

斜め引張力を受ける落橋防止装置ブラケット 付近の挙動に関する実験的検討

野阪 克義¹・安達 篤志²・伊藤 満³

¹立命館大学講師 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

E-mail:k-nozaka@se.ritsumei.ac.jp

²立命館大学大学院 理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

E-mail:rd000024@se.ritsumei.ac.jp

³立命館大学教授 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

E-mail:mitsuru@se.ritsumei.ac.jp

落橋防止システムは桁の下部構造からの完全な逸脱に対するフェイルセーフ機能を持つものと規定されており、様々な条件の下でその安全性を検討する必要があると考えられる。本研究は、ケーブル形式の落橋防止構造を対象として、桁が横にずれ動き、斜め方向に引張力が作用する条件の下で落橋防止装置ブラケット付近がどのような挙動を示すかを実験的に検討したものである。実験結果より、落橋防止装置取り付け部および付近のウェブに生じる応力は単純に引張力を受ける場合と変わらず小さいが、斜め引張力によりケーブルが桁および垂直補剛材に接触、残留変形を生じることが確認された。死荷重の影響を考慮すると、地震後のせん断耐荷力に対する安全性への検討が必要であることがわかった。

Key Words : unseating prevention cables, bracket plates, strength

1. はじめに

1995 年 1 月 17 日に発生した兵庫県南部地震によって社会基盤としての交通施設の多くが被害を受け、その中には高架橋や橋梁も含まれていた。これら橋梁構造物の長期間にわたる機能停止は、社会経済活動にも大きな被害をもたらした^{1,2)}。

橋梁には、地震時に桁が橋脚から逸脱するという被害を防ぐためにいくつかの対策が講じられていたが、設計基準が 1980 年以前の旧基準によるのもであったことも原因のひとつとなり、いくつかの橋梁で落橋の被害も発生した。そのため、1996 年、さらには 2002 年に道路橋示方書は改訂され^{3,4)}、大地震時において上部構造の落下を防止する目的（フェイルセーフ機能）で落橋防止システムを設けることが明記されてきた。それに伴い、様々な落橋防止構造に関する研究も行われてきた^{5)~7)}。

落橋防止構造の一つとしてケーブルを用いて隣接する桁同士を、または桁と橋脚等を連結するものがある。このような構造においては、ケーブルの耐力を重視した検討がなされてきているが^{8,9)}、ケーブルの桁への定着部周辺に作用する応力などに関する研究は限られた数しか

ない。さらに、落橋防止装置取り付け部の強度に関する既往の研究^{9,10,11)}では、ケーブルに作用する力は、橋軸方向に桁同士が離れる場合のみを想定しており、桁が横にずれ動きウェブの面外方向に力が作用する場合や、落橋時に作用する力を考慮していない。落橋防止装置はフェイルセーフとしての機能が期待されているため、様々な条件の下での検討が必要である。

本研究では桁間連結ケーブル型の落橋防止装置をとりあげ、落橋防止装置取り付け部の変形や応力状態などを静的載荷試験によって検討することを目的としている。

2. 実験概要

(1) 供試体

本研究で用いた供試体は、財団法人土木研究センター、落橋防止構造に関する研究委員会 平成 16 年度報告書¹²⁾の中で提案されている落橋防止装置設計例をもとに、主桁のみを約 2/3 に縮小したものであり、単純桁の桁端のみを切り出してモデル化した。供試体寸法および落橋防止装置ブラケット詳細を図-1 に示す。

供試体は I 型断面主桁のみであり、上下フランジの厚

さおよび幅は、それぞれ 6mm, 140mm, ウェブの厚さおよび高さは、それぞれ 6mm, 1200mm である。材質はすべて SM490A とした。垂直補剛材は板厚 6mm の SM490A 材を使用し、補剛材間隔は文献 12) に記載されていなかったため、実験で用いた落橋防止装置ブラケットの幅とほぼ同じと仮定した。落橋防止装置ブラケットにはすべて板厚 14mm の SM400A 材を用いた。文献 12) において、落橋防止装置ブラケットをウェブに添接するにあたり補強板 (SS400 材, 厚さ 6mm) がウェブ両側に用いられていたため、供試体においても補強板を設けることとした。供試体製作に用いた鋼材の引張試験を行った結果を表-1 に示す。

