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

An Experimental Study on the Strength of Support Diaphragms in Skew Box Girders

清水 茂* 吉川 薫** 金原慎一***
Shigeru SHIMIZU Kaoru YOSHIKAWA Shin•ichi KIMBARA

*工博 信州大学助教授 工学部社会開発工学科（〒380 長野市若里５００）
**工修 ㈱宮地鐵工所 松本工場生産設計課係長（〒390-14 長野県東筑摩郡波田町１９０９）
***工博 ㈱宮地鐵工所 松本工場生産設計課課長代理（〒390-14 長野県東筑摩郡波田町１９０９）

A sereis of experimental tests were carried out on the skew steel box girder support diaphragms to know the strength and collapse behaviour of such diaphragms. 8 specimens with 4 types of shapes and dimensions were prepared, and angle of the skew, stiffness of the load bearing stiffeners and thickness of the web plates are adopted as parameters. Through the tests, strains and out-of-plane deflection of the disphragms, defletion of the girders, the magnitude of the reaction and so on are measured.

It is found from the tests that the maximum value of the reaction of skew girders are smaller by about 15% than those of straight models, and the re-distribution of the reactions are observed in the earlier stage in the skew models. The local crippling is found in all models at the bottom of the diaphragm panels near the shoe, and the load bearing stiffeners are collapsed with the torsional buckling-like behaviour.

Keywords: skew box girder, support diaphragm, collapse behaviour, experimental test

1．まえがき

著者らは、斜角を有する鋼箱桁の支点上ダイヤフラムの強度や崩壊挙動を知るために、耐荷力実験を行った。本論文では、その結果を報告する。

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。

この支点上ダイヤフラムに関する研究は、これまでに、若干ではあるが行われている。

Dowling らは、長方形・台形断面箱桁の支点上ダイヤフラムの崩壊挙動に関する実験を行い、ダイヤフラムの破壊モードや初期不整の影響を調べている[1)2)]。また、El-Gaalyらは、有限要素法により支点上ダイヤフラムの応力分布やその安定性について調べている[3)4)]。イギリスでは、これらの研究を基に、鋼箱桁橋の一応の設計制作基準であるIDR[5)]などが提案されている。また、Crisfield らも有限要素法による解析を実施している[6)7)]。文献８）には、これらの研究を総括する形で支点上ダイヤフラムに関する解説が載せられている。最近では、Megson ら による支点上ダイヤフラムの補剛材の位置や板厚、支承の数などをパラメータとした研究がある[9)10)]。

一方、我が国では、著者らが、支点上ダイヤフラムの応力解析[11)]や耐荷力実験[12)]を行っているほか、連続曲線箱桁の支点上ダイヤフラムの弾性座屈解析も行っている[13)]。著者らはさらに、有限要素法を用いた弾塑性大変形解析によって、支点上ダイヤフラムの崩壊荷重や崩壊形式についての解析を行っている[14)]。

ところで、以上に示した研究は、すべて直橋のように、ダイヤフラムが主げた（橋軸）に対して直角な場合を対象としている。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、周知のように、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。

現実に架設される橋梁に斜角を有するものが少なくないことを考えると、鋼箱桁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ることは必須であると考えられる。

ところが、斜角を有する箱桁の支点部に着目した研究は、著者らの知る限り、著者らによる文献15)16)17）しか行われていない。これらの文献15)~17）で、著者らは、文献14）と同じく平面シェル要素を用いた斜橋全体の弾性解析や弾塑性大変形解析を行い、支点上ダイヤフラムの応力性状と支点反力分配のほか、その強度や崩壊形式などを調べている。

ところで、直橋の場合、著者らの研究[11]などから、支点上ダイヤフラムが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、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。上記15)～17)で、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。その結果、有限要素法の離散化にあたっては、細部の挙動を詳細に把握するに十分な要素分割が、必ずしも可能とは限らないのが実状である。

