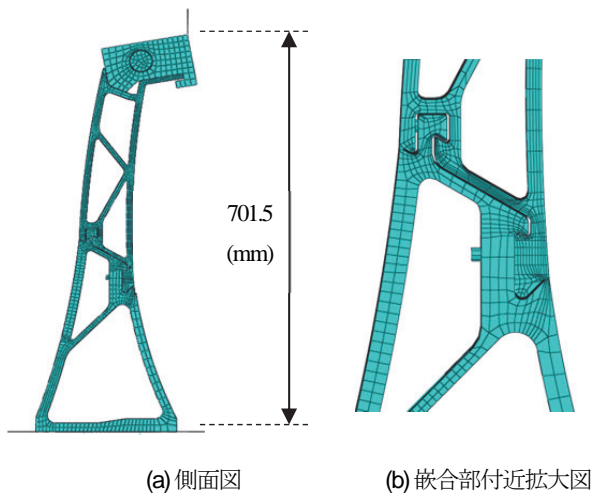


図-10 防護柵支柱解析モデル

は701.5mmであるため、防護柵・設置基準同解説に従い、実測荷重 P' を荷重載荷高さ800mmとした荷重 P に換算する必要がある。また、支柱幅が70mmであるため、想定するA種支柱幅の145mmに換算を行う。換算荷重 P は式(1)に示すとおりである。

$$P = \frac{701.5}{800} \times \frac{145}{70} \times P' \quad (1)$$

静的載荷実験より得られた荷重－変位曲線の結果を、図-9に示す。また、図-9に示すように部材のエネルギー吸収と同じ面積を持つ台形に置き換えて算出した極限支持力 P_w は、32.7kN（もう一体は 33.2kN）であった。これは、図-23にプロットしたように、防護柵横梁の極限曲げモーメント M_0 が 50kN・m のとき、支柱としてはA種防護柵の最小の極限支持力 $P_w = 31.8\text{kN}$ を超えており、支柱の強度条件を十分に満足するものである。横梁

の極限曲げモーメント M_0 を 50kN・m としたのは、この値が部材選定領域グラフで要求されるA種横梁の最低値であり、この値での支柱の極限支持力を考えるのが良いと考えたからである。

支柱は変位が進むにつれ、まず支柱下部の後部フランジ材が座屈し、支柱下部の斜め材に亀裂が生じた。後部フランジ材の座屈変形が大きくなると、斜め材に接触し、座屈変形が抑制されるので、荷重が最後に若干増加したが、その後斜め材の下端が破断する過程となった。図-9からは、斜め材の破断により、荷重ピークを迎えた後の支柱変位 175mm 近傍で荷重が 3kN ほど低下していることがわかる。

(3) 板材を用いた支柱の数値解析モデルの開発

a) 解析モデルの作成

新型防護柵支柱の性能を明らかにするため静的解析を行った。計算には汎用性有限要素解析プログラム Abaqus Ver6.11 (SIMULA 社)^{19,20)}を用いた。防護柵支柱の解析モデルを図-10に示す。防護柵支柱は、形状を正確に再現した後、支柱上部を1次低減積分 solid 要素、実験で変形の大きかった支柱下部を2次完全積分 solid 要素としてモデル化した。また、支柱ベースプレートの下に完全固定の剛体プレートを設け、支柱との接触条件を与えた。その他、防護柵支柱モデル化の詳細を以下に示す。なお、支柱モデルの要素数は 8504 であり、数値解析は名古屋大学情報基盤センターのスーパーコンピュータ CX400（富士通製、計算速度 470 テラフロップス）を用いた。

支柱上部と支柱下部の接合のモデル化に関しては、嵌合部を詳細にモデル化し、結合拘束を用いず、接触条件のみを設定した。対象防護柵は、嵌合部において、図-5に示すように、前面には M8×50、後部には六角穴付き止めネジ M8×12 のステンレスボルトをそれぞれ 2 使用している。また、静的載荷実験より、300mm 変位後の嵌合部において、M8×50 にはわずかな塑性変形が生じていたことを確認した。そこで、これらボルトについても1次低減積分 solid 要素としてモデル化した。

また、M8×50 皿ボルト接合のため、支柱上部にはφ10の穴加工に加え皿穴加工が、支柱下部には、M8のタップ加工が施されている。そこで、図-11に示すように、上部支柱には供試体同様にφ10の穴加工と皿穴加工を設け、M8×50ボルトをモデル化した solid 要素との接触条件を与えた。支柱下部と、M8×50ボルトとの結合に関しては、Abaqusの埋め込みの条件を与えている。圧縮フランジ側の M8×12ボルトについては、上部支柱と下部支柱の両方に埋め込みの条件を与えている。なお、接触に関するアルゴリズムはペナルティ法を用いた。

