

津波の影響に対する既設道路橋線支承の抵抗特性

森屋 圭浩¹・中尾 尚史²・星隈 順一³

- ¹正会員 修（工） 国立研究開発法人 土木研究所構造物メンテナンス研究センター 交流研究員
（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）
²正会員 博（工） 国立研究開発法人 土木研究所構造物メンテナンス研究センター 専門研究員
（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）
³正会員 博（工） 国立研究開発法人 土木研究所構造物メンテナンス研究センター 上席研究員
（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

1. はじめに

橋に及ぼす津波の影響に関する既往の研究では、津波の影響によって上部構造が流出するかしないかを照査する手法あるいは津波の影響に対する設計法の開発に目標を置いた研究が多いが、その中でも、津波の影響によって上部構造に作用する波力の評価手法を水路実験や数値解析、被災事例に基づいて提案する研究が多い^{（例えば1~4）}。津波の影響によって生じる橋への作用力を精度よく評価する手法の検討はもちろん必要であるが、照査や設計への反映という観点からは、作用力の評価だけではなく橋側の抵抗力の評価手法についても合わせて精度を高めていく必要がある。しかしながら、津波の影響に対する橋側の抵抗特性の評価に関する研究はあまりなされていない^{5）}。

2011年東北地方太平洋沖地震により発生した津波により、橋の上部構造が流出する等の被害が生じたが、その流出した橋の多くは支承部の損壊による被害形態であったため^{6）}、著者らは津波の影響によって生じる作用に対する支承部の抵抗特性に関する研究を行ってきている^{5,7）}。既設橋の支承構造には様々な種類のものがあるが、支間長の短い鋼桁橋においては線支承が用いられていることが多く、東北地方太平洋沖地震による津波の影響によっても、写真-1～2に示すように、様々な形態の破壊性状が確認されている。そこで、本研究では線支承に着目してその抵抗特性と破壊性状に着目する。

線支承の抵抗特性に関しては、過去に下沓部のみを対象とした水平載荷実験や解析等により破壊形態や耐荷力の検討がされた例がある^{8),9)}。これらの研

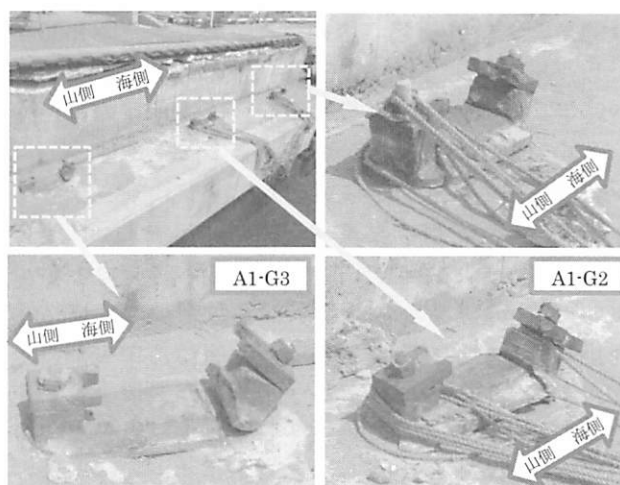


写真-1 水尻橋の損傷した支承部

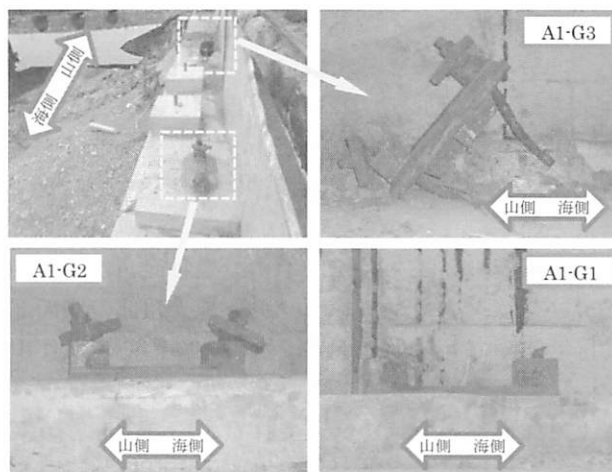


写真-2 横津橋の損傷した支承部

究では地震時の水平方向の荷重に対する抵抗特性について検討がなされているが、津波のような鉛直方向の作用力の影響も受ける場合の破壊形態や耐荷力に関する検討は行われていない。さらに、写真-3のように実橋に取付けられた状態（下沓にピンチプレ

ートとアンカーボルトが取り付けられた状態)を想定した条件下での水平及び鉛直载荷試験による検討は行われていない。

そこで本研究では、津波の影響に対する線支承全体としての実際に近い耐荷力とその破壊形態の特性を検証することを目的とし、下部構造を模したコンクリートブロックに線支承を据付けた状態で、橋軸直角方向ならびに鉛直上向き方向への一軸载荷実験を実施し、線支承における各作用方向の抵抗特性について検証を行った。さらに、これらの载荷実験の結果を踏まえ、津波の影響により実際に損壊が生じた道路橋の線支承を対象として、当該線支承に生じた作用力の方向についても考察を加えた。

2. 道路橋に用いられている線支承について

道路橋における線支承は、支間長が30m以下と比較的短い鋼単純桁橋に用いられており¹⁰⁾、昭和30年から平成初頭において使用されてきた。しかし、1995年兵庫県南部地震後の積層ゴム支承への移行や、レベル2地震動に対する耐震性能の向上に伴い、近年では使用されるケースが急激に減少している。

