

錘落下実験による落橋防止ケーブル取付け部強度に関する検討

Study on strength of bracket plates and web plates for unseating prevention cables by falling weight test

野阪克義*, 藤原啓隆**

Katsuyoshi Nozaka and Hiroataka Fujiwara

*Ph. D., 立命館大学准教授, 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)

**工修, (株)フジエンジニアリング (〒532-0002 大阪府大阪市淀川区東三国 5-5-28)

Unseating prevention cables have been widely used to avoid bridges from unseating. However, it has not been thoroughly investigated that whether brackets and web plates where unseating prevention cables are connected are adequately designed against the loading during earthquakes. In this study, a steel girder with unseating prevention cables were loaded in tension by the falling weight simulating the case that a girder is unseated, then unseating prevention cables become active as the girder is falling down. Test results indicated that the elongation of the unseating prevention cables and the displacement of the falling weight were related by simple equations. It was also found that the brackets and the web panels have adequate strength against the loading by falling weight.

Key Words: unseating prevention cable, falling weight test, strength

キーワード: 落橋防止ケーブル, 錘落下試験, 耐荷力

1. まえがき

落橋防止構造は1964年に発生した新潟地震による甚大な被害を契機に考案された我が国固有の技術である。1971年の道路橋耐震設計指針に初めて取り入れられて以降、橋梁構造本体が被災した場合にも人命に関わる落橋を防止するフェイルセーフ部材として広く用いられてきた。現在では我が国だけでなく、世界各国で広く採用されている。

しかしながら、1995年に発生した兵庫県南部地震では落橋した橋梁も確認された。落橋した橋梁も落橋防止対策が講じられていたが、1980年以前の旧基準により設計されていたことも、落橋に至った原因の一つと考えられる。

兵庫県南部地震以降、道路橋示方書^{1), 2)}が改定され、大地震時において上部構造の落下を防止する目的で、桁かかり長・落橋防止構造・変位制限構造・段差防止構造からなる落橋防止システムを設けることが明記されてきた。落橋防止システムを構成する落橋防止構造には、地震時の衝撃的な力を緩和するためにゴムやバネなどの緩衝材を用いることが望ましいとされている。また、ケーブルを用いた2連の桁を相互に連結する落橋防止構造も数多く採用されてきた。

PCケーブルを用いた落橋防止構造においては、ケ

ーブルの耐力を重視した検討がなされてきているが^{3), 4)}、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。

PCケーブルを用いた落橋防止構造の静的・動的耐荷力実験^{5), 6)}や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⁷⁾では、数値解析によって変形形状や耐荷力について有用な情報を得られると報告されているが、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。

このように、ケーブルを用いた落橋防止構造において、ケーブル定着部の強度や破壊特性などに関する研究は少なく、合理的な設計法が確立しているとは言い難い。

本研究では、桁に取り付けた落橋防止ケーブルを用い、落橋時を想定した錘落下载荷試験装置を開発し、載荷実験を行い、ケーブルに生じる張力、および落橋防止装置取り付け部の応力状態などを検討した。これらを通して落橋防止ケーブル取り付け部及び桁の腹板における合理的な補強方法・設計法の提案に向けた基礎的データを得ることが本研究の目的である。

