

# 斜角を有する鋼箱桁の支点上ダイヤフラムの強度に関する実験

## Experimental Study on Strength of Support Diaphragms in Skew Box Girders

吉川 薫\*<sup>1</sup> 金原 慎一\*<sup>2</sup> 清水 茂\*<sup>3</sup>  
Kaoru YOSHIKAWA Shin-ichi KIMBARA Shigeru SHIMIZU

### Summary

A load capacity test was performed on a bridge with steel skew box girders to learn the strength of support diaphragms in the girders and the collapse behavior of the bridge. The test proved that such a bridge, when loaded, has a more complex internal reaction dispersion than a right bridge, and that it suffers greater deterioration of ultimate load strength.

### 1. はじめに

鋼箱桁の構造部材の1つである支点上ダイヤフラムは、その崩壊が橋梁全体の崩壊に影響するほどの重要な部材であるにも関わらず、いまだに合理的な設計法が確立されていない。実際には、「鋼道路橋設計便覧」<sup>2)</sup>(以下、「便覧」と略称)に従って設計しているのが現状である。この場合、ダイヤフラムのみを取り出すので、直橋、斜橋にかかわらず同じ思想で設計が行われている。

直橋の場合は、著者らの研究<sup>3)</sup>などから、支点上ダイヤフラムが主桁の腹板やフランジから受ける力がある程度わかっており、これを用いることにより、支点上ダイヤフラム周辺のみを取り出した部分解析が可能である。

しかし、斜橋の場合は、研究がほとんど行われていないことからこれらに関する情報は全くなく、数値解析により支点上ダイヤフラムの挙動を的確に捉えようとすると、解析はダイヤフラムの周囲のみならず桁のほぼ全体を対象としなければならない。文献<sup>4)</sup>の解析が、ダイヤフラム周辺のみならず、ダイヤフラムを含む桁全体を対象としているのもこの理由による。

現実に製作・架設される橋梁に斜角を有するものがないことを考えると、支点上ダイヤフラムの研究にあたっては、これら斜角の影響を知り、合理的な設計法を確立することは必須であると考えられる。

著者らは、解析結果を確認し、また、支点上ダイヤフラムの崩壊挙動や強度を調べる目的で、耐荷力実験を行

った。この実験では、支点上ダイヤフラムの補剛材寸法や腹板厚などが異なる8体の模型を製作した。実験では、載荷荷重に応じたダイヤフラムや腹板のひずみ、各支承における反力などを測定しているほか、有限要素法による全体解析では十分に把握できないダイヤフラム細部の変形なども測定している。

本論文では、この実験の概要と結果を、特に直橋と斜橋の比較に重点を置いて報告する。

### 2. 支点上ダイヤフラムの設計について

支点上ダイヤフラムが橋軸に対して斜めに配置された斜橋では、均等な鉛直荷重が作用しても、その斜角によって主桁にねじり、そり等の変形が生じるうえ、支点反力が支承によって異なり、時として負反力が生じる場合もある。このことから、斜橋は直橋と比べ支点上ダイヤフラムの応力性状がより複雑であると考えられるうえ、支点上ダイヤフラムを含む支承部周辺の応力状態やその耐荷力に対して、斜角の影響が生じる可能性がある。

箱桁の支点上ダイヤフラムの設計は、「便覧」の記述によって、通常は下記の手順によってなされている。

- ① 橋梁全体の構造計算(格子計算)によって、支点反力を求める。これが、ダイヤフラム・支点上補剛材の設計力になる。
- ② 支点上補剛材の設計を行う。これには、支圧応力の照査と、有効座屈長がダイヤフラムの高さの1/2に

\*<sup>1</sup>松本工場製造部生産技術課

\*<sup>2</sup>松本工場生産設計部生産設計課課長代理

\*<sup>3</sup>信州大学工学部社会開発工学科助教

なる柱としての圧縮応力の照査が含まれる。

③ 支点上ダイヤフラムの設計を行う。ダイヤフラムを腹板、主桁上下フランジの有効部分を上下フランジとみなしたI形断面で、支点反力を荷重とみなした単純梁としての応力照査を行う。