構造については、写真-2や図-1に示すように下沓、ピンチプレート(浮上り止め用部材)、アンカーボルトの計3つの部品からなる。部品数が少なく構造平面がコンパクトな支承である。下沓は、中央部の上面に上部構造のソールプレート部分が設置され、その側方部に水平方向に抵抗するサイドブロックに模した突起部が設けられており、下沓と一体となった構造となっている。下沓の突起部上には、鉛直上向き方向に抵抗する部品として上部構造の桁下フランジ部分に引っ掛かるようにピンチプレートが設置されている。ピンチプレートを固定する部品はアンカーボルトを用いており、ピンチプレートと下沓を貫通するように設置し下部構造に埋め込まれている構造となる。

荷重伝達の経路を図-2に示す。橋軸直角水平方向については、ソールプレートが下沓突起部の側面部に接触することにより下沓に水平方向の荷重が作用し、下沓下面部に設けてあるリブから沓座へ伝達され下部構造へと荷重が伝達される。鉛直上向き方向は、上部構造が浮き上がろうとすると、桁下フランジ部に引っ掛けて設置してあるピンチプレートに接触し鉛直上向き方向の荷重が作用する。さらに、ピンチプレートの取付けボルトであるアンカーボルトに伝達され、下部構造に荷重が伝達される。

線支承の設計方法については、日本道路協会より

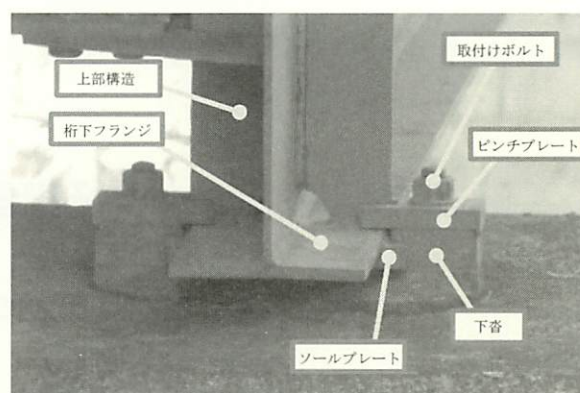
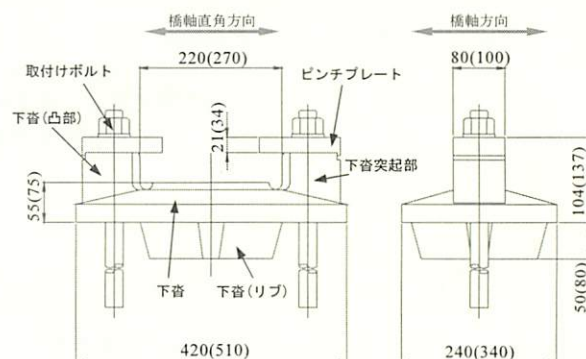


写真-3 線支承設置状況



※()内寸法は750kNタイプを示す。単位はmmとする。

図-1 実験供試体寸法(上：平面図，下：側面図)

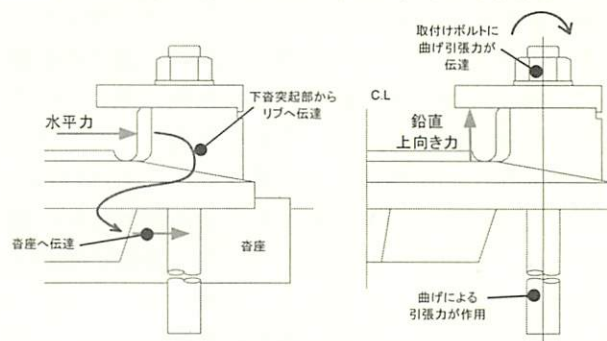


図-2 荷重の伝達

(左図：水平载荷時，右図：鉛直上向き力時)

出版されている道路橋支承標準設計¹¹⁾に準拠し、許容応力度設計法により行われてきている。設計方法においては、各部品の構造を簡易的な梁要素(例えば片持ち梁など)に置き換え断面部の応力を算出し、許容応力度以下となるように設定されている。設計荷重については、当時の設計法である震度法に基づいており、現在の設計水平震度 $kh=0.2\sim0.25$ に相当する設計水平力で行われている。鉛直上向き方向に関しては、 $0.1R_d$ に相当する鉛直上向き力に対して設計されている。なお、アンカーボルトの縁端距離の確保により下沓突起部の平面形状が決定するなどの、他の支承部品との構造上兼ねいや、鋼板製品の規格による最低板厚などの制限により、すべての設計断面において応力値が支配的とはならず、応力値

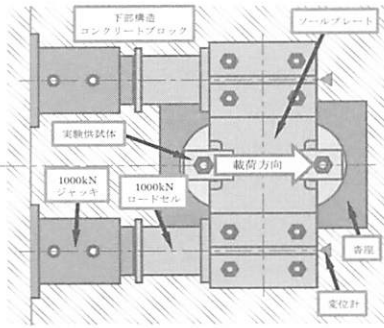


図-3 水平荷重実験セットアップ図

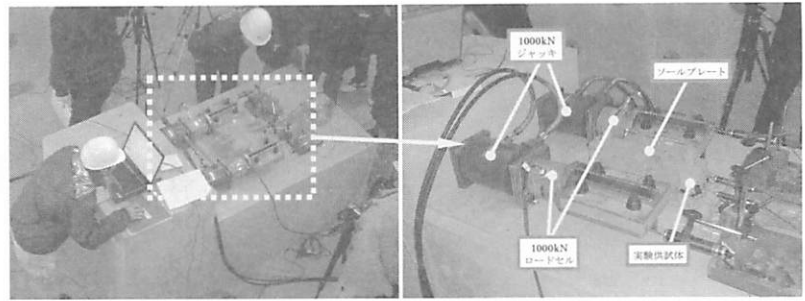


写真-4 水平荷重実験状況 (左：全体像，右：実験供試体)