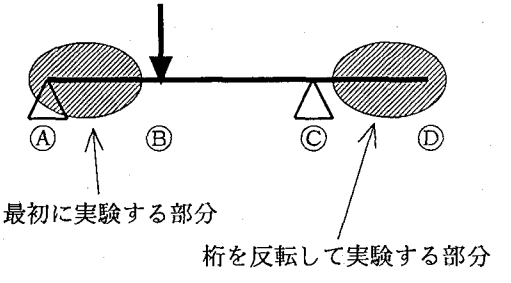
著者らは、上記15)~17）の解析結果を確認し、また、斜角を有する箱桁の支点上ダイヤフラムの崩壊挙動や強度を調べる目的で、耐荷力実験を行っている。この実験では、斜橋の支点上ダイヤフラムの補剛材高さや腹板厚などが異なる８体の模型を製作した。実験では、載荷荷重に応じた、ダイヤフラムや腹板のひずみ、各支承における反力などを測定しているほか、有限要素法による全体解析では十分に把握できないダイヤフラム細部の変形なども測定している。本論文では、この実験の概要と結果を、特に直橋と斜橋の比較に重点を置いて報告する。

2．実験の概要

2－1　模型の形状・寸法

この実験に用いられたダイヤフラムの模型は、Ａ－１，Ａ－２，Ｂ－１，Ｂ－２，Ｃ－１，Ｃ－２，Ｄ－１，Ｄ－２の計８体である。これら８体のダイヤフラムのうち、英字の部分が同じものは、同一の公称寸法・形状で製作されている。すなわち、この実験では、公称寸法が同一の模型を２体ずつ、計４種類の寸法を用いることとしている。これらの模型のうち、Ａ－１，Ａ－２は比較の対象とするため、直橋としたものである。Ｂ－１，Ｂ－２は、６０°の斜角を有するほかは、公称寸法はＡ－１，Ａ－２と同一としている。また、Ｃ－１，Ｃ－２は、支点上ダイヤフラムに取り付けられている支点上補剛材の断面を他の模型より小さくしたもの、Ｄ－１，Ｄ－２は腹板の板厚を小さくしたものである。

これらの模型は、形状や公称寸法が同じものどうし（すなわち名称の英字の部分が同じものどうし）２体を一組とし、それぞれ４体の載荷桁の両端に取り付けられている。これを模式的に表した**図－１**では、Ⓐ点とⒹ点が実験対象としている支点上ダイヤフラム、ⒷⒸ間が載荷桁である。実験は、まず、載荷桁を、**図－１**のようにⒶ点とⒸ点で支持し、Ⓑ点に載荷することにより、Ⓐ点のダイヤフラムについて実施する。その載荷終了後、桁を反転してⒷ点とⒹ点で支持し、Ⓒ点に載荷することによりⒹ点のダイヤフラムについての実験を行う。以後、本論文で単に「支点上ダイヤフラム」あるいは「ダイヤフラム」と記述した場合、この図のⒶ点又はⒹ点の、実験対象となっているダイヤフラムを意味することとする。



図－１　載荷桁とダイヤフラム

模型は、**図－２**に示すような、桁高１ｍ、幅1.5ｍ の長方形断面を有しており、支点は腹板直下から250 ㎜内側に寄った位置に配置されている。箱桁の支点の配置としては、１箱１沓タイプと１箱２沓タイプがあるが、本研究では、まず、最も基本的と考えられる１箱２沓タイプを採用する。模型桁の支点間隔（**図－１**のⒶⒸ間またはⒷⒹ間）は３ｍであり、載荷点（Ⓑ点）とⒶ点、及びⒸ点とⒹ点の間隔は１ｍである。

実験対象としている支点上ダイヤフラム（**図－１**のⒶ点およびⒹ点のダイヤフラム）の板厚は4.5 ㎜であり、厚さ 6㎜、突出高さ75㎜又は60㎜の支点上補剛材が、両面に取り付けられている。すなわち、この模型は、ダイヤフラムについては規定より小さな断面を用いている。Ⓑ点とⒸ点のダイヤフラムは、実験中、荷重や支点反力を受けるため、板厚を19㎜とするとともに、厚さ19㎜×突出高さ200㎜ の支点上補剛材を両面に配置しているほか、必要な補剛材を配置している。このⒷ点、Ⓒ点のダイヤフラム及び腹板には、模型内部で作業をするためのマンホールを設けている。マンホール周囲も、増厚や補剛材の配置などの補強をしている。上下フランジはいずれも板厚が10㎜で、これらは上フランジで５本、下フランジで１本の縦リブで補強されている。腹板は、厚さが

