

# 地震時における斜角鋼桁の支承部の作用力と耐荷特性

和田 一範\* 池田 学\* 山下 健二\*\*

Acting Force and Strength of Bearings on Steel Railway Bridges with Skew Angles during Earthquake

Kazunori WADA Manabu IKEDA Kenji YAMASHITA

Most seismic damages of steel railway bridges tend to occur at their bearings, particularly in case of skewed bridges. However, there are not enough studies about the characteristic of bearings of skew bridges regarding the acting force of the bridge and strength of bearings during earthquake. In this paper, we have conducted static and dynamic analyses of the real structures with different structural types, skew angles and span lengths in order to clarify the acting force on the bearings. As a result, it was found out that the acting force was concentrated on the bearing at the obtuse corner because of the supplemental acting force caused by the difference of deflection between the two main girders. Moreover, we have conducted the monotonic loading test of the bearings in various directions. Consequently, it was found out that the strength of bearings was not so affected by the directions of acting force and could be evaluated by the shear capacity.

キーワード：鋼桁，斜角，支承，たわみ差，耐荷特性

## 1. はじめに

兵庫県南部地震をはじめとする鋼鉄道橋に大きな被害をもたらした地震の損傷事例を調べると、支承部の損傷数が他の部位に比べて圧倒的に多い。その中でも特に斜角桁の支承部の損傷割合が直橋に比べて高く<sup>1)</sup>、斜角桁では支承部への作用力が直橋に比べて相対的に大きいと考えられる。また、斜角桁は支承部の損傷後に桁全体が回転した事例があるなど、直橋に比べて落橋に対する安全性を十分に検討する必要がある<sup>例えは2) 3)</sup>。

これまでの斜角桁の地震時挙動に関する研究を作用側と抵抗側で整理すると、前者については、支承部の損傷後の桁全体の回転挙動に着目した研究が中心的に行われており<sup>例えは4) 5)</sup>、支承部の作用力に着目した検討例<sup>6)</sup>はあるものの、あまり詳細には行われていない。そのため、斜角桁の支承部の作用力が直橋に比べて大きくなる理由や条件については不明確な点が多い。また、後者について、斜角桁では、支承部に斜め方向の作用力が生じることも想定されるが、支承の耐荷特性に関する実験例<sup>7)</sup>はあるものの、斜め方向に作用した場合については、十分な検討がなされていないのが現状である。

一方で、近年の大規模地震を受けての鉄道構造物の耐震設計標準の性能規定化<sup>8)</sup>など、鉄道構造物の耐震評価の高精度化が求められるなか、斜角鋼桁の耐震評価をするうえで、斜角鋼桁への作用力およびそれに対する支

承部の耐荷特性に関して、斜角鋼桁特有の事象の有無や程度を把握しておくことは重要である。

そこで本研究では、地震時における斜角鋼桁の支承部の作用力と耐荷特性に関して各種検討を行った。まず、斜角や支間の異なる鋼鉄道橋を対象に平面骨組モデルによる静的解析および動的解析を実施し、斜角鋼桁の支承部の作用力が、直橋に比べて大きくなる理由や条件などを明らかにした。次に、支承部の耐荷特性の検討として、採用数が多い鑄鉄製線支承を対象に、実橋梁から撤去した線支承を用いて、荷重の作用方向を変えた水平載荷試験を行い、破壊モードや最大荷重値などを把握し、橋軸直角方向の作用に対する既提案の耐力算定式<sup>9)</sup>との比較を実施した。

## 2. 斜角鋼桁支承部への作用力の傾向把握

### 2.1 対象の橋梁モデル

検討対象とする橋梁モデルの一覧を表1に示す。支間10m、25mの橋梁について、斜角を90°、75°、60°、45°と変えてモデル化を行った。ここで、斜角とは橋軸方向に対して支承線軸がなす角度であり、斜角90°は

表1 検討対象の橋梁モデル一覧

支間	斜角	橋梁形式
10m	90° (直橋)	上路単純桁
	75°	
	60°	
	45°	
25m	90° (直橋)	下路単純桁
	75°	
	60°	
	45°	