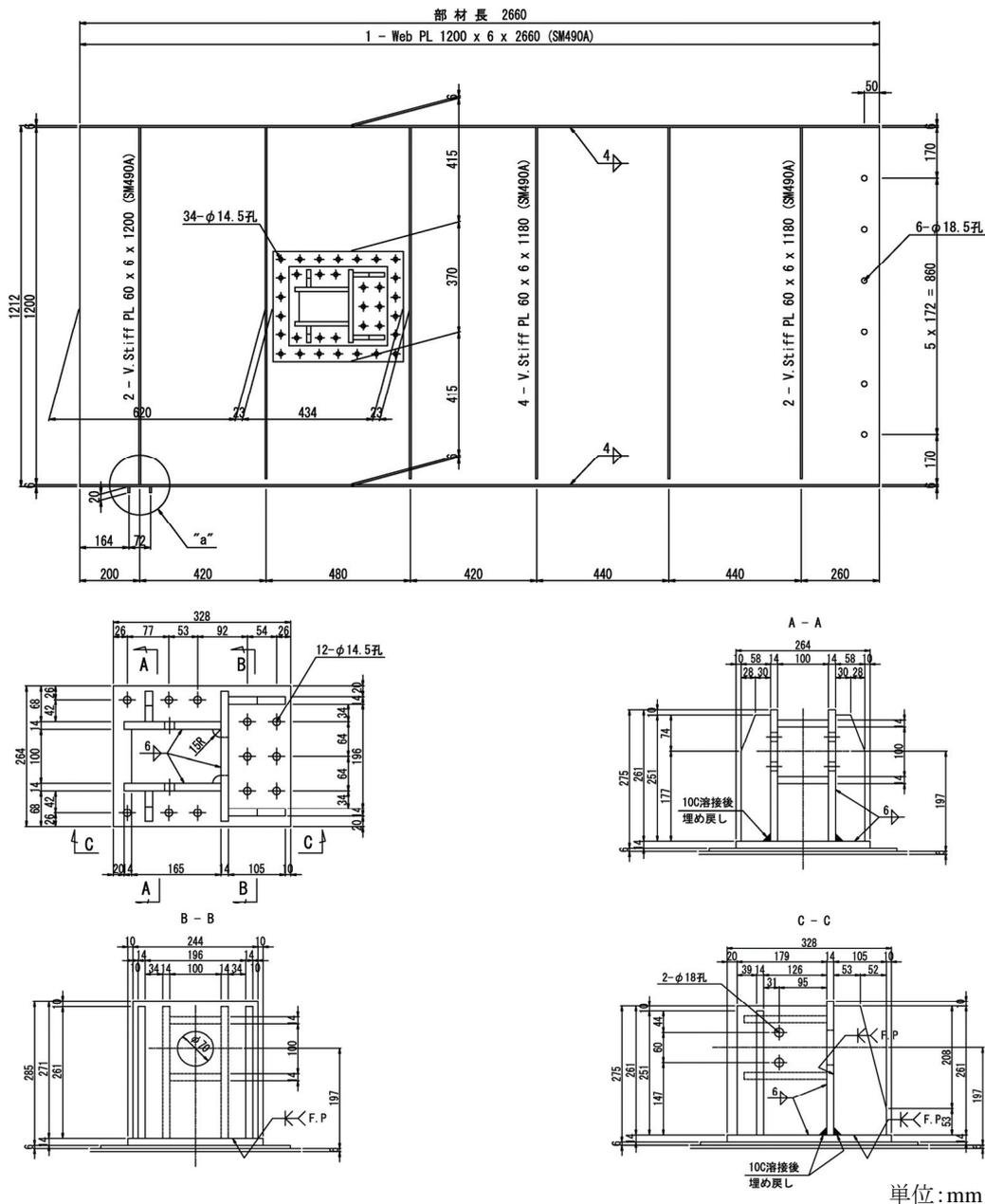


図-1 供試体寸法および落橋防止装置ブラケット詳細

2. 実験概要

2.1 供試体概要

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⁸⁾の中で提案されている落橋防止装置設計例をもとに、主桁および落橋防止装置取付け部を約 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製作した。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⁸⁾に記載されていないため、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⁸⁾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⁸⁾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。ケーブルの降

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

伏強度は $P_y=330\text{kN}$ である。なお、用いたケーブルには緩衝装置などは取付けられておらず、取付け部の孔に通し端部にナットを取付けた。

なお、この実験で用いた供試体は過去に静的載荷試験⁹⁾が行われた供試体であるが、実験結果より弾性範囲内の応力しか受けていないと考えられ、今回の実験に用いても支障がないものと考えた。

2.2 実験方法

今回の実験では桁が落橋した場合を想定し、落橋した際に生じるケーブル張力、および落橋防止装置ブラケット、ウェブおよび垂直補剛材に生じる応力について検討した。ここで想定する桁落下とは、何らかの理由で桁が橋軸方向に設計で想定された以上に移動し、片側の桁が橋脚の支持を失うという状態である。図-2 に想定した落橋状況を示す。

図-2a)は、通常時の桁と橋脚の様子であり、図-2b)は、橋脚が移動するなどの現象が生じて両方の支承が破壊された結果、片方の桁が橋脚より逸脱、落下した状態である¹⁰⁾。

実験では直接桁を落下させるとかなりの危険性があると予想されること、また、より大規模な設備等が必要になることが予想されたため、桁落下を模擬できる落下装置を製作し、桁に変わる錘を落下させることで、落下時のケーブル作用力を模擬することとした。以下にそれら装置の詳細を説明する。

(1) 錘重量および落下距離の算出

供試体製作時に参考にした資料⁸⁾を基に、実物大モデルを次のように仮定した。

支間長: $L=30\text{m}$

ケーブル長: $l=3.2\text{m}$

遊間長: $S_F=0.75(0.7+0.005L)=0.638\text{m}$

落橋防止装置が作動する時のケーブル長:

$$L+l=3.838\text{m}$$

ケーブルが作動した時の落下距離: dy

ケーブルが作動した時の水平移動距離: dx

図-2b)より、 dy , dx , l および S_F の関係は式(1)のように表すことができる。

$$(l+S_F)^2 = (l+dx)^2 + dy^2$$

$$\therefore dy = \sqrt{(l+S_F)^2 - (l+dx)^2} \quad (1)$$

この関係を満足する dx , dy の組み合わせは無数に

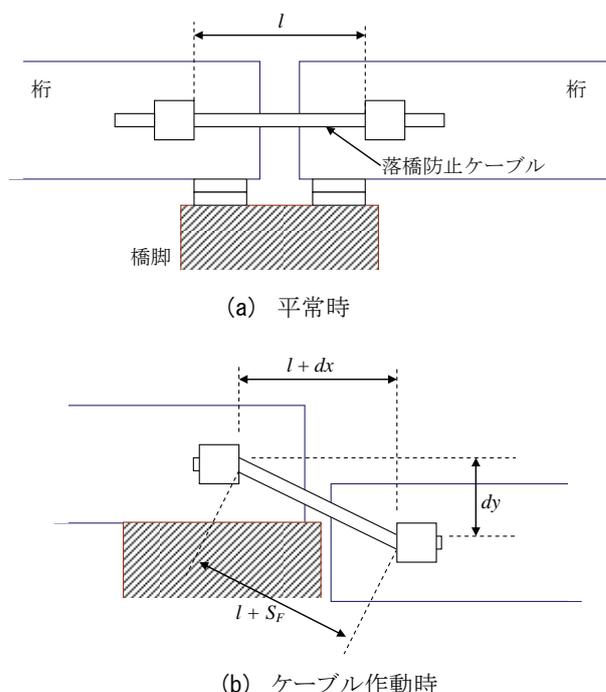


図-2 落橋想定モデル

あるが、本研究では桁が橋脚から逸脱し、落下しはじめてすぐにケーブルが作動することを想定し、水平に $dx=0.636\text{m}$ 、鉛直下向きに $dy=0.107\text{m}$ 落下した時にケーブルが作動するものとした。