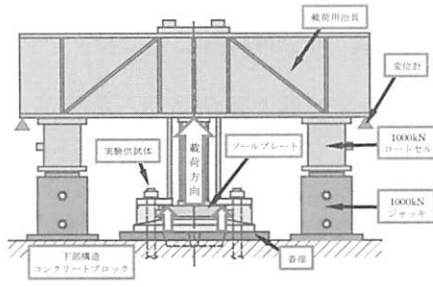


図-4 鉛直荷重実験セットアップ図

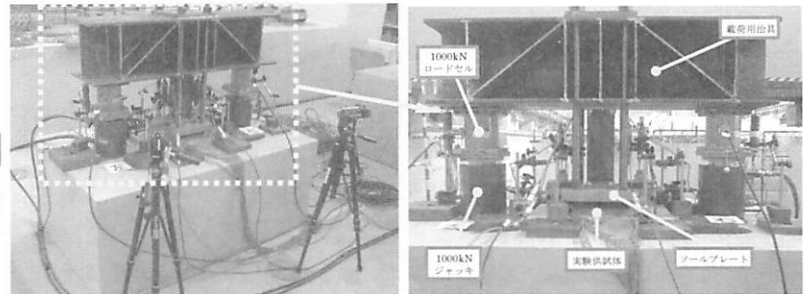


写真-5 鉛直荷重実験状況 (左：全体像，右：実験供試体)

に余剰が生じる設計断面部もある。

3. 実験概要

(1) 実験供試体

実験供試体および寸法を図-1に示す。実験供試体は、昭和51年に(社)日本道路協会から出版された道路橋支承標準設計¹¹⁾における300kNならびに750kNタイプの実物大相当の2種類の線支承を使用し、橋軸直角方向、鉛直上向き方向に荷重を載荷していく実験をそれぞれ行った。実験供試体の材質は当時使用されていた材質とし、下沓部にねずみ鋳鉄品(FC250)、ピンチプレートとアンカーボルトは一般圧延鋼材鋼材(SS400)とした。下沓上部に設置されるソールプレートについてはSS400とし、十分な剛性を確保するように設定した。この実験供試体を下部構造側の橋座部を模した鉄筋コンクリートブロックに設置した。橋座部のコンクリートの設計基準強度は21N/mm²とし、内部の鉄筋材の材質は異形鉄筋(SD345)とした。コンクリートブロックは、実験供試体の終局耐力に相当する荷重に対し、ひび割れが生じないように十分な耐力が確保されるように設計を行った。沓座部と箱抜き部に関しては、道路橋支承便覧¹²⁾に基づき設計、施工し、沓座部については無収縮モルタルにより施工した。

(2) セットアップと計測項目

水平荷重実験のセットアップ状況を図-3、写真-4に、鉛直荷重実験のセットアップの状況を図-4、写

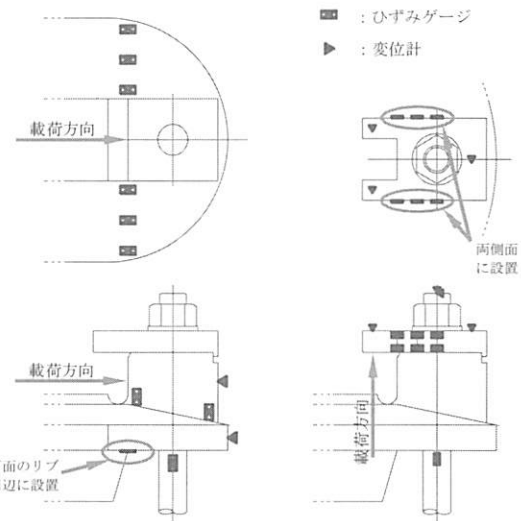


図-5 ひずみゲージ・変位計の設置

(左図：水平荷重用，右図：鉛直荷重用)

真-5に示す。セットアップにおいては、1000kNまで載荷可能なジャッキとロードセルを2基用いて、実験供試体を挟み込むような形で左右1点ずつ設置した。また、載荷治具の傾きを防止するために、ジャッキ設置部の延長線、または近傍に変位計を1点ずつ設置し変位計測による確認を行った。載荷用横梁と実験供試体との間には、実橋に近い構造とするため、下沓上部にソールプレートを設け、ピンチプレートはソールプレートに引っ掛かるように設置した。

実験供試体のひずみゲージと変位の計測は、図-5に示す位置とした。前述の線支承の損傷状況を元に、水平荷重実験用の実験供試体には、下沓突起部の隅角部周辺と基部、及び下面部のリップの終端部周辺に

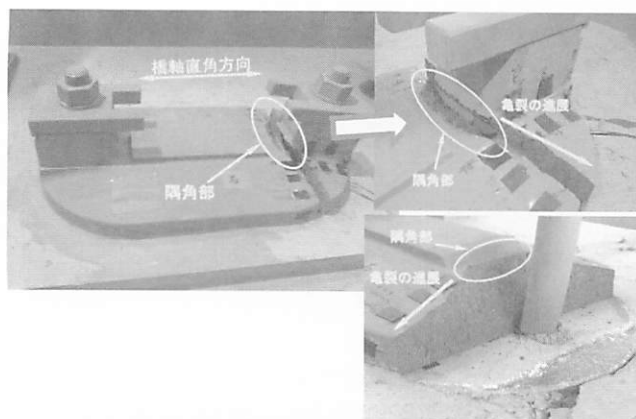


写真-6 水平載荷実験後の供試体損傷部(300kN タイプ)