\* 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室

\*\* 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室  
(現 JR九州コンサルタンツ株式会社)

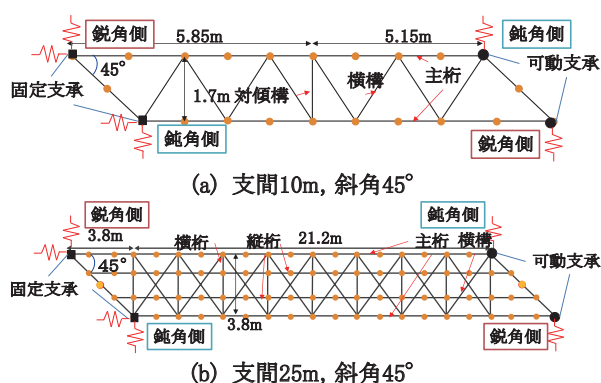


図1 解析モデルの一例

直橋を意味する。なお、橋梁形式は、実橋梁での事例の多い形式とし、支間10mについては上路単純桁、支間25mについては下路単純桁とした。また、それぞれの形式について、横桁や横構の配置などの構造の詳細は、実橋梁の財産図をもとに設定した。

## 2.2 モデル化と解析方法

解析モデルは、水平方向の挙動に着目するため、平面骨組モデルとした。図1にそれぞれの支間の橋梁について、斜角45°の解析モデルを一例として示す。主桁・縦桁・横桁・横構・対傾構は、線形の3次元梁要素でモデル化した。支承は、橋軸方向と橋軸直角方向にそれぞれ線形のばね要素でモデル化した。また、縦桁と横桁および主桁と横構は鉛直軸回りをピン結合とし、その他の部材は剛結合とした。支承ばねのばね定数は、橋軸方向については、ソールプレートのせん断剛性、橋軸直角方向については、サイドブロックのせん断剛性に基づいて設定した<sup>9)</sup>。また、支承の遊間は考慮せず、全ての支承が同時に抵抗するモデルとした。なお、橋台についてはモデル化していない。

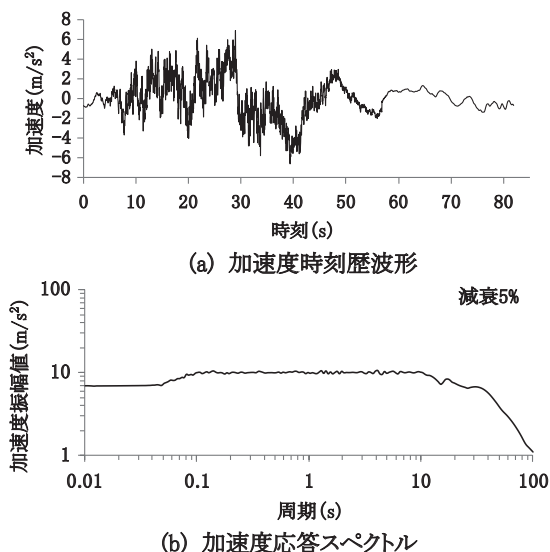


図2 動的解析に用いた入力波

表2 検討ケース一覧

ケース	橋梁	鋼桁の剛性		解析方法
		斜角		
Case1	支間25m 下路単純桁	90°	剛体、弾性体	静的
		75°	剛体、弾性体	
		60°	剛体、弾性体	
		45°	剛体、弾性体	
Case2	支間10m 上路単純桁	90°	弾性体	静的
		60°		
	支間25m 下路単純桁	90°	弾性体	
		45°		
Case3	支間25m 下路単純桁	90°	弾性体	動的
		75°		
		60°		
		45°		

解析方法として、静的解析は10m/s<sup>2</sup>の加速度に対する慣性力に相当する節点力を橋軸直角方向に与えた。動的解析については、解析モデルごとの固有周期と入力波の周期特性との関係による影響が含まれないように、図2に示す加速度時刻歴および加速度応答スペクトルの特性を持つスペクトル適合波を各支承部に対して、橋軸直角方向に入力した。