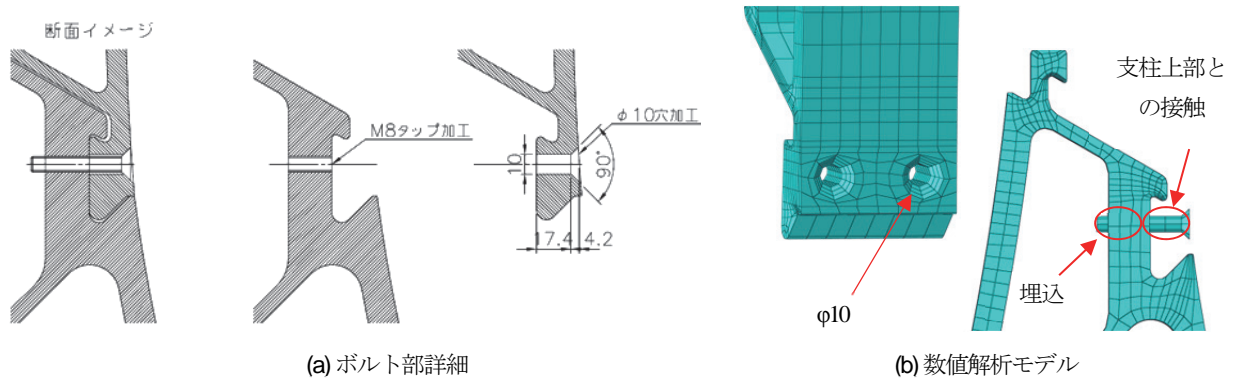


図-11 支柱嵌合部

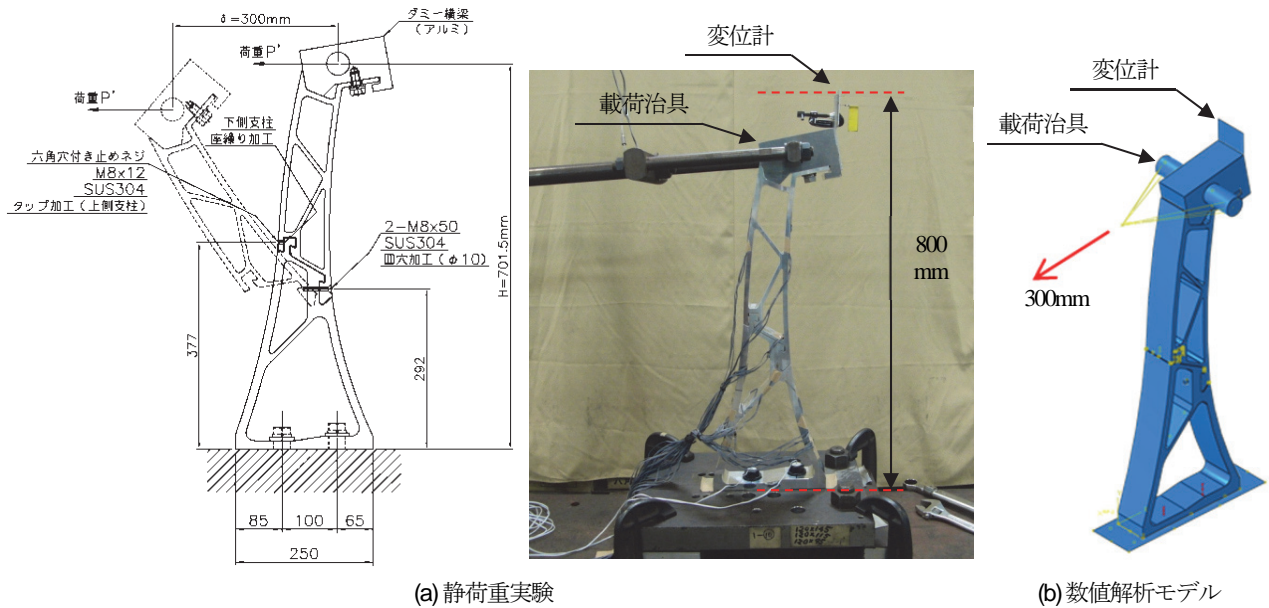


図-12 実験装置の変位計と数値解析モデル

ダミー横梁についても、支柱と同様に 1 次低減積分 solid 要素としてモデル化した。接合部の M16×35 ボルトについては、嵌合部のボルト同様、1 次低減積分 solid 要素としてモデル化した上で、ダミー横梁と上部支柱の両方に埋め込みの条件を与えた。

静的荷重実験では、荷重載荷高さ 701.5mm であるのに対し、変位測定点は、高さ 800mm 箇所であり、静的解析でも同様に、800mm 地点での変位を算出する必要がある。そこで、変位計、治具についても図-12 のように、一部モデル化し、実験治具とダミー横梁の接触も考慮した上で 300mm 変位のシミュレーション解析を行った。また、図-12(b)に示すように実験では、荷重器具の基部接続位置にはユニバーサルジョイント(自由継手)を用いており、荷重位置の変位と回転は自由であることから、解析においても荷重点の拘束はしていない。

解析で使用したアルミニウム合金の材料定数は、それぞれの供試体で使用された材料の引張試験から得られた図-6 に実線で示す実験の公称応力-公称ひずみ関係を、

破線で示す真応力-真ひずみ関係に修正し用いた。支柱嵌合部に用いられているステンレスボルト材料の SUS304 については、完全弾塑性体とし、降伏応力は JIS 規格から、 205N/mm^2 とした。ダミー横梁との接合ボルトには A2-70 SUS、防護柵支柱を固定するアンカーボルトには SCM435 が用いられており、これらも SUS304 と同様に完全弾塑性体とし、降伏応力をそれぞれ 450N/mm^2 と 785N/mm^2 に設定した。