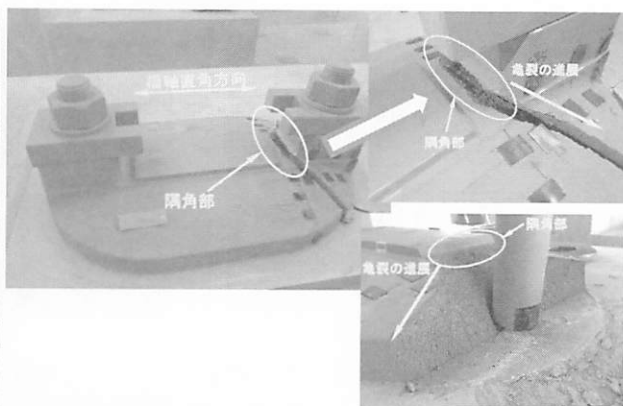


写真-7 水平載荷実験後の供試体損傷部(750kN タイプ)

取り付けた。また、写真-1の損傷状況より、下沓突起部とアンカーボルトが橋軸直角方向に曲げ変形が生じていることから、下沓突起部側面には変位計、アンカーボルトにはひずみゲージを設置した。

鉛直上向き載荷実験用の実験供試体については、写真-2の損傷の状況から、ピンチプレートとアンカーボルトに着目し、ピンチプレートの側面部とアンカーボルトの下沓下面と沓座部の境界にひずみゲージを設置した。また、ピンチプレートの切欠き部と外側に箇所に変位計を設置し、ピンチプレート本体の変位を計測した。アンカーボルトは、鉛直上向き方向に変形しながら橋軸直角方向へと曲がるように変形することを予測し、ボルト頂部において鉛直上向きと橋軸直角方向の2点の変位を計測した。

(3) 載荷方法

水平載荷実験は、橋軸水平方向の一方向の漸増載荷とし、ソールプレートを介して下沓突起部の側面部から荷重を与えた。鉛直載荷実験は、鉛直上向き方向の一方向の漸増載荷とし、ソールプレートをピンチプレートの切欠き部に接触させて荷重を与えた。載荷に関しては、支承部の荷重支持機能が失うまで行った。載荷速度に関しては、手動のジャッキによる載荷のため、ゆっくりとした速度で荷重を与えた。また、図-3,4に示すように載荷中にジャッキ付近に設置した変位の計測を行い、加圧毎に2点の変位が同値となる様にジャッキ荷重を調整し、荷重が偏載荷することがないように行った。

4. 線支承の破壊形態および耐力の評価

(1) 水平載荷試験

a) 破壊形態

橋軸直角方向に相当する向きへの載荷実験終了後の線支承の状況を写真-6,7に示す。300kNと750kN

タイプともに、下沓突起部の隅角部から亀裂が入り始め、下沓下面のアンカーボルト穴部に向かって生じた。亀裂が入り始めた直後に急速に進展し割れるような挙動を示したことから、脆性的な破壊に近い現象が生じたと考えられる。これは、損傷部の下沓に脆性破壊を起こしやすい鋳鉄材料(FC250)による影響と考えられる。下沓突起部の隅角部が損傷した後は、下沓突起部とアンカーボルトが同時に橋軸直角方向(支点中心から外側)へ曲げ変形する挙動を示した。なお、載荷方向と反対に位置する下沓突起部の隅角部やアンカーボルトに関しては損傷は見られなかった。

b) 損傷のメカニズム

図-6に水平荷重－水平変位、図-7,8に水平荷重－ひずみの関係を示す。300kNタイプは $P_{max}=431.1kN$ 、750kNタイプは $P_{max}=569.8kN$ に相当する水平荷重に達した直後に荷重の低下し変位の増大が見られる。図-7(a),(b)と図-8(a),(b)に着目すると、 P_{max} に達したと同時に下沓突起部の隅角部の近傍部(グラフ線番号(2),(3),(5),(7))において引張りひずみが最も卓越していることから、 P_{max} に達したと同時に下沓突起部の隅角部において亀裂が入り始め、下沓下面のアンカーボルト穴まで急激に損傷したものと考えられる。さらに、図-7(c)と図-8(c)の下沓突起部の隅角部の真下に位置する下沓下面部に着目すると、 P_{max} に達するまで圧縮ひずみが生じていることが分かる。したがって、ひずみ分布の関係から損傷した断面部においては曲げによる影響が支配的となり損傷したものと考えられる。

また、図-7(b)と図-8(b)に示す下沓突起部の基部に位置するひずみにおいても、隅角部近傍(グラフ線番号(5),(7))に引張りひずみ、外側に位置する部分(グラフ線番号(6),(8))に圧縮ひずみが生じていることから、下沓突起部の基部においても曲げによる損傷が支配的となる可能性が高いと考えられる。