## 2.3 検討ケース

検討ケースの一覧を表2に示す。Case1では、鋼桁を仮想的に剛体とした場合と、実橋梁の挙動に近いと思われる弾性体とした場合で作用力を比較し、鋼桁のたわみによる作用力の違いの有無や程度を把握した。検討する橋梁は、支間25mの下路単純桁とした。なお、剛体モデルでは鋼桁のヤング率を弾性体の場合の10<sup>5</sup>倍に設定した。

Case2では、支間10mの上路単純桁と支間25mの下路単純桁の場合で作用力を比較し、支間や構造形式の違いが作用力に与える影響の有無や程度を把握した。

Case3では、動的解析と静的解析による作用力の傾向を比較し、動的な入力の影響の有無や程度を把握した。

## 2.4 解析結果

### 2.4.1 鋼桁たわみの影響

図3に斜角の異なる支間25mの下路単純桁において、鋼桁が剛体の場合と弾性体の場合について、固定支承側の各支承部の橋軸方向および橋軸直角方向の作用力を示す。ここで、正の作用力とは、静的解析で節点力を与えた方向の作用力を示す。

橋軸方向について、鋼桁が剛体の場合、斜角に依らず作用力は発生しない。それに対して、鋼桁が弾性体の場合、直橋(斜角90°)では作用力が生じないが、斜角がある場合は作用力が発生する。しかも、橋軸方向の力の釣合いを保つために、鈍角側と鋭角側で逆向きの作用力となり、鋼桁を回転させようとする作用力が働く。

一方で、橋軸直角方向について、鋼桁が剛体の場合、慣性力が鋼桁を介して、均等に伝わることにより、斜角に関わらず全支承に同じ作用力が発生する。それに対して、鋼桁が弾性体の場合は、斜角があることで鈍角側の作用力

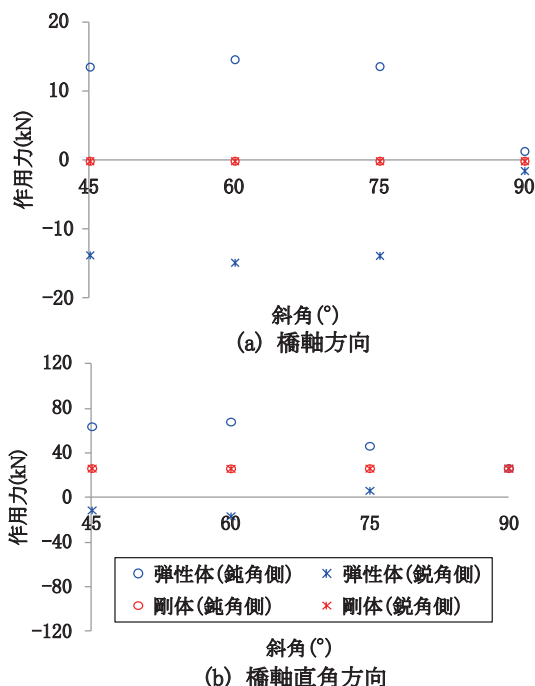


図3 斜角ごとの作用力（剛体，弾性体）

が大きくなり、鋭角側の作用力が小さくなる傾向が見られる。ただし、鈍角側作用力は斜角 60° 付近がピークとなっており、斜角 45° の方が斜角 60° よりも作用力が小さい。

斜角が小さいと鈍角側作用力が大きくなる傾向は、鋼桁の面外変形（たわみ）に起因すると考えられる。すなわち、鋼桁が剛体の場合は、鋼桁にたわみが生じないため、支承への作用力は慣性力に起因する作用力だけとなる。それに対して、鋼桁が弾性体の場合は、各主桁が支承位置を支点として変形しようとするため、斜角があると橋軸直角方向についてたわみ差が生じることになる（図4①）。しかし、鈍角位置にある横桁等がたわみ差を抑えるように力を伝達し、それが鈍角側の支承に付加的な作用力として加わるため、鈍角側に作用力が偏ること