供試体の設計地震力は、文献 12) のケーブル 1 本あたりの設計荷重 ($1.5R_d/8=270\text{kN}$; R_d =死荷重反力) より、ケーブル 1 本あたり 120kN となり、ウェブ両側にケーブルが設置されるため合計 240kN となる。ケーブルには株式会社エスイー社製の F40TE (降伏強度 $P_y=330\text{kN}$) を用いた。载荷に用いたアクチュエーターは MTS 社製油圧式アクチュエーターで静的最大容量は 350kN である。

表-1 鋼材材料特性

鋼材	板厚 t (mm)	降伏応力 σ_y (N/mm ²)	引張強さ σ_u (N/mm ²)	ポアソン比 μ	弾性係数 E (N/mm ²)
SS400	6.03	342.5	459.1	0.28	213.91
SM490A	5.99	406.9	547.0	0.28	203.73
SM400A	14.38	259.1	427.3	0.28	189.05

(2) 载荷形式

供試体は 2 体製作し、単純に桁の長さ方向に水平に引張力を受ける形式 (α) と、桁が横にずれ動き、斜め方向 (桁の長さ方向から約 30 度) に水平に引張力が作用する形式 (β) の 2 種類について実験を行った。図-2、図-3 に β 形式の载荷時の配置 (平面図) および写真を示す。本実験に先立って行われた予備的な解析的検討では、 α 形式では供試体は十分な強度を持つと予想されていたため、今回の実験としては β 形式が主目的であり、 α 形式は計測データの比較、および実験装置の確認に用いるために製作した。また、支点に作用する死荷重反力は無視した。

β 形式の場合、供試体を一端のみで固定しているため曲げが生じることが予想された。実橋においては床版などにより曲げ変形が拘束されると考え、供試体に補剛材を設けて曲げ変形を拘束した。なお、床版は上フランジのみを固定するのであるが、実験では安全を考え上下フランジに補剛材を設けた。

(3) 計測

アクチュエーターに内蔵された計測器より荷重、およびピストンの変位を計測した。2 本のケーブルは取り付け用ブラケットを用いてひとつのアクチュエーターに接続されるため、各ケーブルに作用する引張力は計測できない。そのため、各ケーブルにセンターホール型圧縮荷