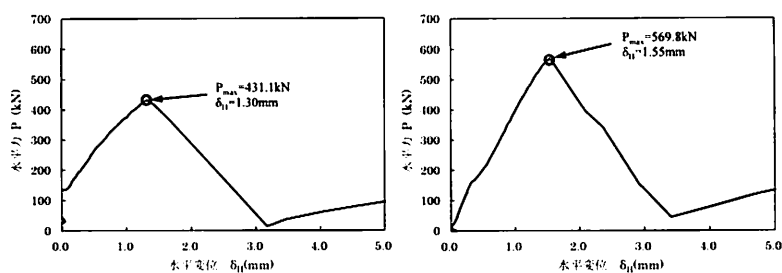


図-6 水平載荷試験 荷重－変位図（左：300kN タイプ，右：750kN タイプ）

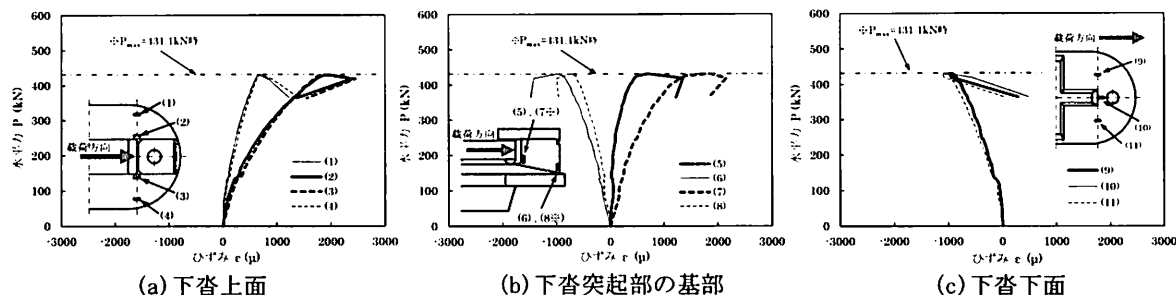


図-7 水平載荷試験 荷重－ひずみ図(300kN タイプ) *()内に※がある線番号は反対側の位置を示す。

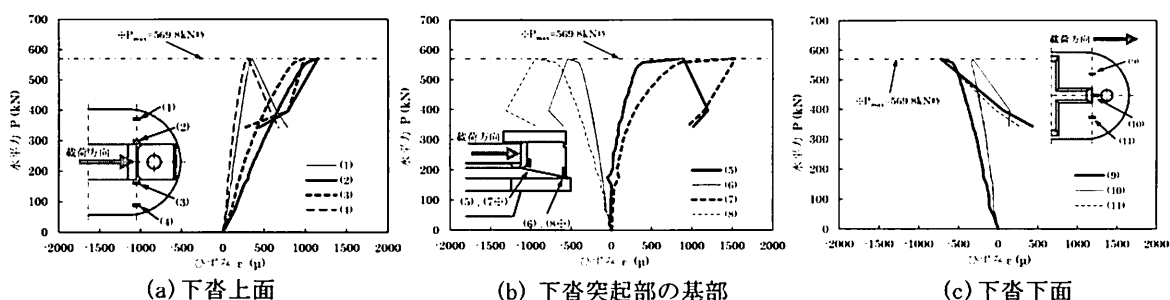


図-8 水平載荷試験 荷重－ひずみ図(750kN タイプ) *()内に※がある線番号は反対側の位置を示す。

c) 耐力力の評価

文献11)に規定されている設計法(許容応力度法)においては、水平終局耐力が最も低いと予想される断面部は、図-9に示す下査突起部の基部の断面部(X-X断面部)とされている。しかし、今回の載荷実験の結果より、下査突起部の隅角部から下面の取付けボルト穴に向かって損傷が生じる結果となったことから、これは、線支承の耐力力の評価を行う場合には、許容応力度法による設計の時と同じX-X断面部で一律に耐力の算定を行うという考え方は適用できないことを示唆するものである。

また、線支承には、図-1,2に示すように、下査下面に水平力を下部構造に伝達させるリブが設けられている。しかし、アンカーボルトの位置の関係上、下査突起部の隅角部位置を境にそのリブが途切れた構造となっており、結果的にこの部分においては極端な曲げ剛性の変化が生じている。表-1に示すように、実験供試体のX-XとY-Y断面部との断面二次モーメントの比較を行なった結果、Y-Y断面部の方が小さい傾向を示している。

したがって、線支承の水平終局耐力の評価にあたっては、下査突起部の隅角部近傍の断面領域(X-X断

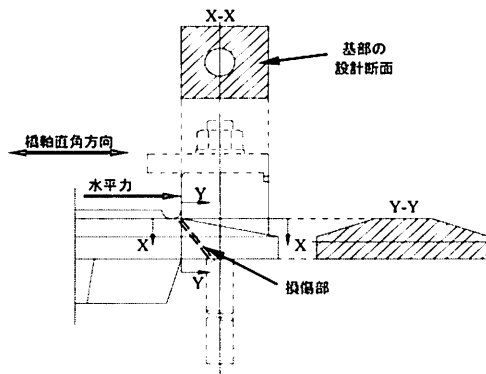


図-9 下査突起部の設計断面

表-1 下査突起部周辺の断面部の断面二次モーメント

支承タイプ	$1 \times 10^6 (\text{mm}^4)$	
	X-X断面	Y-Y断面
300kN	4.73	1.31
750kN	12.8	5.42