供試体は参考橋梁の約 3 分の 2 の大きさであることから、供試体の落下距離 y_1 は 0.071m となる。

次に、実験供試体サイズの桁が落下し、ケーブルが作動するときに生じるエネルギーを計算する。実験供試体サイズの単純桁(質量 m_1 、長さ L_1)が片側の橋脚から逸脱し、 θ 回転したときの仕事量 W は次のようになる。

$$W = \frac{1}{2} m_1 g L_1 \theta \quad (2)$$

ここで、 $\theta = \frac{y_1}{L_1}$ より

$$W = \frac{1}{2} m_1 g y_1 \quad (3)$$

一方、実験時に落下させる物体の質量を m_0 、距離を h とした時のエネルギー W_0 は式(4)のようになる。

$$W_0 = m_0 g h \quad (4)$$

前述の通り、供試体サイズの桁におけるケーブルの設計荷重は2本で 240kN であり、ケーブルは道路橋示方書の規定により死荷重反力の 1.5 倍の耐力を持つように設計されていると考え、供試体のケーブル 1 本あたりに働く死荷重反力 R_d は 80kN となる。今回の想定ではケーブルは一つの桁に対して 2 本であり、桁の重量は $m_1=320\text{kN}$ となる。

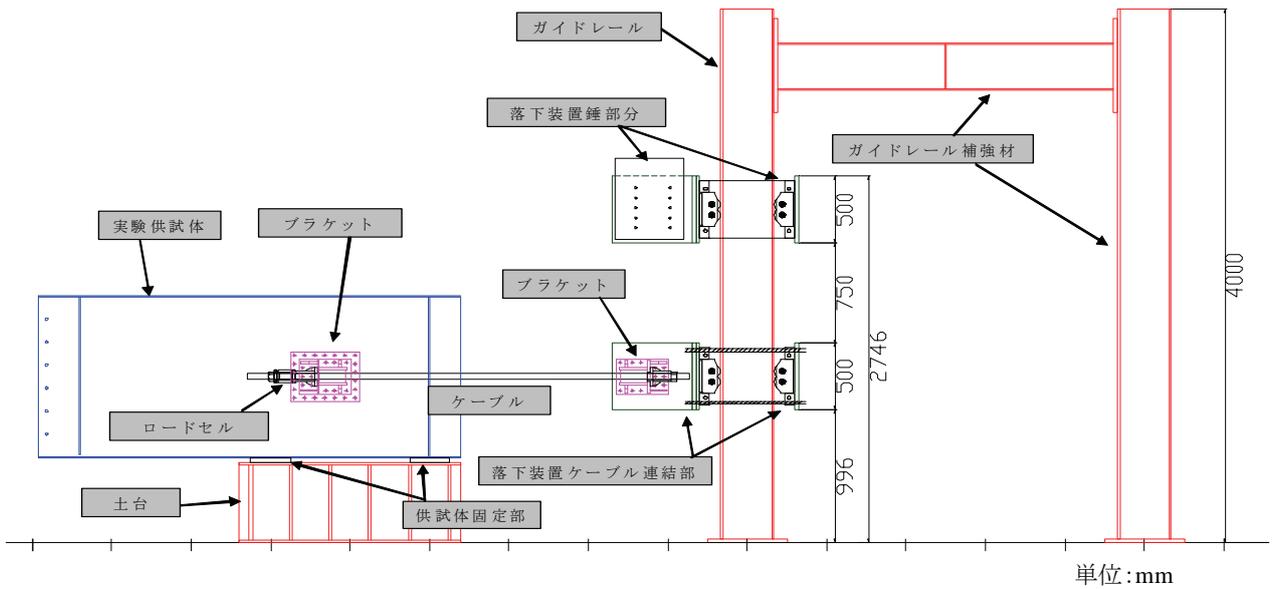


図-3 実験装置配置図(側面図)

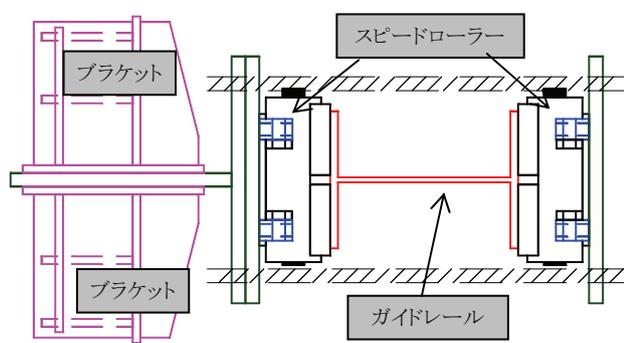


図-4 落下装置ケーブル連結部(上から見た図)

$W=W_0$ において，落下させる錘として $m_0g=15\text{kN}$ の重量を持つもの(鋼材)を使うこととすると，必要な錘の落下距離 h が求められる。

$$\frac{1}{2}m_1gy_1 = m_0gh \quad (5)$$

$$h = \frac{1}{2} \frac{m_1g}{m_0g} y_1 = \frac{1}{2} \frac{320}{15} \cdot 0.071 = 0.757\text{m} \quad (6)$$

したがって，重さ 15kN の錘を 0.757m 落下させることで，供試体サイズの桁が落下した場合と同じエネルギーを表現できる。

(2) 錘落下装置および実験配置

実験供試体および落下装置の配置図を図-3 から図-8 に示す。図-3 に示すように，実験装置は主に，実験供試体，ガイドレール，落下装置ケーブル連結部，落下装置錘部から構成される。実験供試体は，図-2 において橋脚に残っている側の桁を模擬しており，土台を介して反力床に固定されている。一方，図-2 において落下した桁をガイドレールに取付けられた落下装置ケーブル連結部(図-4 および図-7)で模擬しており，落下実験供試体のブラケットと，落下装置ケーブル連結部