すなわち、直橋・斜橋の区別にかかわらず、支点上補剛材は集中荷重を受ける柱部材として、また、支点上ダイヤフラムは単純梁の腹板として設計されているのが現状である。しかし、箱桁の支点付近は最も単純な構造でも、ダイヤフラム、支点上補剛材、主桁フランジ、主桁腹板が集中するところであり、それらが互いに複雑に影響を及ぼしあうのは明らかである。これらの影響を知り、合理的な設計方法が確立されることが望まれる。

### 3. 実験の概要

#### (1) 模型の形状・寸法

実験に用いた模型を図-1に示す。支点は腹板直下から250mm内側に寄った位置に配置されている。本研究では、1室箱桁橋を想定して1箱2沓タイプを採用した。模型桁の支点間隔(スパン)は3mであり、載荷点と注目する支点との間隔は1mである。図中の支点S1~S4のうち、S2がこの実験で注目する部分である。

模型は、タイプA, B, C, Dの4種類とし、各2体ずつ計8体を製作した。表-1にこれらの主要公称寸法を示す。

表-1 模型の諸元

| 項目  | タイプ                  | タイプA | タイプB | タイプC | タイプD |
|-----|----------------------|------|------|------|------|
| 斜角  | (°)                  | 90   | 60   | 60   | 60   |
| 補剛材 | 断面 (mm)              | 75×6 | 75×6 | 60×6 | 75×6 |
|     | A (cm <sup>2</sup> ) | 9.0  | 9.0  | 7.2  | 9.0  |
|     | I (cm <sup>4</sup> ) | 184  | 184  | 96   | 184  |
| 腹板厚 | (mm)                 | 9.0  | 9.0  | 9.0  | 4.5  |

箱断面寸法(高さ1000mm×幅1500mm)、フランジ厚( $t=10\text{mm}$ )、ソールプレート寸法(200mm×200mm)、スパン( $l=3000\text{mm}$ )、材質(SS400)は、すべて共通である。タイプAは、他の斜橋タイプの模型との比較の対象とするため直橋としたものである。タイプBは、60°の斜角を有するほかは、公称寸法はAと同一としている。また、タイプC, Dも斜角は60°に固定し、支点上補剛材の断面を他の模型より小さくしたものをタイプC、桁の腹板厚を小さくしたものをタイプDとした。

ダイヤフラムには、実験の目的のため4.5mmという薄い板を用いている。支点上補剛材の断面も実橋の感覚からいけばかなり小さい。この断面に「道路橋示方書」<sup>1)</sup>の規定を適用することはできないが、「便覧」の設計法によれば、この模型のダイヤフラムの許容反力は、表-2のようになる。