アンカーボルトは軸力と曲げ挙動を検討するため、梁要素でモデル化した。また、支柱に変位を与えるステップの前にボルト荷重を付与するステップを設け、プリテンションを与えた。プリテンションの荷重は、静荷重実験で計測された値(前部アンカー 34.8kN、後部アンカー 33.6kN)を与えた。

b) 静的数値解析

上記のモデルで 300mm 変位の静的数値解析の結果を静的荷重実験の結果と比較して以下に考察を行う。

300mm 変位時の防護柵支柱の変形図を図-13 に、嵌合



図-13 300mm 変位時の変形図

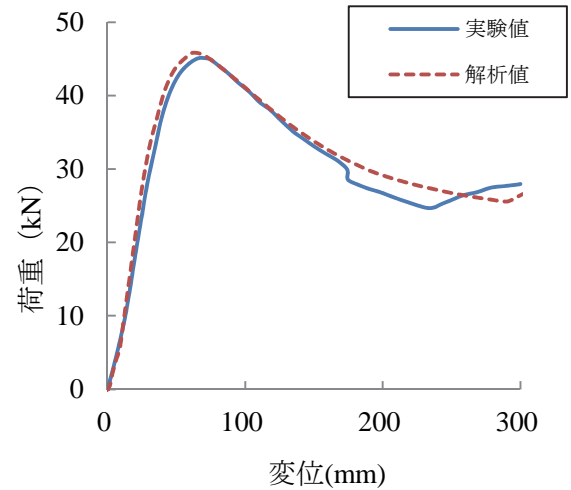
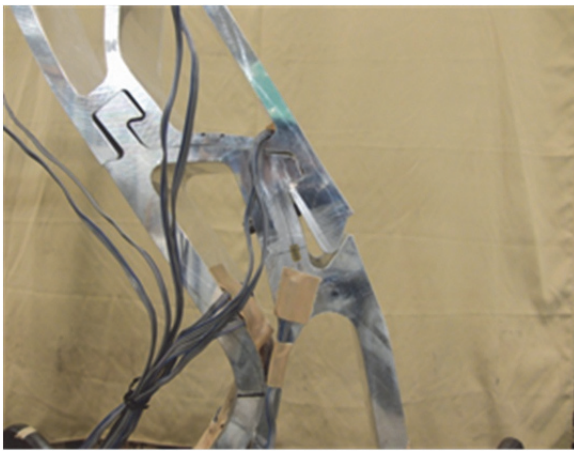


図-15 荷重－変位曲線の比較



(a) 実験



(b) 数値解析

図-14 嵌合部拡大図

部について拡大した変形図を実験の写真と併せて図-14に示す。図-8 及び図-14 より、支柱の変形形状については、数値解析と実験結果は良い一致を示している。支柱底部については、アンカーボルトのみで固定しているため、ベースプレート端部にわずかながら浮き上がりが生じたが、数値解析でも同程度の浮き上りを示した。また、嵌合部の前部ボルトについても、実験と同様に数値解析でわずかに塑性変形が生じていたことを確認した。

静的数値解析より得られた荷重－変位曲線の結果を実験結果と併せて図-15 に示す。解析結果と実験解析を比較すると、初期剛性、最大荷重および最大荷重後の挙動とも良く一致している。また、解析で得られた極限支持力 P_w は、33.5kN であり、実験結果の 32.7kN と近い値となった。

図-16 に 300mm 変位時における最大主ひずみのコンター図を示す。支柱に用いられた材料の引張試験における引張強度時の伸びは 8.9%、破断時の伸びは 19.3%である。図-17 より、300mm 変位時において、斜め材は、この破断時のひずみを上回っている。後ろフランジ部においてもコンター図より、破断ひずみを上回っていることが分かる。

面内主ひずみ方向を確認し、図-17 と図-18 に示す要素(要素 C、要素 D)に着目し、実験のひずみゲージ(斜め材：No.53、後ろフランジ材：No.14)より得られた値との比較を図-19 に示す。図-19(a)の実験のひずみが変位量 100mm 近くまでしか得られていないが、これはひずみゲージ測定の限界を超えたためである。図-19 は横軸に支柱の変位、縦軸に各ひずみをとっている。

解析値については、実験でひずみゲージが貼付された箇所に対応する要素を抽出している。図-19 より、解析で得られたひずみは、実験で計測されたひずみの挙動とよく一致している。また、図-19(b)における後ろフランジ材については、支柱変位 300mm においても計測された破断ひずみには達していないが、図-19(a)における斜め材については、支柱の変位が 150mm 前後で、破断時の伸びに達しているため、亀裂が生じると考えられる。前述したように、図-15 の荷重－変位曲線において実験値の曲線は、変位が 175mm のとき、一時的な荷重の低下がみられるが、これは、斜め材の亀裂が原因であることが数値解析でも示すことが出来た。