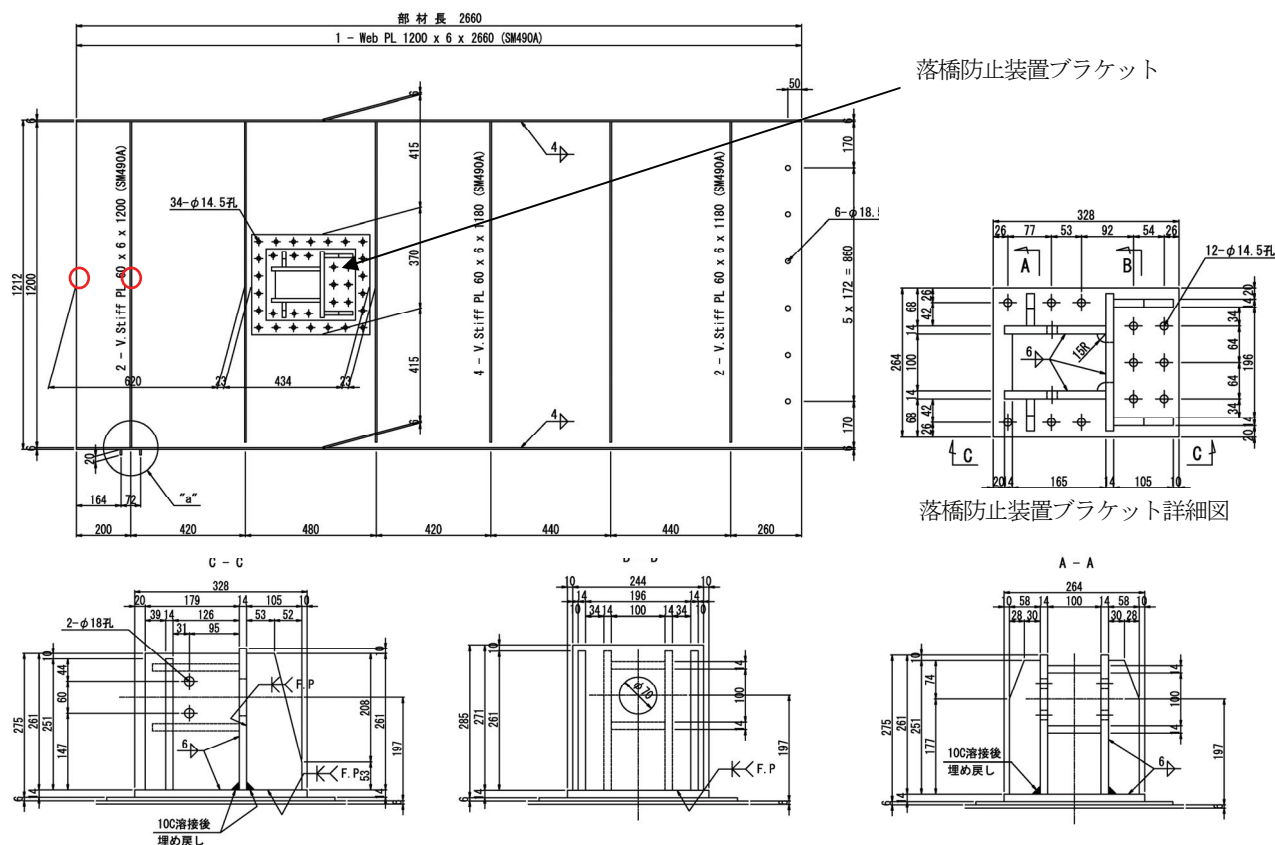


図-1 供試体寸法および落橋防止装置ブラケット詳細

重計を設置し（図-3 中にロードセルと表記している，以後ロードセルと呼ぶ），各ケーブルに作用する引張力を計測した。

落橋防止装置ブラケットおよびその周辺部に生じるひずみを測定するため，ひずみゲージを図-4 に示す箇所に貼り付けた．図中の番号はゲージ番号を示し，カッコ内に3つの番号が並んでいるものは3軸ゲージを示す。

これらは，引張力によりウェブに生じるせん断応力を確認するための落橋防止装置ブラケット下部の3点（図-4a），予備解析によって落橋防止装置ブラケット内で高い応力が生じると推測された箇所（図-4c），さらには斜め引張力が作用したときに大きな応力が生じると推測された，落橋防止装置ブラケットに近い垂直補剛材（図-4b）である．なお，載荷形式 α の場合には，垂直補剛材への影響は少ないと考えられたため，37，39，46，48番のゲージは設置されていない．図-4 中の右，左，および正面とはアクチュエーター側から見た場合の向きである。