なお、以下、本論文では、支点上ダイヤフラムを構成する3つのパネルのうち、支点上補剛材に挟まれた中央部のパネルを中央パネル、支点上補剛材と腹板に挟まれ

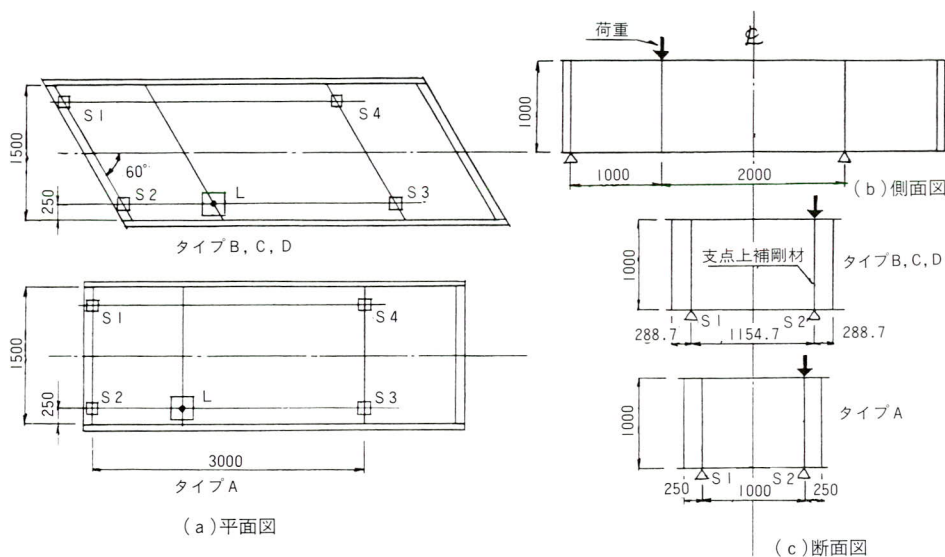


図-1 模型の概略図

表一 2 ダイヤフラムの応力計算

|        | タイプ                          | A、B、D  | C      |
|--------|------------------------------|--------|--------|
| 設計反力   | (kgf)                        | 19,300 | 16,800 |
| 支点上補剛材 | 支圧応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> ) | 1,021  | 982    |
|        | 圧縮応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> ) | 1,392  | 1,393  |
| ダイヤフラム | 曲げ応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> ) | 145    | 126    |
|        | せん断応力度(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 214    | 187    |

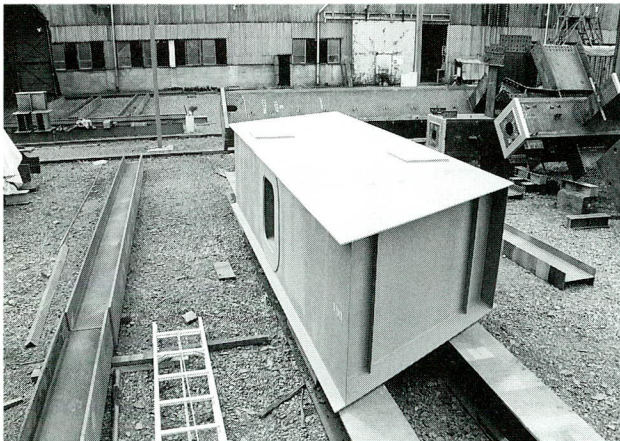
たパネルを側パネルと呼ぶこととする。また、二つの側パネルのうち、支点S2側のものを、載荷側側パネルと言うことがある。

本論文では、特に斜角が支点上ダイヤフラムの挙動に及ぼす影響に注目し、これら4種類8体の模型のうち、主としてタイプAとタイプBの2種類4体についての実験結果を報告する。

写真一1は、タイプB-1の試験前の外観である。

## (2) ひずみ、変位等の測定

ひずみは、注目するダイヤフラム、支点上補剛材、腹



写真一1

板の内外面で測定している。変位は、ダイヤフラムの面外変形、載荷点(上フランジ)及びその直下の下フランジ位置における桁のたわみを測定したほか、4つの支点すべてにおいて支点の沈下量を測定した。

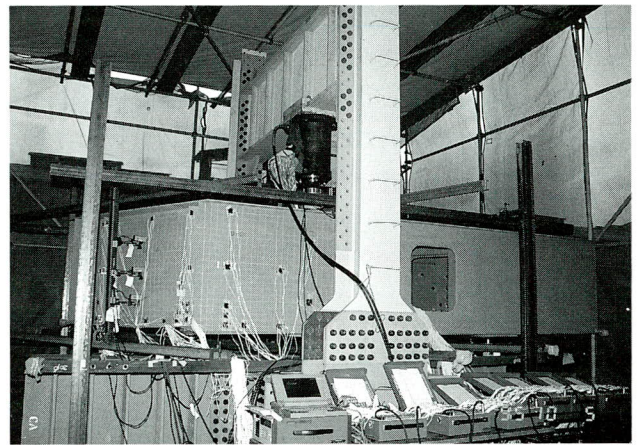
このほか、支点上ダイヤフラム、鈍角側の腹板については、載荷前の面外初期たわみと、実験終了後の面外残留変形を測定している。