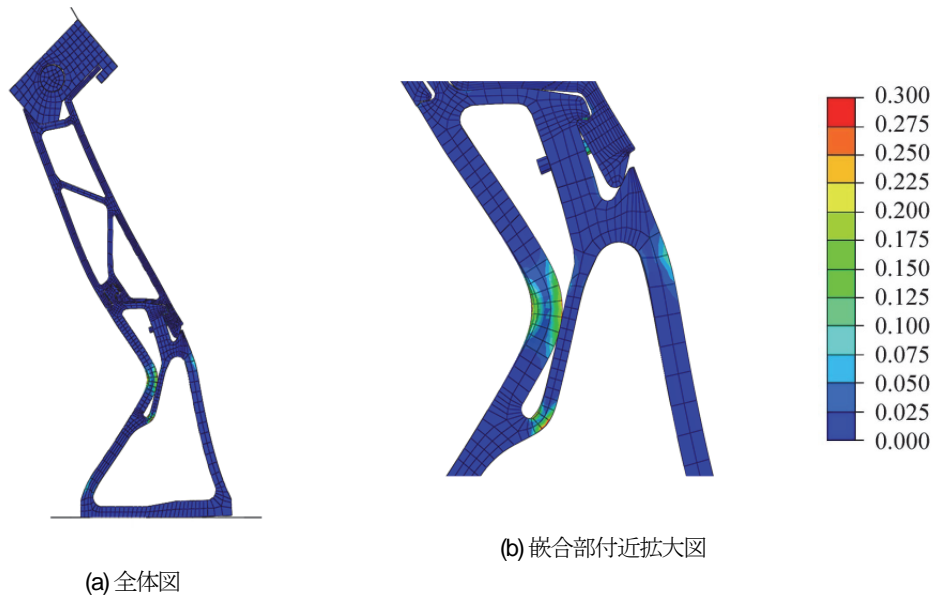


図-16 主ひずみのコンター図

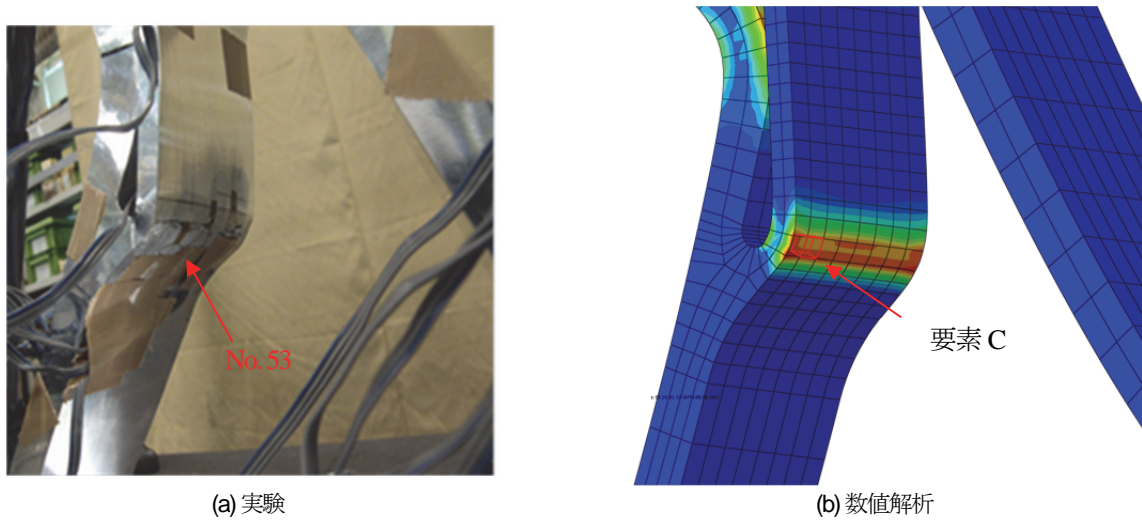


図-17 ひずみの対象要素(斜め材, 300mm 変位時)

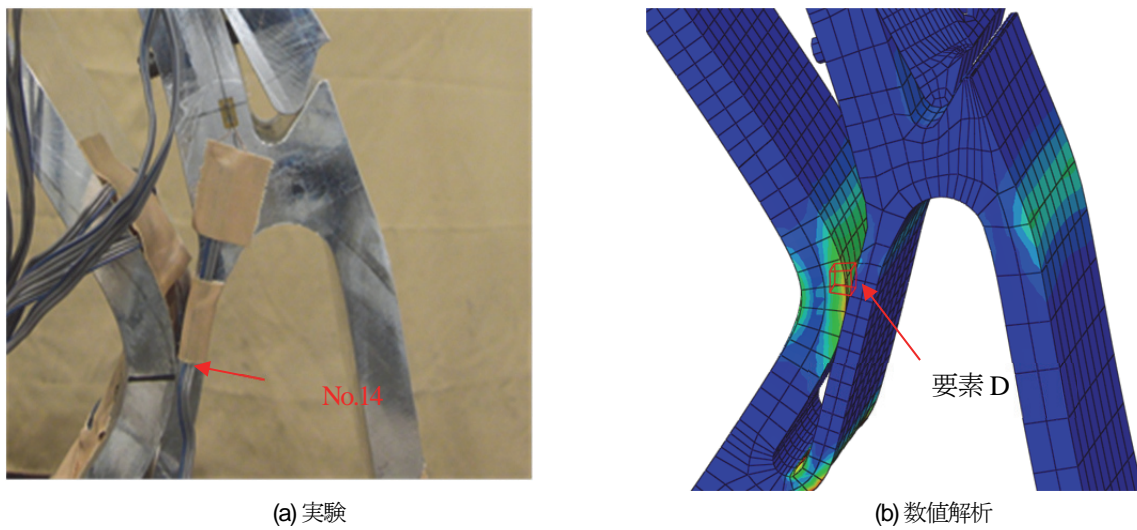


図-18 ひずみの対象要素(後ろフランジ, 300mm 変位時)