3. 実験結果および考察

(1) 荷重－変位曲線

図-5 に α ， β 両形式において計測された荷重-変位曲線を示す．縦軸がアクチュエーターおよびロードセルに

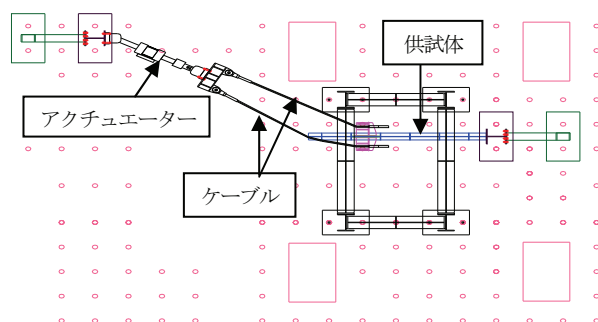


図-2 実験配置図

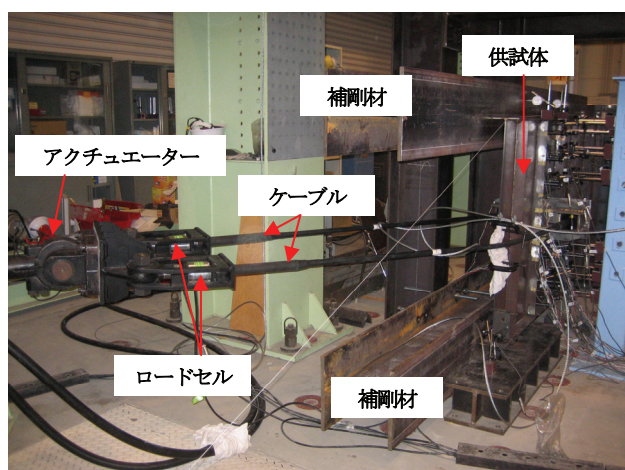


図-3 実験風景

より計測された荷重，横軸がアクチュエーターにより計測された変位である．したがって，変位には，供試体，ケーブルの伸びに加えて，アクチュエーターを固定している固定材の変形も含まれていることを注記しておく．

各載荷形式において，2つのロードセルの合計はアクチュエーターで計測された荷重とほぼ同じとなることが確認され，アクチュエーターの引張力が予定通りケーブルに伝達されていたことが確認された． α 形式においては，左右のケーブルで異なる荷重となることが懸念されていたが，実験結果よりほぼ同じ荷重であることが分かる．

α 形式において荷重-変位曲線の傾きが変位が10mm付近で変化しているが，これはアクチュエーターを固定していた固定材が変形してしまった結果であり，このグラフからは供試体の正確な剛性が判別しにくい結果となった．また，この固定材の変形が原因となり， α ， β 形式とも，供試体自身が耐力を失い荷重が低下する以前に，荷重がそれぞれ約180kN，約280kNにおいて載荷を中止した．しかしながら，本研究の主目的は β 形式であり，設計荷重（240kN）以上であるため供試体の挙動を理解するためには十分と考え，以降に結果および考察を示す．

(2) ウェブせん断応力

図-6 に落橋防止装置ブラケット下側のウェブに貼り付けられた3軸ゲージによって計測されたひずみ値から計算された，最大せん断応力の値を示す．縦軸にアクチュエーターで計測された荷重，横軸にせん断応力度を示しており，最大荷重までの変化を示している．

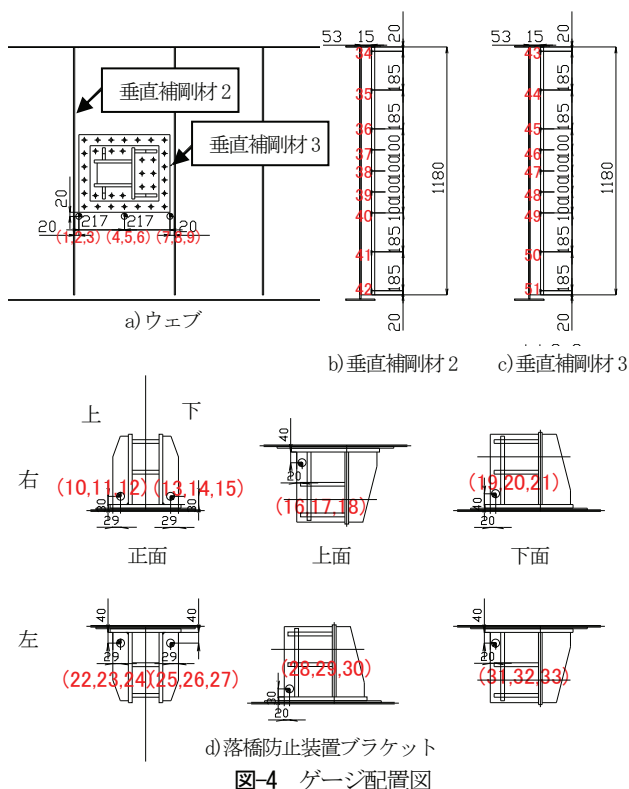


図-4 ゲージ配置図

これらより、すべての点において鋼材のせん断降伏応力度 (150N/mm^2) よりも小さく、降伏に至らず弾性範囲内であったことが分かる。なお、最大せん断応力以外に、等価応力などでも降伏について確認したが、すべての点において弾性範囲であった。