## (3) 載荷装置・載荷方法および支持装置

載荷装置は、写真一2に示すように、桁を支える床梁、

ジャッキを装架する横梁とそれを支える柱からなっている。荷重及び反力はこの載荷装置内で釣り合っており、支持床には載荷装置と模型の自重のみがかかることになる。

荷重は偏心載荷とし、図一1において文字Lで示した載荷板に載せた。荷重の大きさは、ジャッキと模型の間に設置されたロードセルによって測定した。一方、各支



写真一2

点位置にもロードセルを置き、支点反力の大きさを測定している。模型は、原則としてこれらのロードセルの上に置くのみで、鉛直方向には拘束していない。

実験中は、つねに、これらの荷重や反力、桁のたわみやダイヤフラムの面外変形、ひずみの大きさをモニターした。載荷は、最高荷重付近までは荷重制御とし、以後は、載荷点及びダイヤフラムの変位を基にしたたわみ制御とした。

## 4. 実験結果

### (1) 支点反力の分配と最大荷重

桁の全体としての挙動に注目した場合、直橋と斜橋の違いは、各支点に対する反力の分配、すなわち各支点ごとの反力の大きさの違いとして観察される。

図一2は、タイプAとBの、荷重とS1～S4の4支の支点反力の値の変化をプロットしたものである。

この図の横軸は、実験中の載荷の段階であり、横軸の大きさ自体には物理的な意味はないが、荷重や各支点反力の大きさの推移を比較するため、このかたちで示した。

この図によると、タイプAの場合、最大荷重付近まで

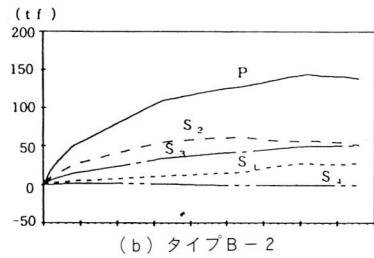
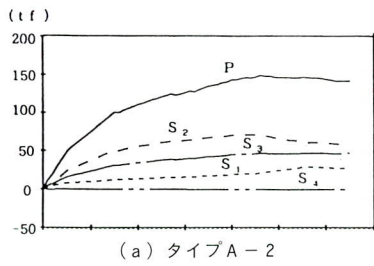


図-2 荷重と支点反力

は、各支点の反力は、おおむね荷重の増加に比例して増加している。またこのモデルでは、Pが最大値に達する前後から、S2の反力がわずかながら減少に転じているとともに、S1に増加傾向が見られる。すなわち、S2は最大荷重の前後で支点反力に耐えられなくなり、その分を同一支承線上のS1が負担したと考えられる。

一方タイプBの場合、S2の反力はかなり早い荷重段階で最大値に達しており、後半では、荷重Pが増加しているにも関わらず、S2の反力はむしろわずかながら減少している。それに対し、S3の反力は、後半の段階で、最高荷重を過ぎても増加しており、最終の段階ではS3の反力はS2のそれとほぼ同じ値となっている。すなわち、斜橋であるタイプBの場合、桁としての最大荷重よりかなり早い段階から支点反力の再配分が起こったといえる。

実験により得られた各タイプごとの桁としての最大荷重と、支点S2における最大の支点反力は、表-3に示すとおりである。

斜橋B-2の最大荷重は、直橋と比べ2~3%程度小さいだけであるが、支点反力は約14%小さい。

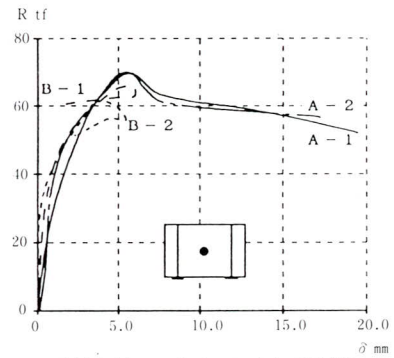
斜橋タイプどうしの比較では、最大荷重はCはBより大きく、DはBより小さいが、B、C、DともS2の最