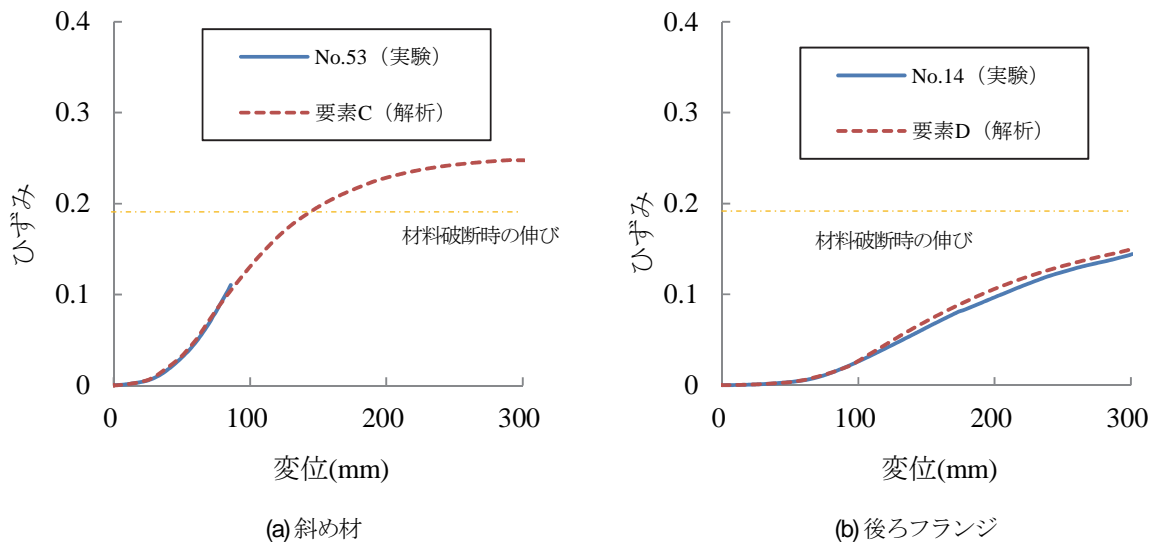


図-19 支柱変位－ひずみ曲線(板材)

4. アルミニウム合金押出型材のビーム型防護柵支柱への適用

(1) はじめに

板材を用いた供試体によって支柱性能を確認した後、実際に実物の支柱ダイスを起型し、製作した支柱幅145mmと120mmの各3体ずつの実寸法の防護柵支柱の静的載荷実験及び数値解析を行い、性能評価を行った。

(2) 押出型材を用いた防護柵支柱の実験

a) 材料試験

製作した型材防護柵支柱に対し、板材の予備実験と同様に材料試験を行った。試験片は、押出型材支柱から切り出し、3本製作した。試験方法は、板材のときと同様である。応力－ひずみ曲線を図-20に示す。また、材料試験の3体の平均値を表-2に示す。押出型材の降伏点応力(0.2%耐力)と伸びは、わずかに板材に比べ小さな値となった。

b) 支柱の静的実験結果

支柱幅 $W=145\text{mm}$ の3体のA種防護柵支柱(SA-1, SA-2, SA-3)の静荷重実験における300mm変位時の支柱変形図を図-21(a)に示す。支柱の変形過程は、予備実験である板材支柱とほぼ同様であった。実験で得られた3体の荷重－変位曲線を図-22(a)に示す。曲線の色を変えて、極限支持力の値との対応を取っている。これより、支柱の極限支持力 P_w の最小値(SA-3)は、31.8kNとなった。図-23に、防護柵設置基準・同解説の橋梁用防護柵の部材選定領域グラフにこの結果をプロットしたものを示す。図-23に示すように、今回の支柱は、部材選定領域グラフの横梁の極限曲げモーメント M_0 が $50\text{kN}\cdot\text{m}$

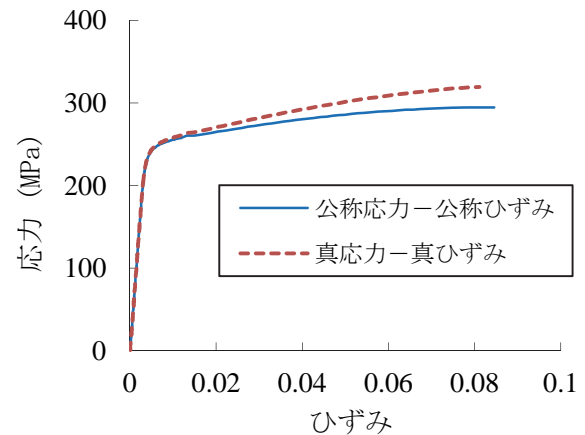


図-20 荷重－変位曲線の比較

表-2 アルミニウム合金押出型材の材料試験結果

ヤング率 (GPa)	71.1
ポアソン比	0.329
降伏点応力 (MPa) (0.2%耐力)	261
引張強さ (MPa)	312
伸び (%)	17.2

のとき、A種防護柵支柱の極限支持力が最小となる $P_w = 31.8\text{kN}$ と同値であるが、横梁の極限曲げモーメントを大きくすれば、強度条件を十分に満足するものである。また、支柱幅を120mmとした、3体のB種防護柵支柱(SB-1, SB-2, SB-3)について同様の実験を行った結果を図-22(b)に示す。SB-3の最大荷重の発生位置が他の試験体に比べて早く、極限支持力は26.4kNとわずかに小さいが、図-23に示すように、この値も部材選定領域グ