β 形式の荷重初期ではせん断応力が小さい点（ゲージ(4,5,6)）が見られるが、これは斜めに引張られ、面外曲げが卓越したことが原因であると考えられる。

(3) 落橋防止装置ブラケットにおける応力

荷重により、落橋防止装置ブラケットにどれだけの応

力が生じていたかを検討するため、3軸ゲージより求めた von Mises の等価応力を図-7 に示す。縦軸はアクチュエーターで計測された荷重であり、横軸は等価応力である。なお、 α 形式においては、試験前の予想通り落橋防止装置ブラケットに生じる応力が小さかったため、ここでは β 形式についてのみ示している。

β 形式においては、斜め方向に引張られるために落橋防止装置ブラケットをウェブから引き剥がす向きに大きな応力が生じるものと推測されていた。しかしながら、図よりわかるように、設計荷重時においても、降伏応力度 (259N/mm^2) の5分の1程度の小さな相当応力しか生

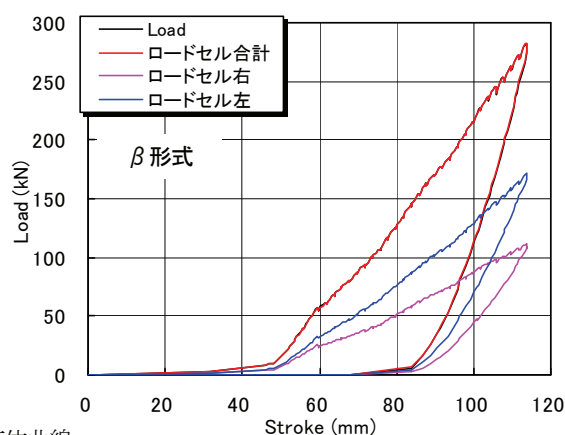
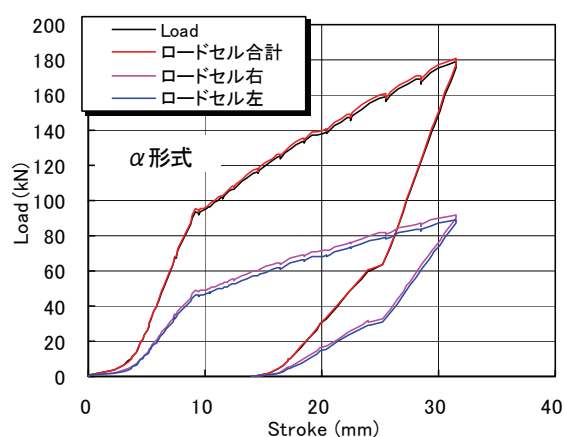