大反力はほぼ同じである。

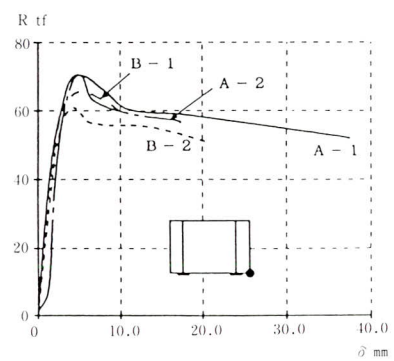
## (2) 荷重変形曲線

図-3は、タイプA、Bの、支点S2の反力の大きさとダイヤフラムの面外変形、およびその反力とダイヤフラム端部の腹板直下の沈下量の関係を示している。これらの図の横軸は、初期たわみの位置を基準とした付加たわみを示している。

タイプA-1とA-2では、面外初期たわみ量に違いがあったが、図-3(a)では、面外初期たわみが相対的に大きいタイプA-1で、変形がかなり初期の段階から漸増しているのに対し、A-2では、反力が概ね40tfを超えると変形の増加率が大きくなっている。しかし、最大荷重はA-1、A-2ともほぼ同じであり、初期たわみの大きさは、最大荷重や最大反力にはほとんど影響して



(a) 支点反力S2-ダイヤフラム中央の面外変形



(b) 支点反力S2-ダイヤフラム端の沈下

図-3 支点反力(S2)-変形曲線

表-3 最大荷重と最大反力

| タイプ                | A 1 | A 2 | B 1 | B 2 | C 1 | C 2 | D 1 | D 2 |
|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 最大荷重 Pmax (ton)    | 146 | 18  | 167 | 144 | 195 | 157 | 124 | 144 |
| S 2 最大反力 R 2 (ton) | 71  | 71  | 66  | 61  | 59  | 64  | 63  | 65  |
| S 3 最大反力 R 3 (ton) | 51  | 46  | 70  | 50  | 92  | 56  | 56  | 54  |
| R 2/Pmax (%)       | 49  | 48  | 40  | 42  | 30  | 41  | 51  | 45  |
| R 3/R 2 (%)        | 72  | 65  | 106 | 82  | 156 | 88  | 89  | 83  |

いない。これは、支点上ダイヤフラムの強度はダイヤフラムパネル全体の挙動よりも、むしろ支点上の局部変形に左右されるためと考えられる。

一方、この図では、斜橋であるタイプBは直橋のタイプAとは極めて異なる曲線を示している。すなわち、斜橋の場合、支点反力に対する変形は、反力の最大値の後もわずかの間だけ増加した後に減少している。前節で述べたように、斜橋の場合、早い段階で支点反力の再配分が起これ、S2の反力の大きさは载荷段階の半ばから減少しているが、このことが、ダイヤフラムパネル中央の面外変形の減少を引き起こしたものと考えられる。

図-3 (b) の、支点反力とダイヤフラム端の沈下の関係は、载荷側側パネルのせん断変形を表していると考えられる。この図を見ると、すべてのモデルで、反力は、最大値に達した後に一旦急激に低下しており、その後は変形の増加につれ緩やかに減少している。このことは、反力が最大値に達する付近でダイヤフラムが突然その強度を失ったことを示している。

この図からは、支点上のダイヤフラムパネルの強度や挙動を荷重変形曲線を用いて評価する場合、支点反力とダイヤフラム端の沈下の関係に注目すれば、直橋、斜橋を通じた議論が可能なことを示している。

### (3) ダイヤフラムの変形

支点上ダイヤフラムの崩壊を扱った文献<sup>9)</sup>によると、ダイヤフラムパネルには、崩壊時に支付近で局部的な面外変形の波が現れ、また、支点上補剛材はねじれ座屈的な挙動を示すことが、解析により予想されている。