ラフのB種防護柵支柱の25kNを超えている。

(3) 押出型材を用いた支柱の数値解析結果と実験結果の比較

板材支柱と同様に、押出型材の支柱についても数値解析を行い、実験結果と比較した。解析モデルは、3.の板材供試体モデルと同様であるが、材料パラメータは押出型材の材料試験結果を用いている。A種防護柵の数値解析における支柱300mm変位時の変形図を図-21(b)に、荷重-変位曲線については図-24(a)に実験結果と併せて示す。これより、板材供試体同様、支柱の変形モードは概ね一致し、荷重-変位曲線についても良い一致を示している。支柱幅 $W=120\text{mm}$ のB種防護柵についても同様の数値解析を行い、その結果を図-24(b)に実験結果とともに示す。

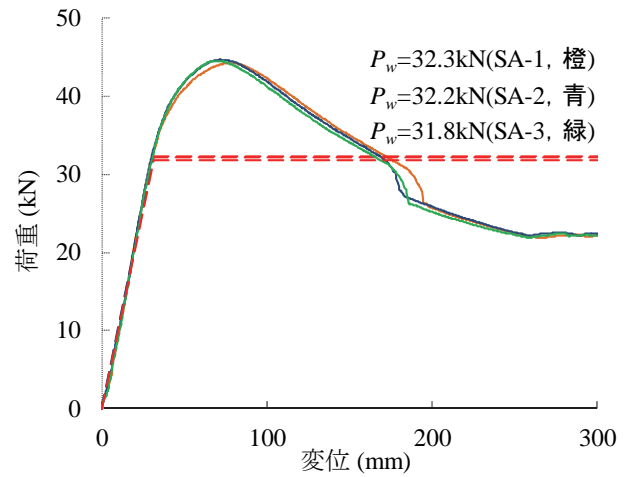
以上のことから、Abaqusを用いた静的数値シミュレ



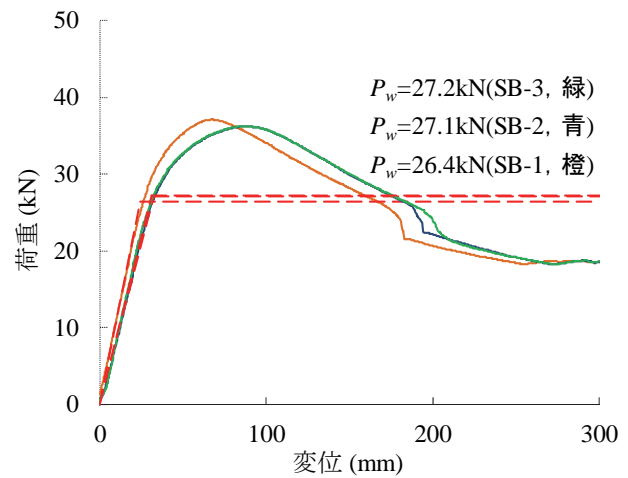
(a) 実験結果

(b) 数値解析結果

図-21 変形モード



(a) A種防護柵支柱



(b) B種防護柵支柱

図-22 荷重-変位曲線の実験値

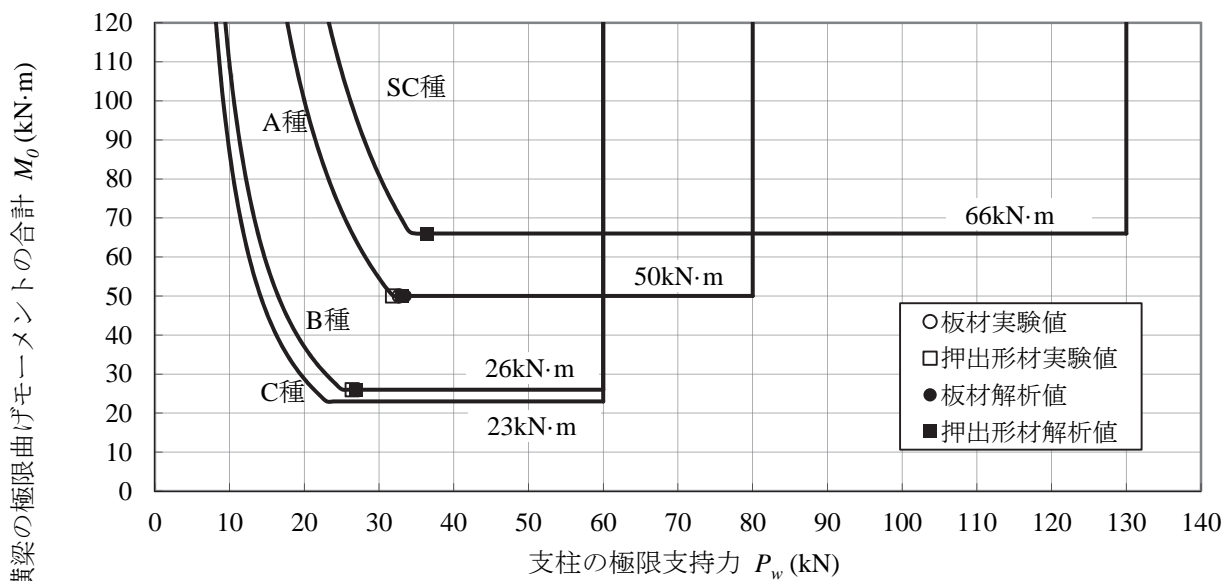
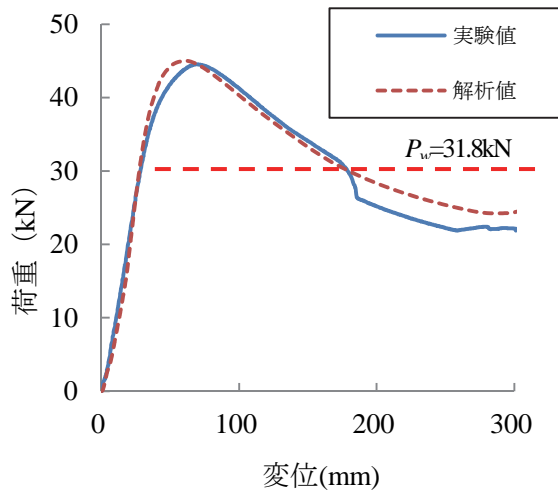
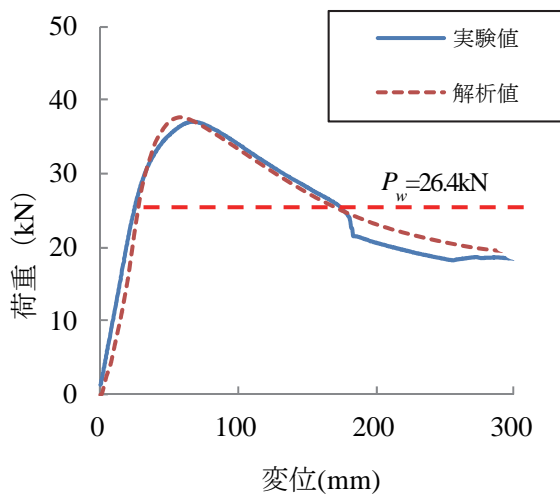


図-23 橋梁用防護柵 (C, B, A, SC種) の部材選定領域グラフにおける実験値と解析値



(a) A 種防護柵支柱