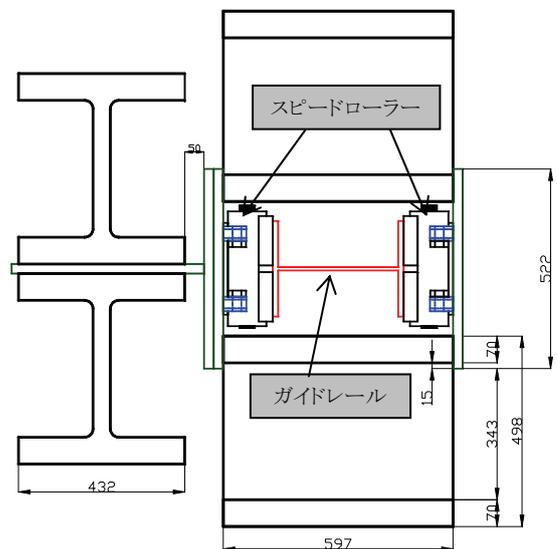


図-5 落下装置錘部概略図(上から見た図)

のブラケットがケーブルで接続されている。

ガイドレールには落下装置錘部も取付けられており，この錘部分が落下し落下装置ケーブル連結部に衝突することにより載荷され，桁落下時の荷重が再現される。ガイドレールについては，反力床へアンカーボルトで固定された柱一つではかなりのゆれを確認したため，図-3 に示すように補強した。

落下装置ケーブル連結部(図-4)，および落下装置錘部(図-5)はガイドレールを挟み込むように設置されている。ガイドレールとの間にスピードローラーと呼ばれる荷物運搬用の車輪を挟むことにより，できるだけ摩擦を少なくし，より自然落下に近づけた。設置された様子を図-6, 7, 8 に示す。前述の通り，落下させる物体の重量は 15kN とするため，落下装置錘部の総重量がおおよそ 15kN となるように溶接 H 形鋼を製作，ガイドレ

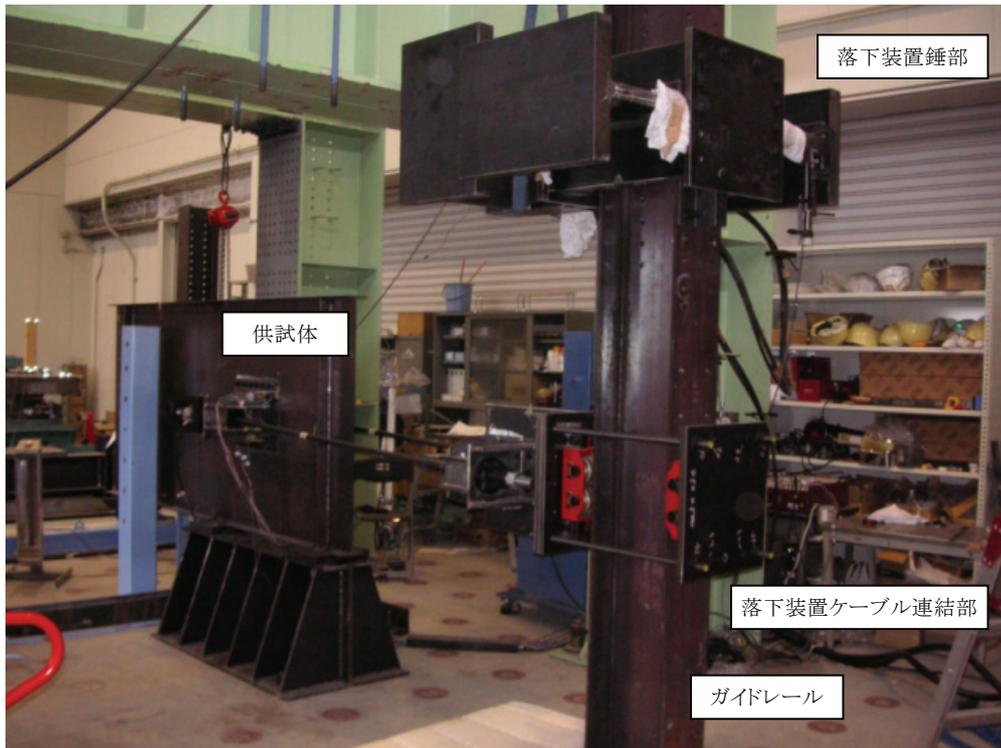


図-6 実験装置配置



図-7 落下装置ケーブル連結部

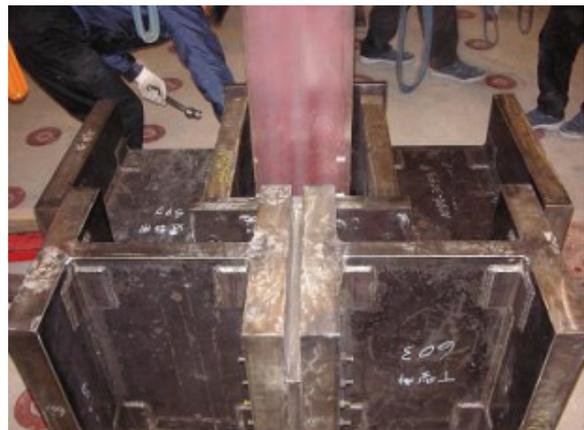


図-8 落下装置錘部

ールの3つの面にあたる方向に設置した。

図-3には、落下装置ケーブル連結部、落下装置錘部の高さが示されているが、これは落下装置ケーブル連結部が供試体のブラケットと同じ高さにある、すなわちケーブルが水平である時の参考値であり、実際はケーブルおよび落下装置ケーブル連結部の自重により多少下がった状態で実験は行われ、落下装置錘部は落下装置ケーブル連結部から約800mm上方から落下させた。

(3) 計測項目

図-9に示すとおり、実験供試体にひずみゲージを貼り付けた。図中の番号はゲージ番号を示しており、括弧内に3つの数字が並んでいる箇所は3軸ゲージ、1つの番号のみの箇所は単軸ゲージである。