面、Y-Y断面部)において曲げ剛性の比較を行い、津波によって作用する水平力に対して最弱部となる断面を特定し耐力の評価を行う必要があると考えられる。

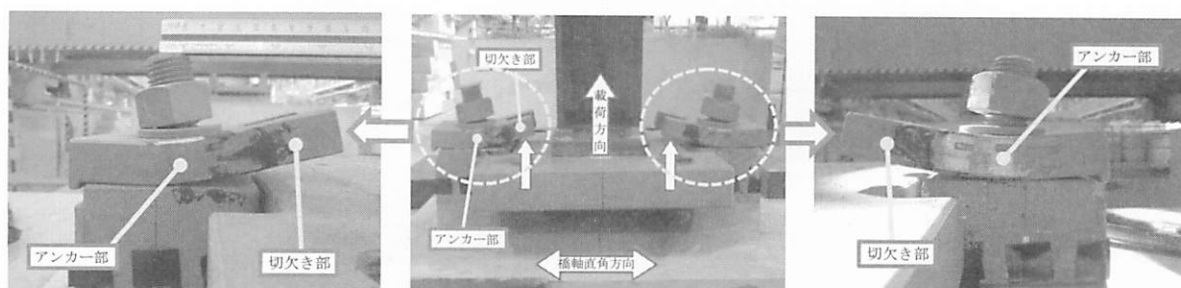


写真-8 鉛直載荷実験後の供試体の損傷部(300kN タイプ)

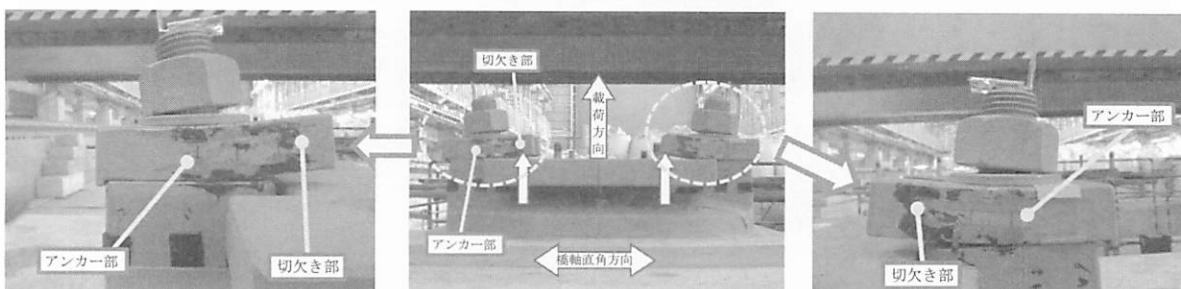


写真-9 鉛直載荷実験後の供試体の損傷部(750kN タイプ)

(2) 鉛直載荷試験

a) 破壊形態

鉛直上向きへの載荷実験終了後の線支承の状況を写真-8,9に示す。300kN、750kNタイプともに、ピンチプレートのアンカーボルトが設置されている位置(アンカー部)を支点とし切欠き部にかけて鉛直上向き方向に曲げ上がる挙動を示した。アンカーボルトは、ピンチプレートの曲げ上がる変形により、同様に曲げと引張に相当する反力を受けている。

載荷初期においては、ピンチプレートの変形が生じていたが、荷重を載荷していくにつれピンチプレートとともにアンカーボルトが鉛直上向き方向に引張られながら橋軸直角方向(支承中心に対し外側方向)へ曲がる挙動を示した。また、下沓部には損傷は見られなかった。

b) 損傷のメカニズム

図-10に鉛直上向き荷重-変位の関係を、図-11,12に鉛直上向き荷重-ひずみの関係を示す。

300kNタイプは鉛直上向き力 $V=120\text{kN}$ 、750kNタイプは鉛直上向き力 $V=250\text{kN}$ 程度まで荷重を載荷した後から、鉛直剛性が小さくなる挙動を示した。剛性が低下した後、荷重が急激に落ち込むような挙動は示さず、変位の増加に合わせ荷重も漸増する傾向を示している。実験終了時、変位が25mmに達した時点の鉛直上向き荷重は、300kNタイプでは $V=166.0\text{kN}$ 、750kNタイプは $V=450.5\text{kN}$ であった。

300kNタイプにおいては、図-11(a),(b)に示すピンチプレートとアンカーボルトの荷重-ひずみ分布に着目すると、ピンチプレートが先に引張降伏ひずみに達し、後にアンカーボルトが引張降伏ひずみに達する傾向を示した。図-11(c)のピンチプレート本体

の断面部に着目した荷重-ひずみ分布によると、アンカー部の断面部が先に降伏引張ひずみに達し、後にアンカー部の近傍(グラフ線(2),(5))、切欠き部の順番に引張降伏ひずみに達する傾向を示している。また、鉛直剛性が低下した $V=120\text{kN}$ 付近には、アンカーボルトとピンチプレートのアンカー部付近の断面部が引張降伏ひずみに達することから、双方の部品が降伏ひずみに達したことが要因と考えられる。

750kNタイプにおいては、図-12(a),(b)に示すピンチプレートとアンカーボルトの荷重-ひずみ分布に着目すると、ピンチプレートとアンカーボルトの双方が約 $V=150\sim 200\text{kN}$ の鉛直上向き力に達した時点で降伏ひずみに達する傾向を示した。図-12(c)のピンチプレート本体の荷重-ひずみ分布に着目すると、アンカー部(グラフ番号(3),(6))が先に引張降伏ひずみに達し、アンカー部付近(グラフ番号(2),(5))は、約 $V=220\text{kN}$ に達した時に引張降伏ひずみに達している。 $V=250\text{kN}$ に達した時に鉛直剛性が低下した要因としては、ピンチプレートのアンカー部付近の断面が降伏ひずみに達したものと考えられるが、ピンチプレートのアンカー部周辺の断面とアンカーボルトの降伏ひずみに達する荷重が近い傾向を示していることから、750kNタイプにおいても300kNタイプと同様に、ピンチプレートアンカー部とアンカーボルトの双方が降伏ひずみに達したことにより鉛直剛性が低下したものと考えられる。

c) 耐力力の評価

本載荷実験において、損傷が確認された部位については、文献11)において考慮されている設計断面と一致する傾向を示しているが、設計上、最弱部となるのは、写真-8,9よりピンチプレートのアンカー