写真-3、写真-4は、タイプA-1、B-2の、支点上ダイヤフラムのS2側支承近傍の残留変形を示している。

これらの写真より明らかなように、いずれもダイヤフラム下部で局部的な凹凸が現れており、解析により予測された挙動とほぼ同様な変形が見られる。S2上の補剛材も、その下部で大きく変形している。これらの補剛材は、ダイヤフラムの裏面（桁の内側）ではこの逆方向に変形しており、崩壊時に支点上補剛材がねじり座屈的な挙動を示すことが確認された。

これらの局部変形は、ダイヤフラムパネルの下端より15~20cm以内の範囲に集中している。また、支点上補剛材の変形が最も大きい位置は、その下端から5~7cm程度のところであった。これらの変形は、いずれも最高荷重に達する前にはほとんど観察されず、図-3の荷重-

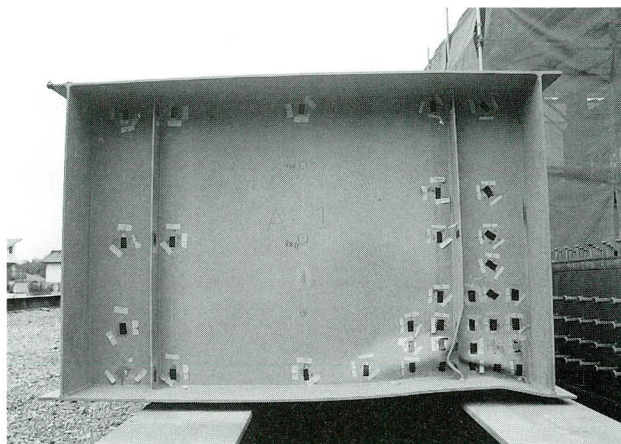


写真-3

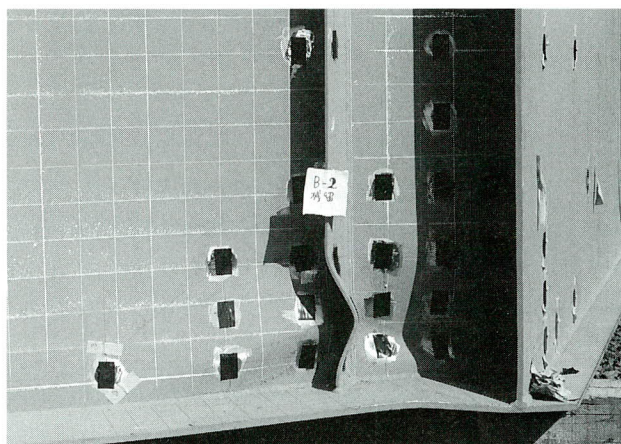


写真-4

変形曲線がピークに達する前後に突然現れた。このことから、ダイヤフラムの強度はこれらの局部変形に支配されていると考えられる。

### (4) ダイヤフラムのひずみ

図-4は、タイプA-1、B-1の、ダイヤフラムの主要点における主ひずみの大きさと方向をプロットしたものである。この図は、いずれもS2の反力が最大値に達する直前のものである。

この図を見ると、直橋、斜橋いずれの場合も、S2側の側パネル下部で大きなひずみが見られていることがわかる。この側パネルでは、下部ほどではないにせよ、上部でもある程度の大きさのひずみが見られる。これら側パネルの主ひずみは、方向が45°方向に傾いており、側パネルではせん断が卓越していることを示している。中央パネルでは、いずれのモデルでもS2付近に大きなひずみが見られるほかは、大きなひずみは観察されなかった。