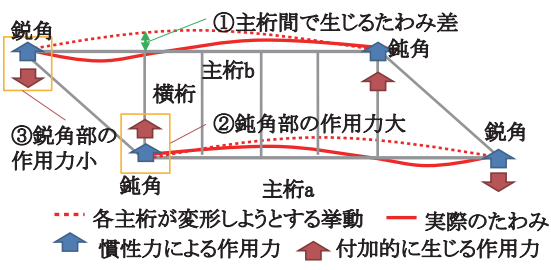


図4 主桁のたわみによる鈍角側の支承への作用力の偏り

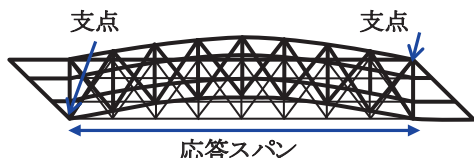


図5 鈍角側を支点とした変形形状（斜角 45°）

となる（図4②）。また、鈍角側に作用力が付加的に加わる結果、作用力の合計が釣合うために、鋭角側の作用力が低減する（図4③）。

また、斜角 60° 付近を境に斜角が小さいほど作用力が小さくなる傾向は、斜角桁の面外剛性の大小によるものと考えられる。すなわち、図5に示すように、斜角桁は鈍角側の支承を支点とした変形形状となるため、斜角が小さいほど、主桁の応答スパンが短くなり、斜角桁の面外剛性が大きくなる。その結果、橋梁全体としては各支承部に力を均等に伝達する剛体の挙動に近づくため、鈍角側の支承への作用力の偏りが小さくなる。

以上より、斜角桁の作用力は鈍角側の支承に偏って加わるが、斜角が小さいほど偏りが大きくなるとは限らないと言える。また、斜角を有する場合、桁を回転させようとする橋軸方向の作用力も働き、合力は载荷方向と一致しなくなる。

#### 2.4.2 支間・構造形式の影響

図6に支間 10m の上路単純桁と支間 25m の下路単純桁の固定支承について、斜角 90°（直橋）に対する斜角ごとの橋軸直角方向の作用力の比を比較する。なお、後述する考察を行うために、下路単純桁の端横桁を仮想的に除いた結果についても合わせて示す。支間によって慣性力が異なるが、直橋に対する比として正規化しているため、その影響は除いた整理となっている。

25m の下路単純桁の方が、斜角があることによる作用力比が大きく、鈍角側の支承への偏りが大きいことがわかる。これは、構造形式と支間それぞれの影響が含まれていると考えられる。

構造形式の影響について、25m の下路単純桁は、横桁が配置されていることにより、2.4.1で述べた主桁間のたわみ差を抑えるための付加的な作用力が伝達されやすいと考えられる。このことは、仮想的に下路単純桁の端横桁を除いた場合の解析結果（図6）の方が、作用力比が小さくなっている傾向とも整合する。

また、支間が異なることで、辺長比（主桁間隔/支間）が異なり、相対的な面外剛性が異なることも影響すると考えられる。本解析モデルの場合、上路単純桁の辺長

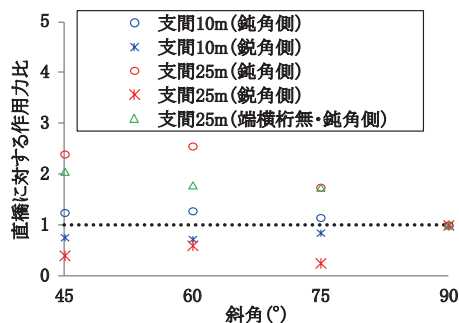


図6 斜角ごとの直橋（斜角 90°）に対する作用力の比（支間 10m, 25m）

特集：構造物技術

比は0.17であり、下路単純桁の辺長比は0.152である。僅かではあるが、辺長比の小さい下路単純桁の方が、相対的に面外剛性が小さく、たわみやすいため、作用力の偏りが大きくなることが考えられる。これは、解析結果の傾向とも整合する。