落橋防止ケーブルに生じる張力については、センターホール型圧縮荷重計(ロードセル、応答周波数250Hz(理論値))をそれぞれのケーブルの供試体側ブラケット位置に設置した。落下装置錘部には、落下時の加速度を測定するために加速度変換器(加速度計、応答周波数150Hz)を設置した。

以上のデータは、落下時を含む10秒間を0.0001秒刻みで計測した。また、実験時に落下の様子を確認するために、ビデオカメラを3台、USBウェブカメラ1台を設置し落下実験を撮影した。

3. 実験結果および考察

3.1 予備載荷時の張力

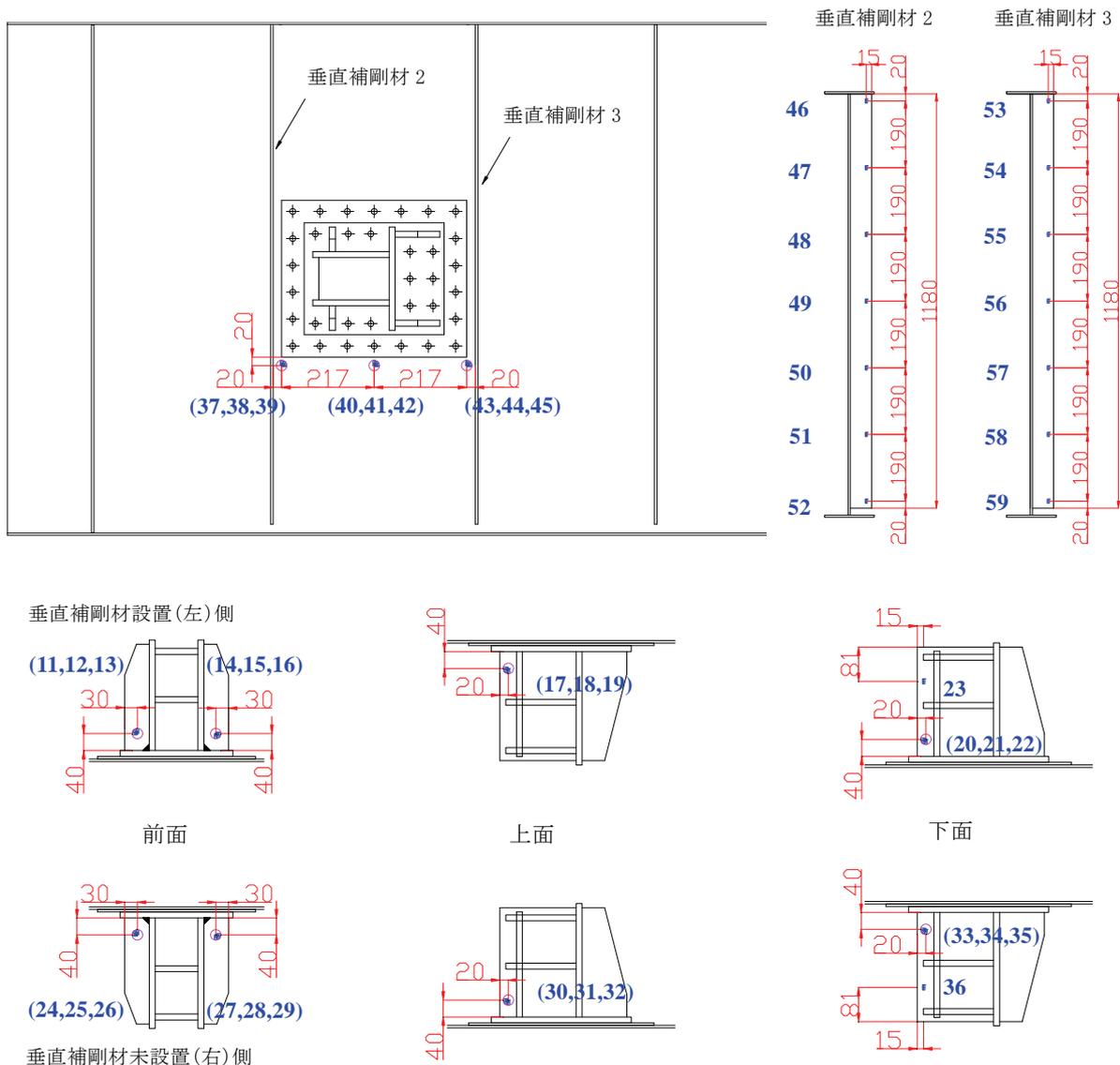


図-9 実験供試体ゲージ位置

実際に錘を落下させて実験を行う前に、落下させる前のケーブル張力の調整、および落下装置ケーブル連結部の自重や錘の静的载荷による落下装置ケーブル連結部の変位およびケーブル張力の調査を目的として、予備载荷を次のような手順で行った。

(1) 落下装置ケーブル連結部をクレーンでケーブルが水平となるように支え、ケーブルに均等な張力(約 19kN ずつ、合計 38kN)を与えた。

(2) 落下装置ケーブル連結部の支えを無くし、落下装置ケーブル連結部の落下量およびケーブル張力を計測した。

(3) 落下装置錘部を落下装置ケーブル連結部の上に乗せ、変位量およびケーブル張力を計測した。

以上の結果を表-2 に示す。この結果より、落下装置錘部の载荷により、ケーブル張力は合計 94kN 生じることになる。次に、この結果について簡単な検証を行う。なお、落下装置ケーブル連結部の重量は構成される

表-2 予備载荷計測値

	ステップ(1)	ステップ(2)	ステップ(3)
変位量 (mm) (ステップ(1)の時を0として、下向きに正)	0	100	240
ケーブル張力 合計 (kN)	38	62	156