図-5 荷重-変位曲線

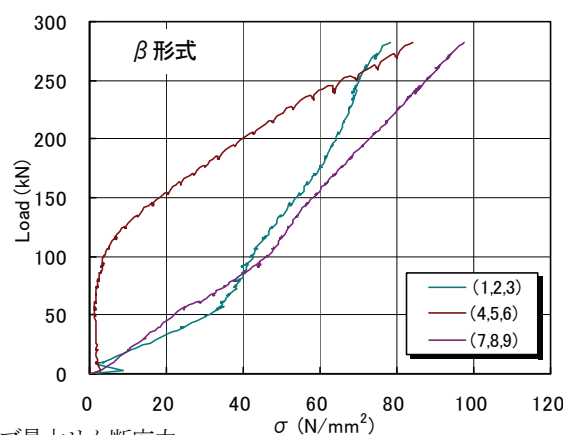
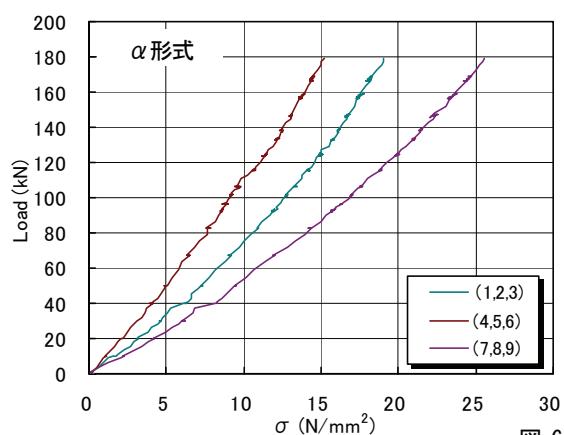


図-6 ウェブ最大せん断応力

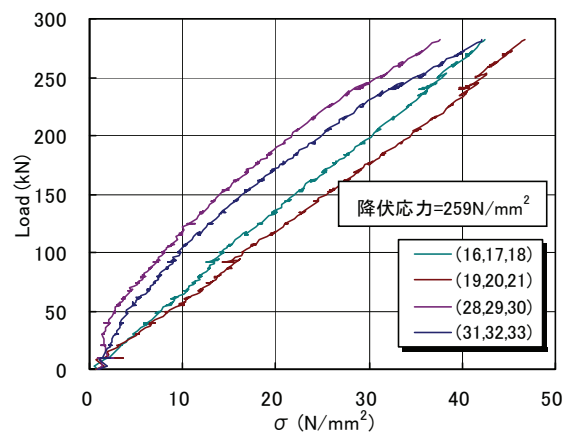
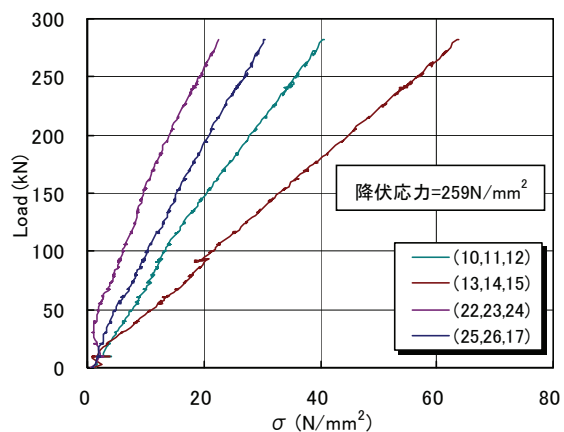


図-7 落橋防止装置ブラケットにおける等価応力 (β 形式)

じなかった。

載荷前の検討段階では、ゲージを貼り付けた位置（ブラケット先端、デビエーター付近）に局所的な応力が作用するものと考えられていたが、結果としてはブラケット全体で斜め方向の力に抵抗していたことが原因と思われる。また、後述するように、ケーブルが垂直補剛材に接触していたことも関連していたものと考えられる。

(4) 垂直補剛材ひずみ

β 形式において、斜め方向の引張力が垂直補剛材にどのような影響を与えたかを、図-8 に示す垂直補剛材ひずみによって考察する。縦軸はアクチュエーターで計測された荷重、横軸は垂直補剛材のひずみ（供試体高さ方向）である（ $\times 10^6$ ）。縦の赤線は使用鋼材の降伏ひずみを示している。

図-4 に示すように、ゲージ 34~42 は垂直補剛材 2、ゲージ 43~51 は垂直補剛材 3 に貼り付けられたゲージを示し、垂直補剛材 2 がアクチュエーター側に位置している。また、垂直補剛材は引張方向とは反対の面（図-2 の実験配置図において下側）のウェブに溶接されている。

図より、垂直補剛材中央付近に最も大きなひずみが生じており、ウェブの面外変形と同時に垂直補剛材も変形していることが分かる。垂直補剛材 2 においては荷重が 100kN 超えたあたりから降伏が始まっており、それに伴いひずみが顕著に増加している。