2.4.3 動的入力の影響

支間25mの下路単純桁において固定支承の鈍角側の作用力が最大となる時刻での橋梁の変形モードを図7に示す。いずれも、1次モードが卓越した変形モードであることがわかる。

また、支間25mの下路単純桁の固定支承において、斜角90°（直橋）に対する斜角ごとの最大作用力の比を図8に示す。

動的解析においても、斜角があると直橋に比べて鈍角側の支承の作用力が大きくなり、鋭角側の支承の作用力が小さくなる傾向が見られる。また、斜角60°で鈍角側の作用力が最も大きくなる点も同様である。

このように、動的入力の場合においても、静的解析で見られた傾向が確認された。

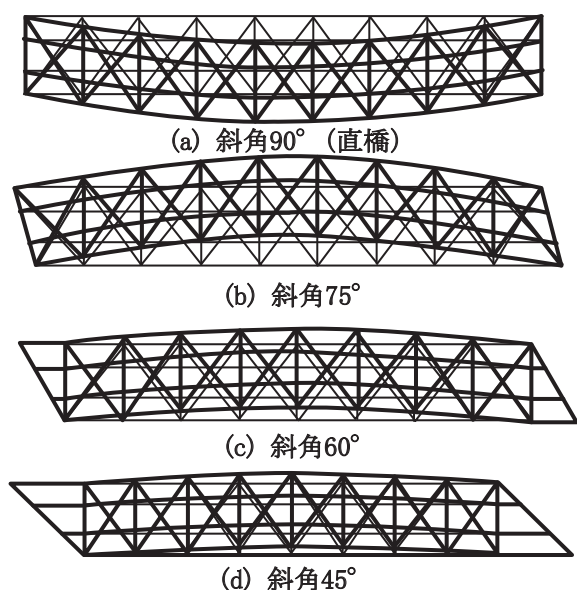


図7 固定支承鈍角側の作用力が最大となる時刻での変形モード

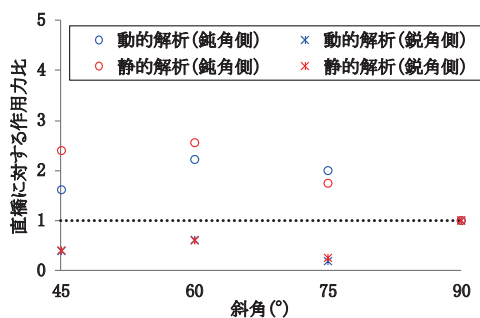


図8 斜角ごとの直橋（斜角90°）に対する作用力の比（支間25m、静的解析・動的解析）

3. 斜め方向の作用力に対する支承の耐荷特性の把握

斜角桁の場合、荷重が橋軸直角方向にのみ作用する場合でも、斜め方向に作用力が生じる可能性がある。また、直橋に比べて鈍角側で大きな合力が作用する可能性がある。そこで、斜め方向に荷重を作用させた水平載荷試験を実施することで、斜め方向の作用力に対する線支承の耐荷特性を把握した。なお、水平方向の作用力に対する支承部の損傷箇所はサイドブロックやソールプレートが挙げられるが、本研究では、線支承本体で損傷事例の多いサイドブロックに着目して検討している。

3.1 試験概要

既設の鋼鉄道橋からの撤去品である同種の鑄鉄製（FC25）線支承3体を使用した。載荷試験は、図9に示すように水平・鉛直2軸の載荷試験装置で鉛直に500kN

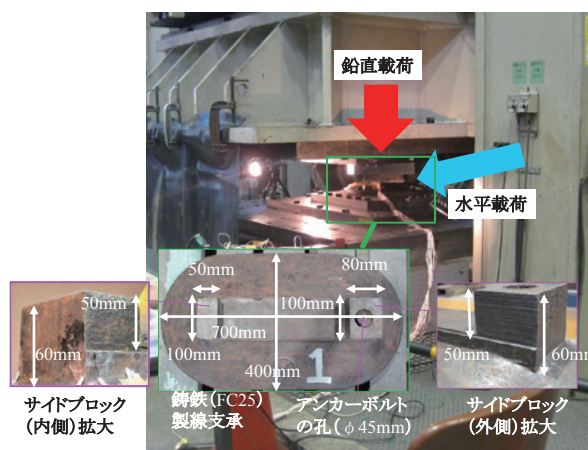
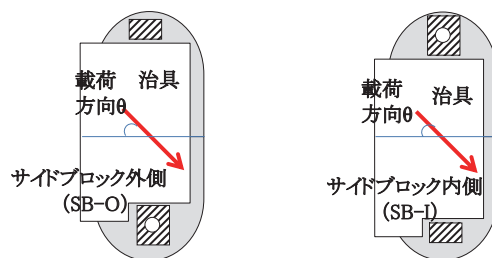