部材の重量を合計することにより約 3kN と計算された。

落橋防止ケーブルの長さは約 2000mm であり、落下装置ケーブル連結部の重量約 3kN を支えるためにケーブル張力が 62kN となっていることを考慮すると、ケーブルの傾き(水平から下向き時計回りに正)は、

$$\sin \theta_2 = \frac{3}{62} \quad \therefore \theta_2 \approx 0.0484 \text{ rad} \quad (7)$$

となる。したがって、下向き変位量は、

$$2000 \times \tan \theta_2 = 97 \text{ mm} \quad (8)$$

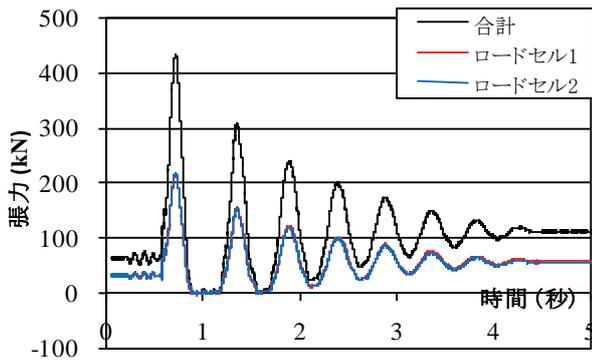


図-10 ケーブル張力の履歴

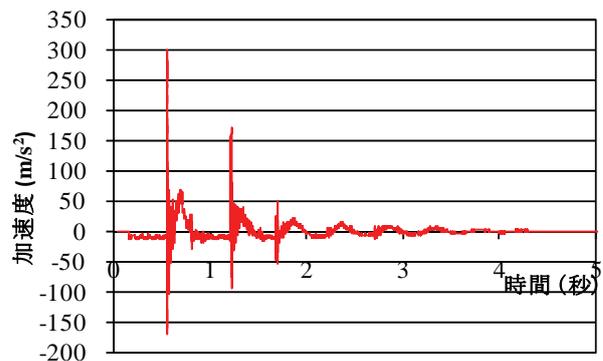


図-11 落下装置錘部における加速度の履歴

表-3 落下試験ロードセル計測値

	ロードセル1 (kN)	ロードセル2 (kN)	合計 (kN)
試験前	32	32	64
最大荷重時	214	219	433
試験直後	57	56	113
除荷後	12	14	26

と求められ、計測結果とほぼ一致する。

さらに、ステップ(3)でも同様な計算を行い、

$$\sin \theta_3 = \frac{3+15}{156} \therefore \theta_3 \approx 0.1156 \text{ rad} \quad (9)$$

$$2000 \times \tan \theta_3 = 232 \text{ mm} \quad (10)$$

と変位量が求まり、計測結果とおおよそ一致する。

このように、簡単な計算によりケーブルの張力と変位の関係が求められることが確認できた。

3.2 ケーブル張力

図-10 に、錘落下試験時にロードセルで計測されたケーブル張力の履歴を示す。図中には、それぞれのロードセルで計測された値(赤色、青色)とそれらを合計した値(黒色)を示しているが、ロードセル 1, 2 には張力がほぼ均等に作用しているため、各ロードセルの線は重なっている。また、表-3 に試験前(落下装置ケーブル連結部の重量は載荷されている)、最大張力時、試験直後(錘の振動が終了した時点)、除荷後(錘を取り除いた時点)での各ロードセルの計測値、および合計を示す。

載荷前ではケーブルに作用する力のバランスを調整したため、ばらつきが少ないはずであるが、除荷後もそれほど大きい差は見られず、比較的均等に載荷出来たことが確認できる。横軸が 1.0 秒付近、および 1.5 秒付近において張力がゼロとなっている部分があるが、これは、落下装置錘部が振動し、上方に戻ったときに張力が失われているためである。

最大値は 0.7 秒付近で 433kN であった。試験前の張力が 64kN であることを考えると、落下試験によるケー

ブル張力は 369kN となり、予備載荷時に計測された静的載荷時の値 94kN の約 3.9 倍となった。また、供試体サイズにおけるケーブルの設計荷重(死荷重反力の 1.5 倍)は、2 本合計で 240kN であり、今回計測された最大ケーブル張力は設計荷重の約 1.5 倍、死荷重反力の約 2.3 倍となった。

試験前の状態は予備載荷ステップ(2)の状態と同じであり、錘を静的載荷した場合には 64kN+94kN=158kN の張力が計測されると予測されるが、試験直後値は 113kN であり 45kN もの差が生じている。これは、衝撃により供試体や土台などがずれ動いたため、ケーブルを固定しているブラケットの間隔が狭まったためであると考えられる。

次に生じたケーブル張力をエネルギーの観点から考察する。落下装置錘部の重量は 15kN で落下距離は約 800mm であるため、衝突時のエネルギー W_w は、

$$W_w = 15 \times 800 = 12,000 \text{ kN} \cdot \text{mm} \quad (11)$$

となる。さらに、録画された映像より、落下装置ケーブル連結部は衝突時に約 420mm 変位したことが確認できた。この変位は落下装置ケーブル連結部と落下装置錘部の両方に生じていると考えられ、この変位によるエネルギー W_{w+c} は、

$$W_{w+c} = (15+3) \times 420 = 7,560 \text{ kN} \cdot \text{mm} \quad (12)$$

となり、合計のエネルギーは $W_m=19,560\text{kN} \cdot \text{mm}$ と算出される。

また、資料⁸⁾よりケーブル長 2,000mm 時のケーブル張力(T kN)とのび(δ mm)との関係は、式(13)のようになることが分かっている。

$$T = 5\delta \quad (13)$$

これらの関係を用いて、ケーブル張力が 64kN から 433kN まで増加することによって蓄えられるエネルギー W_T は式(14)のように計算できる。

$$W_T = \int_{64/5}^{433/5} 5\delta d\delta = \left[\frac{5}{2} \delta^2 \right]_{64/5}^{433/5} = 18,339 \text{ kN} \cdot \text{mm} \quad (14)$$