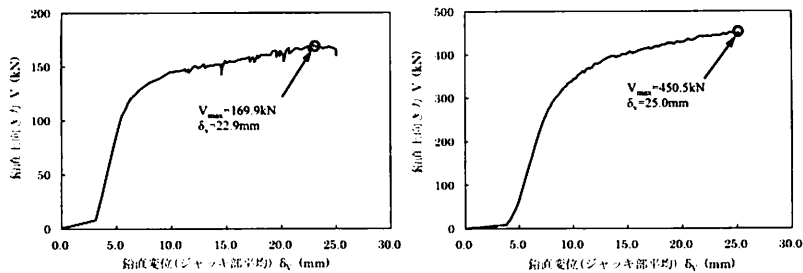


図-10 鉛直載荷試験 荷重－変位図（左：300kN タイプ、右：750kN タイプ）

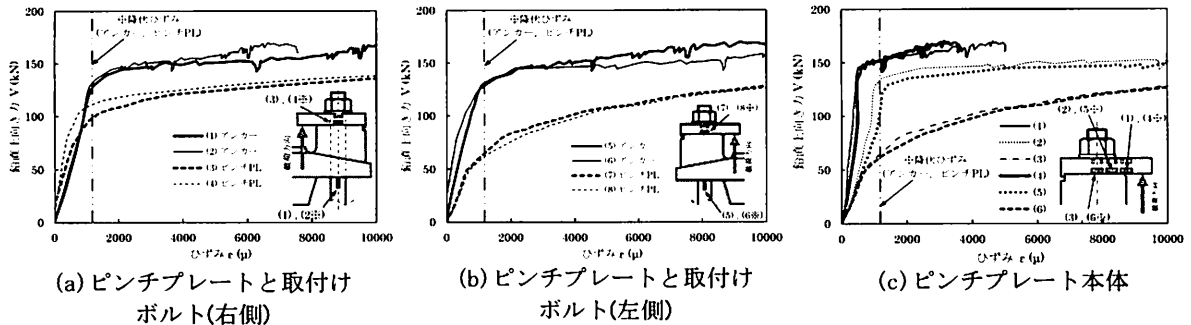


図-11 鉛直載荷試験 荷重－ひずみ図(300kN タイプ) *()内に※がある線番号は反対側の位置を示す。

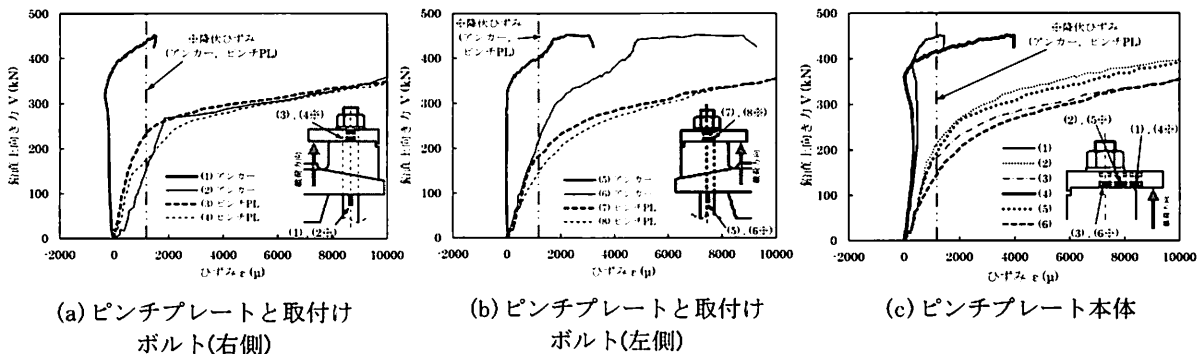


図-12 鉛直載荷試験 荷重－ひずみ図(750kN タイプ) *()内に※がある線番号は反対側の位置を示す。

部となる。

写真-2で示すように、津波により被災した橋梁部の線支承部の損傷を見ると、ピンチプレートの曲げによる損傷は少なく、アンカーボルトの鉛直上向き方向や橋軸直角方向への曲げ変形、アンカーボルトの破断により、ピンチプレートと上部構造との引掛りが外れている傾向が多く見られている。本実験においても、ピンチプレートの曲げ変形が確認されているが、同時にアンカーボルトの曲げ上がる変形も大きく出ていることから、写真-2で示す損傷と似た傾向を示すと考えられる。

したがって、このような挙動特性を踏まえると、線支承の鉛直上向き耐力を精度よく評価するためには、アンカーボルト本体の引張や曲げ耐力だけでなく、アンカーボルトの変形に伴うピンチプレートの抵抗機能の低下の影響についても考慮していく必要がある。

5. 津波の影響による実際の線支承の損傷状況との比較

本研究で実施した線支承に対する載荷実験により得られた破壊性状を踏まえ、津波の影響により実際に損壊が生じた道路橋の線支承を対象として、当該線支承に生じた作用力の方向について検討する。ここで、作用力の方向に着目したのは、当該橋の上部構造が津波の影響によってどのように挙動しようとしたのかを支承部に残された破壊性状の痕跡から分析する際に重要な情報となるためである¹³⁾。