図9 試験装置と試験体寸法



(a) SB外側載荷 (b) SB内側載荷

図10 載荷方向と治具のイメージ

表3 試験ケース

Case	載荷方向	サイドブロック
SB-O-0	0°	外側
SB-O-45	45°	外側
SB-O-90	90°	外側
SB-I-45	45°	内側
SB-I-60	60°	内側

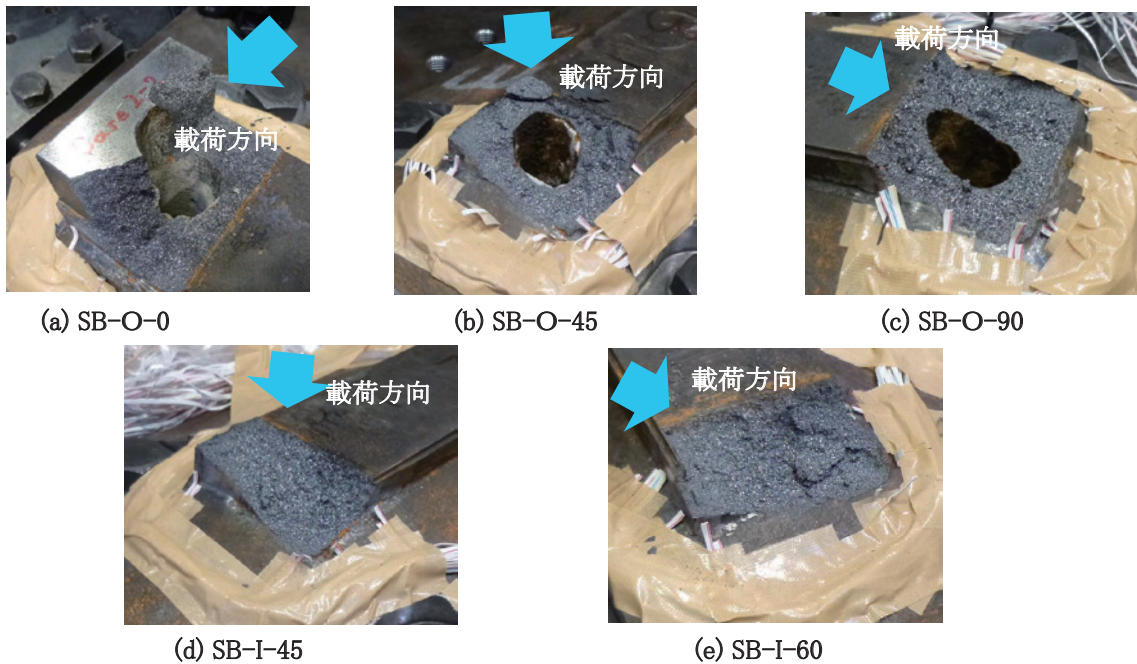


図 11 線支承の破断状況

の荷重を作用させた状態で、図 10 に示すようにそれぞれの作用方向にソールプレートを模擬した鍵型の治具を当てて実施した。表 3 に実施した試験ケースを示す。

### 3.2 試験結果と考察

各ケースとも支圧面の摩擦力まで荷重が上昇した後に変位が生じ、サイドブロックに接触した時点で、荷重がさらに上昇し、最大荷重値を示した直後にサイドブロックが脆性的に破断して、荷重が急激に低下した。図 11 に各ケースの載荷後のサイドブロックの破断状況を示す。各ケースとも載荷方向に沿って破断面が形成されることが確認された。ただし、SB-O-0 では、治具が接触している範囲（幅 50mm）のみ破断している。