ひずみの増加は予想通りであったが、ひずみの増加と

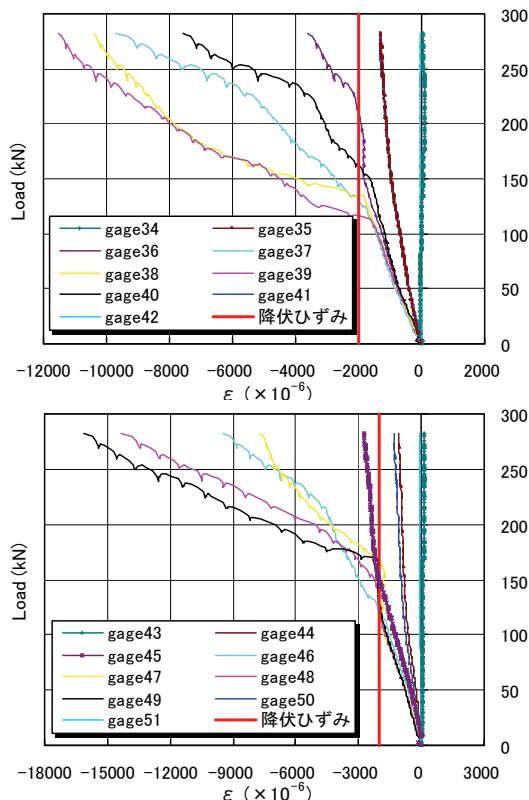


図-8 垂直補剛材ひずみ（ β 形式）

ともに垂直補剛材が座屈するのではないかと考えられていたことに反して、載荷終了まで補剛材が座屈することは無かった。これは、落橋防止装置ブラケット自体が補剛材の役目も果たしていたためではないかと考えられる。すなわち、垂直補剛材が座屈すると、ウェブの変形も同時に生じるはずであるが、ブラケットがあるためにウェブ変形が抑制されたのである。

垂直補剛材中央付近が降伏しひずみが大きくなるにつれ、供試体の挙動としては非線形性が現れてくるものと考えられていたが、図-5 から分かるように、垂直補剛材が降伏した後（荷重 100kN 以降）も荷重-変位関係に非線形性は見られなかった。これは、全体の剛性における垂直補剛材の寄与が小さかったとも考えられるが、載荷装置の関係上、供試体の変形とともにアクチュエーターの向きが変化した（図-2 中でアクチュエーターが回転可能）事も原因ではないかと考えられる。

(5) ケーブルとの接触と耐力に関する考察

前述のように、実験結果より落橋防止装置ブラケットに作用する応力は小さく、垂直補剛材が局部的に降伏したにも関わらず、耐力の低下は見られなかった。これらの結果は、ケーブルが供試体と接触していたことにも関連しているものと考えられる。

β 形式では斜め方向に載荷したため、ケーブルが供試体端部のウェブおよび端部に最も近い垂直補剛材（図-1 中赤丸で記した付近）に載荷初期から接触していた。実験後、供試体は図-9 に示す写真のように変形しており、ケーブルが接触していた点も局所的に変形していた。

一般的な落橋防止装置の設計、および本実験供試体の設計段階では、ケーブルにより供試体に加えられる力は落橋防止装置ブラケットのみを介して伝達されていると仮定されており、ケーブルが供試体に接触することにより伝達される力については考慮していない。この事が β 形式において予想以上の耐力を示した主な原因ではない



図-9 ウェブおよび垂直補剛材の変形（ β 形式）

かと考えられる。

しかしながら、本実験においては、死荷重は無視しており、死荷重によるせん断力は考慮していない。斜め引張力により桁端部の垂直補剛材やウェブに面外変形が生じた場合、せん断強度が減少するため、今後はせん断強度に関する検討が必要である。