(b) B 種防護柵支柱

図-24 荷重-変位曲線の比較

ーションは、今回のような構造形式を有する防護柵においても、その挙動を再現するモデルを作成でき、今後の橋梁用ビーム型防護柵開発に有用であることを示した。

(4) 異なる防護柵種別への適用

A 種防護柵の支柱幅 W は、145mm であるが、SC 種（支柱幅 160mm、目標 $P_w = 34.3\text{kN}$ ）について、アルミニウム合金押出型材の支柱を適用するために、静的数値解析を行った。SC 種の支柱アンカーのボルト径は M20 から M22 にアップしたが、嵌合部のボルト径は変えずにボルト本数を 1 本追加している。

図-25 に、A 種、B 種、SC 種の荷重-変位曲線と極限支持力 P_w の値を示す。また、図-23 の部材選定領域グラフに、A 種、B 種、SC 種の P_w の解析結果をプロットしたものを示す。C 種については、アンカーボルトのピッチと縁端距離を考慮し、アルミニウム合金の押出型材の支柱幅は 120mm を最小としており B 種と同様の幅

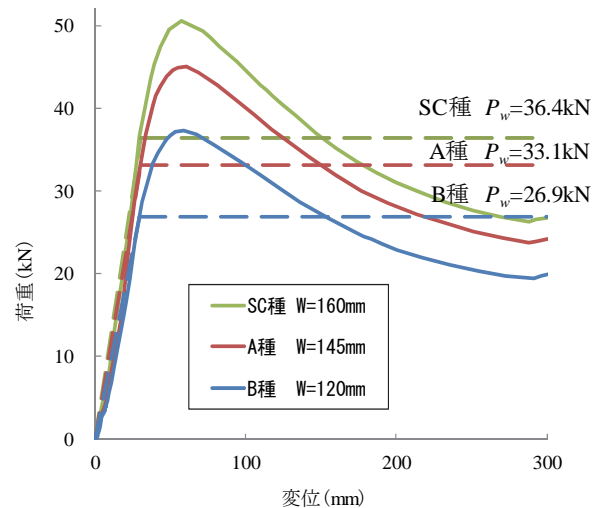


図-25 A 種、B 種、SC 種の荷重-変位曲線

を使用することになっている。この図より、3 種の防護柵支柱は、所定の目標極限支持力 P_w の値を満足していることが分かる。なお、目標極限支持力 P_w は、防護柵横梁の極限曲げモーメント M_0 を最小としたときの部材選定域に収まる値としており、横梁の極限曲げモーメントを大きくとれば、支柱の目標極限支持力 P_w の値は、もっと小さくても使用可能である。