#### 3.2.1 荷重－変位関係

図 12 に各試験ケースにおける荷重－変位関係を示す。SB-O-0, SB-O-45, SB-O-90 の比較や SB-I-45, SB-I-60 の比較より、斜め方向に載荷した場合、最大荷重は橋軸直角方向や橋軸方向作用時と同等もしくはやや小さくなる。特に、SB-O-0 は、治具と供試体の接触の状況が他と異なることもあり、破断面の形状が、その他のケースと異なるものの、最大荷重値としては同等となっている。これは、作用力に対するサイドブロックの抵抗面積が同程度であったためと考えられる。

また、鋳鉄の規格値の引張強度（150N/mm<sup>2</sup>）から算出したせん断強度（約 87N/mm<sup>2</sup>）とサイドブロックの寸法より算出した橋軸直角方向に関するせん断耐力と各試験ケースの最大水平荷重値を比較する。なお、せん断耐力算定の際の応力分布については、既往の研究<sup>9)</sup>に基づき台形分布を仮定している。比較の結果、サイドブ

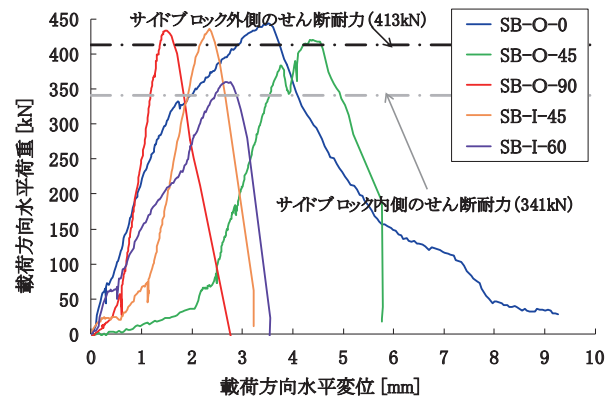


図 12 荷重－変位関係

ロックの内側・外側ともに、最大荷重は算定されたせん断耐力と同程度かそれ以上であり、やや安全側の評価となっている。従って、既提案の耐力算定式は橋軸直角方向で算定されているが、本結果より斜め方向の載荷においても、適用できることが確認された。

さらに、最大荷重を示した後の挙動について、SB-O-0 は最大荷重を示した後に、緩やかに荷重が低下している。これは、サイドブロックは脆性破壊するものの、破壊する範囲がソールプレートを模擬した治具（幅 22mm）とサイドブロック（幅 50mm）との接触範囲に限定されるためと考えられる。一方、その他のケースは最大荷重を示した後に、急激に荷重が低下している。これは、サイドブロック全体が脆性的に破壊するためと考えられる。

以上のことから、破断面の形状や破断後の荷重－変位関係は載荷方向によって異なるものの、最大耐力としては、載荷方向に依らず、既提案手法によって同程度かやや安全側に評価可能であることが分かった。