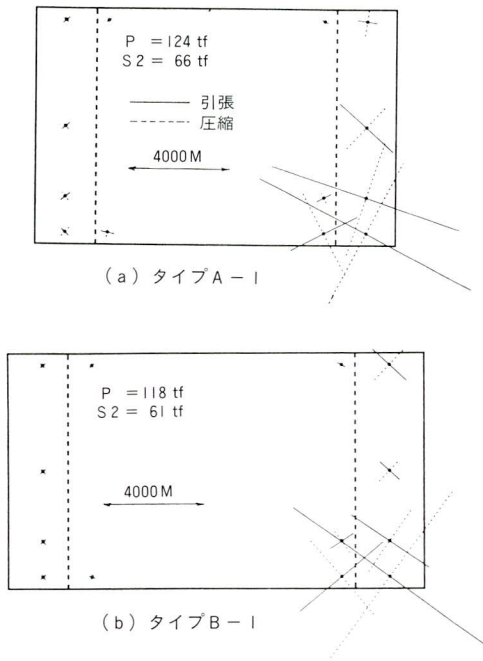
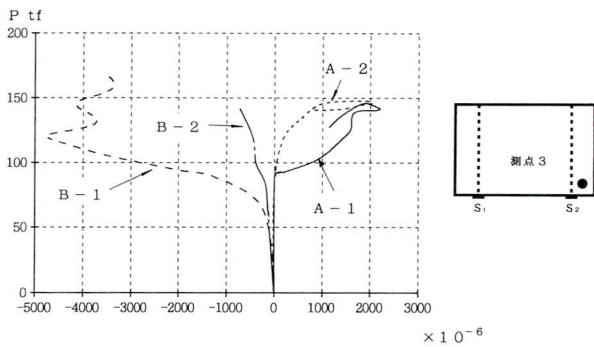
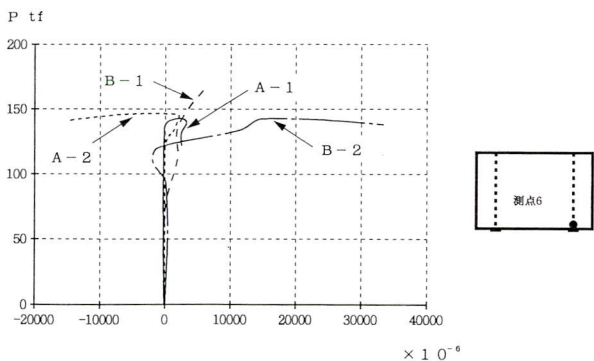


図-4 ダイアフラムの主ひずみ分布



(a) 側パネル下部の水平方向の曲げひずみ



(b) 補剛材下部の曲げひずみ

図-5 支点付近の曲げひずみ

図-5は、S2側側パネルの中央下端より12.5cmの位置、およびS2上の補剛材の下端から5cmの位置(図中の黒丸の位置)における曲げひずみと荷重との関係をプロットしたものである。

図-5(a)を見ると、タイプAではこの注目点で、始めのうちは面外曲げがほとんど発生していないこと、荷重が100tf近くに達すると突然面外曲げが発生していることがわかる。一方、タイプBでは、50tf付近から曲げひずみが発生しており、かなり早い段階から面外曲げが発生している。

一方、図-5(b)の補剛材下部の曲げひずみは、タイプAの場合、最大荷重の近くまでほとんど発生せず、補剛材の変形が最大荷重の直前で発生したことを示している。斜橋のタイプBの場合、この変形はB-1で70tf付近から、B-2で100tf付近から発生しており、補剛材の曲げも、直橋より早い段階で発生していることがわかる。

## 5. 実験結果に対する考察

実験で取り上げたすべてのモデルについて、支点上ダイアフラムは、S2側の支点付近の局部変形を伴って崩壊した。この局部変形のモードは、ダイアフラムパネルでは、小さな凹凸が複数発生するものであり、また、支点上補剛材については、下端近くでねじれ座屈的な変形を呈している。これらの変形は、いずれも支点S2の反力が最大に達する以前にはほとんど観察されていない。すなわち、支点上ダイアフラムの崩壊は、これらの局部変形に支配されていると考えてよいと思われる。この崩壊挙動は、数値解析による研究の結果と極めて類似している。従って、支点上ダイアフラムの設計にあたっては、支点上補剛材のねじり座屈や支点付近の局部変形に対する十分な配慮が必要である。