5. 結論

本研究では、アルミニウム合金押出型材を用いた支柱を、防護柵設置基準・同解説書の橋梁用ビーム防護柵の部材選定領域グラフに基づいて、静的載荷実験と数値解析シミュレーションを用いて開発し、その性能を明らかにした。その結果、得られた結論は以下のとおりである。

- 1) 嵌合構造を有する新型のアルミニウム合金押出型材を使った景観に優れた支柱を開発し、300mm まで水平変位させる静的載荷実験を行い、支柱の極限支持力を求め、部材選定領域グラフの要求性能を有していることを明らかにした。
- 2) アルミニウム合金押出型材を用いた支柱の静的数値解析を行い、実験結果と良い一致を示す数値解析モデルを作成した。今後、新たなビーム型防護柵を開発する場合に、有限要素法を用いた数値解析が、静的載荷実験を補完できる可能性を示した。
- 3) 静的数値解析より求めた最大主ひずみの値は、静荷重実験で計測されたひずみゲージの値とも良い一致を示した。また、事前に行われたアルミニウム合金材料引張試験の結果と静的数値解析より得られたひずみを比較することにより、数値解析においても材料の破断の検討が可能で

あることを示した。

- 4) アルミニウム合金押出型材から切り出す支柱幅を変える事によって異なる種別の防護柵に対応できることを示した。

多室ホロー断面を持つアルミニウム合金押出の支柱は、今回新たに開発されたものであり、動的・衝撃挙動を把握するための実験によって、部材は飛散しないことを明らかにしているが、今後別稿でその内容を示す予定である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：防護柵の設置基準・同解説，丸善，2008.
- 2) 財団法人国土技術研究センター：景観に配慮した防護柵の整備ガイドライン，大成出版社，p.1, pp.20-21, p.30, 2004.
- 3) 伊藤義人，伊藤誠慈，北根安雄，高堂治：景観性に配慮した橋梁用防護柵の衝突性能に関する実験的・数値解析的研究，土木学会論文集 AI, Vol.,68, No.2, pp.413-426, 2012.
- 4) Thanh, L., Itoh, Y., Itoh, S. and Takadoh. O.: Performance of new-type curved steel bridge railings subjected to heavy truck collisions, *Journal of the Society of Materials Science, Japan, JSMS*, Vol.62, No.10, pp.607-614, 2013.
- 5) 伊藤義人，宇佐見康一，貝沼重信，杉江昌宣：アルミニウム合金製防護柵の実車衝突に関する数値解析的研究，構造工学論文集，Vol.45A, pp.1707-1717, 2001.
- 6) 伊藤登，天野光一，三上聡，横山公一，高堂治：アルミニウム合金製橋梁用ビーム型防護柵のデザインと開発，景観・デザイン研究論文集，No.6, pp.1-10, 2009.
- 7) 遠藤啓，天野光一，横山公一：景観配慮型防護柵が道路景観に与える影響に関する基礎的研究，景観・デザイン研究講演集，No.6, pp.6-10, 2010.
- 8) 建設省土木研究所，軽金属協会：アルミニウム合金製高欄に関する共同研究報告書，1987.
- 9) 建設省土木研究所，軽金属協会：アルミニウム合金製高強度型防護柵の開発に関する共同研究報告書，1990.
- 10) 建設省土木研究所，日本アルミニウム協会：アルミニウム合金製橋梁用車両防護柵の設計手法に関する共同研究報告書，1999.
- 11) 建設省土木研究所，軽金属協会：アルミニウム合金製高強度型防護柵の開発に関する共同研究報告書，1990.
- 12) 建設省土木研究所ほか：アルミニウム合金製橋梁用車両用防護柵の開発に関する共同研究報告書，1999.
- 13) 日本規格協会：JIS ハンドブック 2 非鉄，1999.
- 14) 土田信，吉田英雄，平野清一：アルミニウムの熱処理，住友軽金属技報，Vol.31, p.134, 1990.
- 15) 軽金属協会：アルミニウム材料の基礎と工業技術，1985.
- 16) 軽金属協会：アルミニウム合金構造設計便覧，1975.
- 17) 住友軽金属工業株式会社：アルミニウムハンドブック，1971.
- 18) (社)アルミニウム協会土木製品開発委員会 耐久性分科会：都市内高架構造物用の景観被覆アルミニウム材料10年間暴露調査報告書，2006.
- 19) SIMULIA:Abaqus 6.12 PDF DOCUMENTATION Analysis User's Manual,2012.
- 20) SIMULIA:Abaqus 6.12 PDF DOCUMENTATION Theory Manual,2012.

(2014.8.13 受付)

STUDY ON PERFORMANCE OF A NEWLY DEVELOPED BRIDGE RAILING USING EXTRUDED ALUMINUM-ALLOY POST

Yoshito ITOH, Akihiro YOSHINO, Masashi SAKEMI and Ryoichi SATO

A new type of post for the bridge railing has been developed using the extruded multi-hollow-type shape of aluminum-alloy to have the improved landscape and permeability. First, static tests and numerical analyses simulation have been performed using model posts made from aluminum alloy plate to determine the multi-hollow-type sectional dimensions. Then, extruded posts have been tested and analysed to prove the performance following the code for the design of the railing in Japan. The new type of post can be used for different strength types of bridge railing changing the width when cutting the extruded member.