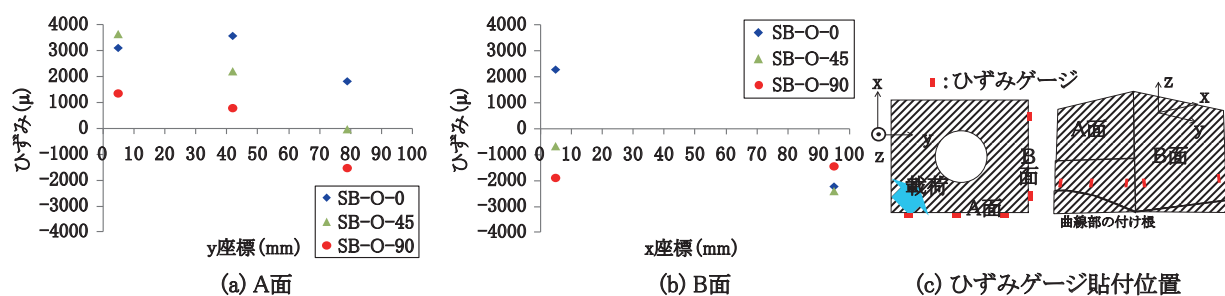


図 13 サイドブロック外側のひずみ分布

### 3.2.2 ひずみ分布

図 13 に最大荷重値でのサイドブロック外側について、鉛直方向の軸ひずみ分布を示す。ここで、ひずみは線支承の曲線部直上位置で計測した。載荷面では引張ひずみが生じ、反対面では圧縮ひずみが生じており、サイドブロックに載荷方向に沿って曲げモーメントが生じていることがわかる。例えば、SB-O-45 について、A 面は y 軸正方向に引張ひずみが小さくなり、B 面では x 軸正方向に圧縮ひずみが大きくなる。

このように、実際の破壊は曲げの影響が含まれていると考えられる。これは、既提案の耐力算定法において、せん断応力を一様分布ではなく台形分布としている仮定に、曲げの影響が含まれていると解釈することができる。その結果、3.2.1 で述べたように斜め方向載荷の場合も、最大荷重値はせん断耐力で概ね評価可能であると考えられる。

## 4. おわりに

本研究では、斜角鋼桁の支承部の耐震評価法の確立を目指して、作用力と耐荷特性に関してそれぞれ検討を行った。

まず、作用力に関する検討として、鋼鉄道橋を対象に斜角や支間の異なる平面骨組モデルを作成し、静的解析を実施し、直橋に比べて支承部の作用力が大きくなる理由や条件などについて基礎的な検討を行った。本検討で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 斜角桁の場合、鈍角側の支承に作用力が偏る。この傾向は、斜角が小さいほど大きく、また、支間が長いほど大きい。
- (2) 斜角桁の場合、荷重が橋軸直角方向にのみ作用する場合でも、橋軸方向に作用力が生じる。

次に、耐荷特性の検討として、実橋梁から撤去した鋳鉄製線支承を用いて、荷重の作用方向を変えた水平載荷試験を行い、破壊モードや最大荷重値などを把握した。本検討で得られた結果を以下にまとめる。

- (3) 斜め方向に力が作用した場合、最大荷重は橋軸直角方向や橋軸方向にのみ作用した時と同等もしくはやや

小さくなる。

- (4) 載荷方向ごとの最大荷重値は、既往研究で提案されている橋軸直角方向に対するサイドブロックのせん断耐力値と同程度かそれ以上であり、やや安全側の評価となる。

本研究で、斜角桁における作用力に関して基礎的な傾向を把握し、耐荷特性に関して、既提案の算定法で斜め方向載荷の耐力も評価可能であることがわかった。今後は、橋台の変形などの影響を踏まえた斜角鋼桁支承部への作用力の検討を行う予定である。

## 文 献

- 1) (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道総研報告 兵庫県南部地震鉄道被害調査報告書，1996
- 2) 土木研究所橋梁構造 G：過去の大規模地震における落橋事例とその分析，土木研究所資料，No.4158，2009
- 3) 川島一彦，運上茂樹，星隈順一，幸左賢二：2010 年チリ地震による橋梁の被害調査報告，土木学会鋼構造委員会，2012
- 4) 大塚久哲，神田昌幸，鈴木基行，川神雅秀：斜橋の水平地震動による回転挙動解析，土木学会論文集 Vol.570，pp.315-324，1997
- 5) 平井良幸，川島一彦，松崎裕：地震時における斜橋の回転特性，土木学会論文集 A1，Vol. 68，No. 4 1432-1443，2012
- 6) 鈴木直人，市川篤司，三木千壽：斜角を有する橋梁の地震時挙動とその支承部の設計法に関する研究，土木学会第 55 回年次学術講演会，2000
- 7) 安原真人，藤橋秀雄，市川篤司，水谷大作：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，構造工学論文集，Vol.49A，2003
- 8) (公財) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，2012
- 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，鉄道総研報告，Vol.22，No.3，2008