4. 結論

本研究では、ケーブル形式の落橋防止構造を対象として、桁が横にずれ動き、斜め方向に引張力が作用する条件の下で落橋防止装置取付け部付近がどのような挙動を示すかを実験的に検討した。本研究で得られた主な結論は以下のとおりである。

- (1) 本実験結果によると、斜め引張力を受ける場合にも落橋防止装置ブラケット、および付近のウェブに作用する応力は小さく、設計荷重においても安全であることが分かった。
- (2) 斜め引張力を受ける場合、ケーブルが桁端部および垂直補剛材に接触し、複数の垂直補剛材が引張力に抵抗することが分かった。
- (3) 本研究で用いた部材において、落橋防止装置ブラケット付近の垂直補剛材は、斜め引張力による塑性化することが確認されたが、局部座屈を起こさず耐力の低下にはいたらない。
- (4) ケーブルが接触することにより、垂直補剛材が変形、桁に面外変形が生じた。これにより、死荷重に対するせん断耐力に関する検討が必要であることが分かった。

謝辞：本研究は、平成17年度科学研究費補助金・基盤研究 (B) 17360219「緩衝機能を有する落橋防止装置の耐力と変形性能の評価および動的設計法の開発 (研究代表者：伊津野和行 (立命館大学))」の一環として実施した。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 兵庫県土木部：阪神・淡路大震災誌，平成 7 年(1995 年)兵庫県南部地震—土木施工施設の地震災害記録—，1997。
- 2) 社団法人土木学会：阪神・淡路大震災調査報告—土木構造物の被害—第 1 章 橋梁，編集著作者 片山恒雄，1996。
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V．耐震設計編，1996。
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V．耐震設計編，2002。
- 5) 武野志之歩，大野敬美，伊津野和行：作動速度に基づく落橋防止用連結ケーブルと緩衝材の設計法に関する研究，土木学会論文集，No.731/463，pp.341-352，2003。
- 6) 北野武嗣，梶田幸秀，西本安志，鈴木智子，磯貝幸子：桁間衝突時の衝撃緩和・エネルギー吸収能力に与える緩衝材ゴム厚の影響，第 6 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.1-6，2003。
- 7) 梶田幸秀，杉浦邦征，渡邊英一：緩衝型桁間連結ケーブルを用いた高架橋の地震時応答性状，土木学会論文集，No.710/460，pp.297-310，2002。
- 8) 竹田周平，北浦勝，宮島昌克：エネルギー吸収機能を有する落橋防止装置の設計に関する解析的検討，構造工学論文集，Vol.52A，pp.315-326。
- 9) 木納利和，前野裕文，和田均，永谷秀樹：PC ケーブルを用いた落橋防止構造の静的・動的耐力実験 (その 1)，土木学会第 55 回年次学術講演会，I-B237，2000。
- 10) 木納利和，永谷秀樹，和田均：PC ケーブルを用いた落橋防止構造の静的・動的耐力実験 (その 2)，土木学会第 55 回年次学術講演会，I-B238，2000。
- 11) 松尾奈緒美，小嶋誠，後藤芳顕，前野裕文：PC ケーブルを用いた落橋防止構造の桁取り付け部の強度解析，土木学会第 55 回年次学術講演会，I-B239，2000。
- 12) 財団法人土木研究センター：落橋防止構造に関する研究委員会 平成 16 年度報告書，2005。

(2007.4.6 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON BEHAVIOR OF BRACKET PLATES FOR UNSEATING PREVENTION CABLES AND WEB UNDER SKEWED LOADING

Katsuyoshi NOZAKA, Atsushi ADACHI and Mitsuru ITO

An unseating prevention cable is designed as the fail-safe system; therefore, it is required to be tested under various situations in order to confirm the safety of the system during and after earthquake. In this report, steel girders with unseating prevention cables were loaded in tension either parallel to or skewed with the girder and the behavior of bracket plates and webs were investigated. Test results indicated that stresses in the bracket plates were under the yield stress for both cases; showing the adequate strength for the bracket under the design load. However, in the cases for skewed loading, the web and the end stiffener were deformed due to contact with the cable, indicating the decrease in the shear strength.