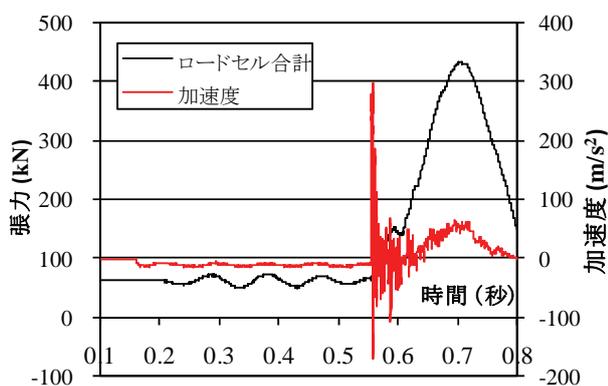


図-12 ケーブル張力, 加速度の履歴

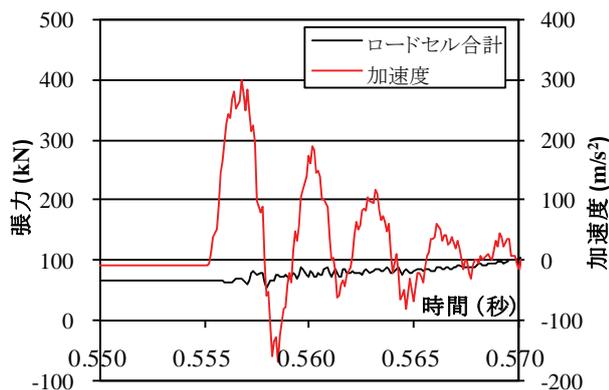


図-13 ケーブル張力, 加速度の履歴(拡大)

これらより, エネルギーのロスを考慮すると, おおよそ $W_m = W_T$ となることが確認できた。

図-10 に示すように, ケーブル張力の履歴は錘落下試験という衝撃的な载荷方法にもかかわらずパルス的な挙動は示しておらず, エネルギー的の評価が可能である。これは, ケーブル自体の変形, ブラケットやウェブの変形により衝撃が吸収されたためと考えられる。

3.2 加速度

図-11 に落下装置錘部に取り付けられた加速度計により計測された加速度の履歴を示す。横軸が経過時間であり, 縦軸が加速度 (m/s^2) である。加速度はケーブル張力が増加を始める点で大きく乱れており, 落下装置錘部と, 落下装置ケーブル連結部との衝突による影響と思われる。

最大ケーブル張力に達するまでのケーブル張力, 加速度の履歴を図-12 に示す。また, 落下装置錘部と落下装置ケーブル連結部が衝突した時間付近をさらに拡大したものを図-13 に示す。これらの図中, 左縦軸が荷重, 右縦軸が加速度を示す。

これらの図より, 0.15 秒付近から落下装置錘部の落下が始まっており, 0.555 秒付近で落下装置ケーブル連結部と衝突したことが分かる。また, ケーブル張力が最大となる 0.7 秒付近で加速度もピークを迎えていることが分かる。衝突からケーブル張力最大までの間に, 加速度が振動しているが, これは衝突後, 落下装置錘

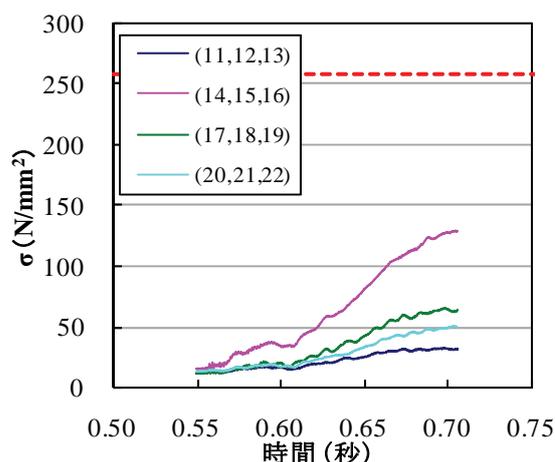


図-14 相当応力の履歴(左側ブラケット)

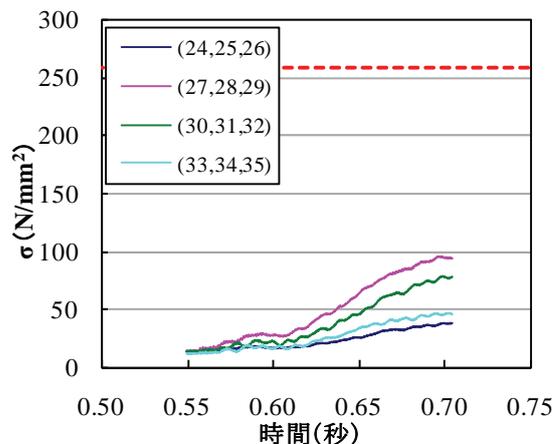


図-15 相当応力の履歴(右側ブラケット)

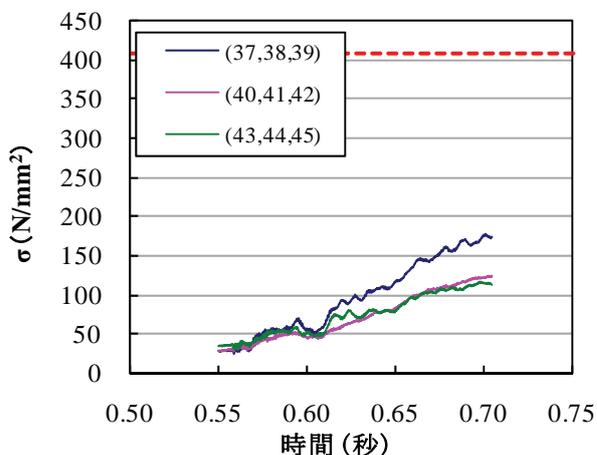


図-16 相当応力の履歴(ウェブ)