支点上ダイアフラムの強度は、桁に作用する荷重の大きさではなく、むしろ、そのダイアフラムに直接作用する支点反力により評価することが適当である。そこで、支点S2の反力をモデルごとに比較すると、斜橋の場合、直橋に比べ、最大反力で8~14%小さいという結果が得られた。すなわち、斜橋の場合、一つの支点で支持する反力は直橋の場合に比べ小さいことになる。

直橋の場合、最大反力は桁に作用する荷重の増加とともに増加し、最大の反力値も最大荷重とほぼ同時に発生していた。しかし、斜橋の場合、この反力は桁としての

最大荷重に達する以前に減少に転じており、支点間の反力の再配分が早い段階で起こっていた。このことは、特に斜橋の場合、一つの支点の崩壊が連鎖的に別の支点の崩壊を起こす危険性が、直橋の場合より大きいことを示している。

一方、この実験からは、支点上ダイヤフラムの崩壊は、支点付近の局部変形によるため、ダイヤフラムパネル全体にわたる面外初期たわみはダイヤフラムの強度にはあまり影響しないことがわかった。

なお、本実験では、斜橋の場合、支点上補剛材は、ダイヤフラム面に垂直ではなく橋軸方向に取り付けられている。このため、柱としての支点上補剛材の断面二次モーメントは、それを垂直に取り付けた場合より小さくなっている。著者らの解析や実験によると、支点上補剛材については曲げ座屈よりもねじり座屈的な挙動が卓越すること、ダイヤフラムの崩壊には側パネルの局部変形が大きく影響していることなどがわかっている。このことから、通常的设计で取り扱っている支点上補剛材の曲げ座屈に対する剛性は、ダイヤフラムの最終的な強度や挙動には極端に大きな影響は与えないと推測されるが、この問題については今後の検討課題としたい。

## 6. 結 論

この論文では、斜角を有する鋼箱桁の支点上ダイヤフラムについて、特に直橋の場合との相違に注目して、その強度や崩壊挙動を報告した。この実験の結果の範囲内では、直橋と比較した斜橋の特徴として、下記のことが挙げられる。

- ① 支点反力の再配分が早い段階から起こり、桁としての最大荷重に達する以前にダイヤフラム部分の反力が減少に転ずる。
- ② 支点上ダイヤフラムの強度を直接表している支点反力は、直橋の場合に比し 8～14% 小さい。

③ 支点付近の変形が、早い段階から発生する。  
また、直橋、斜橋を通じ、下記のことがわかった。

④ 支点上ダイヤフラムの強度は支点付近の局部変形に依存し、ダイヤフラムパネル全体、あるいはダイヤフラムパネル中央部の挙動は強度にはほとんど影響しない。

## 謝 辞

この実験は、松本工場実験室において実施されたものでありますが、信州大学大学院の福永悦男、同工学部卒研究生（当時）の常田和哉の両君には、実験のスタッフとして作業に従事していただきました。著者らはこれらの方々に深く感謝いたします。

## ＜参考文献＞

- 1) 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編、(社)日本道路協会、平成6年2月。
- 2) 鋼道路橋設計便覧、(社)日本道路協会、昭和54年2月（昭和55年8月改訂）。
- 3) 清水茂、梶田建夫、成岡昌夫：連続箱桁における中間支承部の応力状態について、土木学会論文報告集、1978、pp.13-23。
- 4) 金原慎一、清水茂：斜角を有する鋼箱桁の支点上ダイヤフラムの応力性状、構造工学論文集、Vol.39A、1993、pp.1155-1167。
- 5) Shimizu, S. : An Elasto-plastic Large Deflection Analysis on Steel Box Girder Support Diaphragms, Jour. Constructional Steel Research, 1995, pp.191-206。
- 6) 清水茂、吉川薫、金原慎一：斜角を有する鋼箱桁の支点上ダイヤフラムの強度に関する実験、構造工学論文集、Vol.42A、1996、pp.159-170。

1996. 10. 31受付