まず、写真-1に示す水尻橋（宮城県南三陸町）に設置されていた線支承に着目する。本橋は、橋長31.95m（10.7m+10.6m+10.45m）の3連鋼単純桁橋であり、上部構造は桁高700mmのH型3主桁橋である。支承部の損傷状態から、すべての支承線で水平方向の作用力に抵抗する下沓突起部の近傍部に損傷が確認され、下沓突起部とアンカーボルトが橋軸直角方向へ曲げ変形している。実験結果と比較すると、本線支承では橋軸直角方向の水平力による影響を支配的に受けたものと考えられる。

次に、写真-2に示す横津橋（宮城県南三陸町）に設置されていた線支承に着目する。本橋梁は、橋

長 32.4m(2×16.2m)の 2 連鋼単純合成桁橋であり、上部構造は桁高 850mm の H 型 3 主桁橋である。支承部の損傷状態から、鉛直上向き方向に抵抗する部品であるピンチプレートの曲げ変形や損失、ピンチプレートを取付けているアンカーボルトの曲げ変形や破断、下部構造からの抜けによる損傷が多く見られる。前述した実験結果と比較すると、アンカーボルトによる損傷状態と似た傾向を示していることから、線支承は鉛直上向き方向の荷重による影響の方が支配的であったと考えられる。

6. まとめ

本研究では、津波の影響によって支承部に生じる作用に対して、線支承の耐荷力と破壊形態を検証することを目的として載荷実験を実施した。本研究の範囲内で得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 本実験に用いた線支承の橋軸直角方向の水平力に対する最終的な破壊形態は、下沓突起部の隅角部から下沓下面アンカーボルト穴に沿って損傷が生じるモードであった。亀裂が生じた下沓突起部の隅角部周辺においては、引張ひずみが最も卓越する結果となった。下沓突起部の隅角部の下面に位置する計測点においては、圧縮ひずみが卓越していることから、損傷部においては曲げの影響を受けているものと考えられる。
- 2) 本実験に用いた線支承の上向き鉛直力に対する最終的な破壊形態は、ピンチプレートとアンカーボルトが鉛直方向に曲げ上がる状態となることにより、上部構造とピンチプレートとの引掛りが外れるモードであった。また、鉛直方向の剛性が低下した要因としては、アンカーボルトとピンチプレートのアンカー部周辺の断面において降伏ひずみに達したことが原因と考えられる。
- 3) 津波の影響に対する線支承の耐荷力評価では、橋軸直角方向に対しては、下沓突起部の隅角部近傍の断面領域、例えば、実験における損傷部や、下沓突起部の基部に位置する断面部において曲げ剛性の比較を行い、津波によって作用する水平力に対して最弱部となる断面を特定して耐荷力の評価を行う必要がある。また鉛直上向き方向に対しては、アンカーボルト本体の引張や曲げ耐力だけでなく、アンカーボルトの変形に伴うピンチプレートの抵抗機能の低下の影響についても考慮しておく必要がある。
- 4) 東北地方太平洋沖地震による津波の影響により生じた線支承部の実際の破壊性状を本載荷実験におけ

る破壊性状と比較することにより、線支承で鋼桁橋を支持していた水尻橋ならびに横津橋の線支承に支配的に作用した作用力の方向を明らかにした。

参考文献

- 1) 濱井翔太郎，幸佐賢二，佐々木達夫，佐藤崇：孤立波性状の津波によって橋梁へ作用する鉛直波力の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.2，pp.565-570，2014.
- 2) 川崎佑磨，伊津野和行，生島直輝，山中拓也，四井早紀：津波による流体力軽減に有効な整流板形状に関する実験的研究，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.70，No.1，pp.129-136，2014.
- 3) 田邊将一，浅井光輝，中尾尚史，伊津野和行：3次元粒子法による橋桁に作用する津波外力評価とその精度検証，土木学会構造工学論文集，Vol.60A，pp.293-302，2014.
- 4) 中村友昭，水谷法美，Xingyue REN：津波による桁の移動に与える津波力低減対策の影響に関する研究，土木学会論文集B3(海洋工学)，Vol.69，No.2，pp.I_821-I_825，2014.
- 5) 炭村透，張広鋒，中尾尚史，星隈順一：津波によって橋に生じる作用に対する鋼製支承の抵抗特性に関する実験的検討，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.69，No.4，pp.I_102-I_110，2013.
- 6) 国土交通省国土技術政策総合研究所，(独)土木研究所：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による道路橋等の被害調査報告，国土技術政策総合研究所資料第814号／土木研究所資料第4295号，2014.12.
- 7) 森屋圭浩，中尾尚史，星隈順一：津波の影響を受ける橋に適用する損傷制御型支承の検討，第18回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム，2015.
- 8) 安原真人，藤橋秀雄，市川篤志，水谷太作：既設鋼鉄道橋の鋼製支承の水平耐力評価法に関する実験および解析的研究，土木学会構造工学論文集，Vol.49A，pp.633-644，2003.3.
- 9) 中原正人，池田学，豊岡亮洋，永井紘作：鋳鉄製支承の地震時耐荷力特性と復元力モデル，鉄道総合技術研究所報告，Vol.22，No.3，p.23-28，2008.3.
- 10) (社)日本道路協会：道路橋支承便覧，1973.4.
- 11) (社)日本道路協会：道路橋支承設計方針，1976.
- 12) (社)日本道路協会：道路橋支承便覧，2004.4.
- 13) 中尾尚史，森屋圭浩，井上崇雅，星隈順一：気仙大橋の損傷跡から推定される上部構造の挙動メカニズム，第18回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム，2015.