部が細かく振動しながら落下しているためであると考えられる。

3.3 応力

図-14 と図-15 に, 実験供試体側のブラケットの 3 軸ひずみゲージのデータから計算されたミーゼスの相当応力の値を示す。図-16 に, 実験供試体ウェブに接着された 3 軸ひずみゲージのデータから計算されたミー

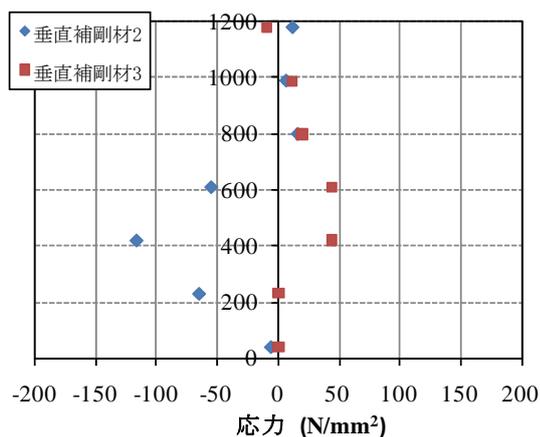


図-17 垂直補剛材の応力分布

ゼスの相当応力の値を示す。これらのゲージ番号と位置の関係は図-9に示されている。図-14から図-16では、縦軸にミーゼスの相当応力、横軸に時間をとり、落下装置ケーブル連結部と落下装置錘部が衝突した時刻付近からケーブル張力が最大になる時刻付近までを示している。また、図中の赤点線は鋼材の降伏応力を示す。

これらの図より、ケーブル張力が最大の点においても、ミーゼスの相当応力は降伏応力よりも小さく、ブラケットは弾性挙動を示していたことが分かる。なお、ブラケットに貼り付けられた1軸ゲージの値も弾性範囲であった。

図-17は、ケーブル張力最大時の垂直補剛材における応力分布である。縦軸はウェブ下端から計測されたゲージまでの距離(図-9参照)であり、横軸がひずみ値から計算された応力である。垂直補剛材の降伏応力は 406.9N/mm^2 であり、どの点においても降伏応力に達していないことが分かる。また、ブラケットより手前(落下装置側)にある垂直補剛材2では圧縮応力、ブラケットより後ろにある垂直補剛材3では引張応力がブラケット取り付け部付近で計測されており、下向きにケーブルが引っ張られることにより、供試体がブラケット部を中心として回転するような向きに力を受けていることが確認できる。

以上より、実験供試体に取り付けられたブラケット、ウェブ、および垂直補剛材のいずれにおいても落下試験によって生じた応力は鋼材の降伏応力以下であり、供試体、ブラケットともに十分な強度を有していたことが分かった。

今回の実験では、橋脚上に残っている桁を供試体でモデル化したが、実験の安全性を考え、供試体は土台を通じて反力床に連結されていた。そのため、供試体と土台とを連結しているボルトに大きな力が作用し、ボルトのせん断変形が確認できた。橋脚上に残っている桁の境界条件が今回の実験において正確に再現されていたかどうかは今後の検討が必要である。ただし、

供試体が土台に連結されていない、もしくは剛性の小さいもので連結されていた場合には、ケーブル張力はさらに小さいものとなっていたと考えられ、今回の実験は安全側の結果であるといえる。

4. あとがき

本研究では、桁に取り付けた落橋防止ケーブルを用い、桁落下を想定した錘落下載荷実験を行い、ケーブル張力や落橋防止装置取り付け部の応力状態などについて検討した。本研究で検討した項目に関する主な結論を以下に示す。

- ① 落橋防止ケーブルおよび、取り付け部の強度を検討できる錘落下試験装置を開発した。
- ② ケーブル張力と落下装置連結部、落下装置錘部の変位は簡単な計算で求められることが分かった。
- ③ 錘落下試験におけるケーブル張力の最大値は、静的載荷時の約 3.9 倍、ケーブル設計荷重の約 1.5 倍、死荷重反力の約 2.3 倍となった。
- ④ ケーブル自体、およびブラケット取り付け部の変形などにより、錘落下試験におけるケーブル張力の変動は衝撃的でないと考えられる。
- ⑤ 錘落下試験により生じたケーブル張力は落下によるエネルギー損失を計算することにより求められることが分かった。
- ⑥ 現在の落橋防止ケーブル取り付け部の設計は、桁落下時に作用する荷重においても安全である。

今後は、今回の実験で確認できた供試体構成部材の応力を解析的に再現できるか確認し、様々な条件(異なる想定橋梁のサイズ、ケーブルサイズ等)において解析的に検討していく予定である。

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。また、実験に際して株式会社エスイーのご協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, V. 耐震設計編, 1996.
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, V. 耐震設計編, 2002.
- 3) 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/I-63, pp.341-352, 2003.

- 4) 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, 2006.
- 5) 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・動的耐荷力実験(その1)，土木学会第55回年次学術講演会，I-B237, 2000.
- 6) 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・動的耐荷力実験(その2)，土木学会第55回年次学術講演会，I-B238, 2000.
- 7) 松尾奈緒美，小畑誠，後藤芳顯，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.

- 8) 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.
- 9) 野阪克義，安達篤志，伊藤満：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，土木学会地震工学論文集，Vol.29, pp.406-411, 2007.
- 10) 伊津野和行，小林紘士，鎌田耕平：桁落下を想定した桁間ケーブル連結装置の所要条件に関する考察，土木学会論文集，No.668/I-54, pp.319-324, 2001.

(2008年9月18日受付)