9㎜又は4.5㎜ であり、いずれも上端から 200㎜の位置に断面が10㎜×100㎜ の水平補剛材を取り付けている。これらの使用鋼材は、すべてＳＳ４００である。**表－１**に、使用鋼材の、実験終了後に測定された材料特性を示す。

表－１　鋼材の材料特性

モデル	腹　板		ﾀﾞｲﾔﾌﾗﾑ		補 剛 材	
	E	σ_y	E	σ_y	E	σ_y
Ａ－１	209	312	202	263	189	339
Ａ－２	210	310	207	237	209	343
Ｂ－１	209	295	214	256	191	345
Ｂ－２	207	288	208	264	208	340
Ｃ－１	209	312	196	245	212	343
Ｃ－２	207	307	206	249	205	343
Ｄ－１	213	314	198	256	210	341
Ｄ－２	216	318	214	247	208	342

Ｅ　：ヤング率（ＧＰａ）
σy：降伏応力（ＭＰａ）

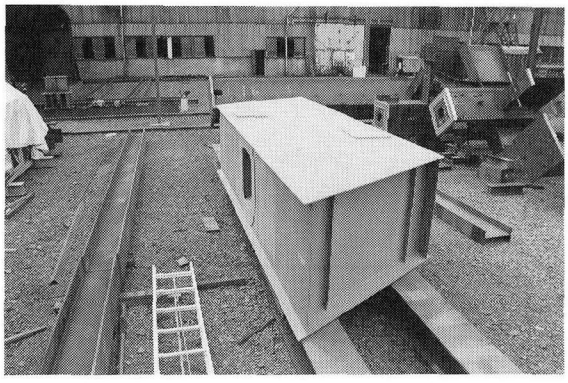
このほかの模型の諸寸法を**表－２**に示す。表中、「補剛材断面」とは実験対象の支点上ダイヤフラムに取り付けられる支点上補剛材である。模型の概形を**図－２**に示す。図中の支点 S_1～S_4のうち、S_2がこの実験で注目する部分である。なお、**図－２(a)** では、フランジの突出部分は描いていない。**図－２(a)** の支点S_1，S_2部分が**図－１**のＡ点、支点S_3，S_4がＣ点であり、載荷位置Ｌが**図－１**のＢ点にあたる。**図－１(b)** のかっこ内は、斜角が９０°（すなわち直橋）の場合の寸法を示す。また、**写真－１**は、タイプＢ－１、Ｂ－２の外観である。これらの模型はすべて、一部に規定より薄い板を用いているほかは、実際の橋梁と同様の手順により製作されている。

表－２　模型の諸元

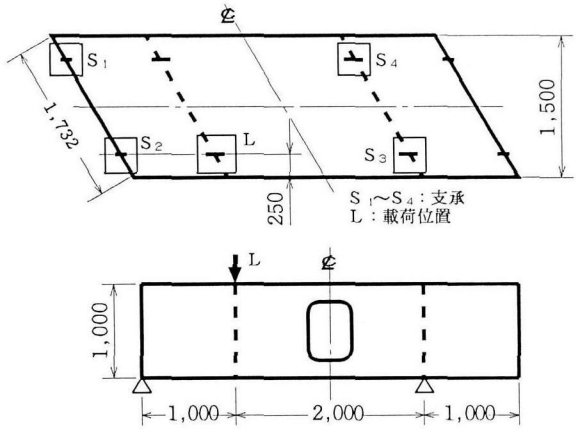
	Ａ－１ Ａ－２	Ｂ－１ Ｂ－２	Ｃ－１ Ｃ－２	Ｄ－１ Ｄ－２
斜　角	９０°	６０°	６０°	６０°
補剛材断面	75×6㎜	75×6㎜	60×6㎜	75×6㎜
腹板厚	９㎜	９㎜	９㎜	4.5㎜

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S_2側のものを、載荷側側パネルと言うことがある。

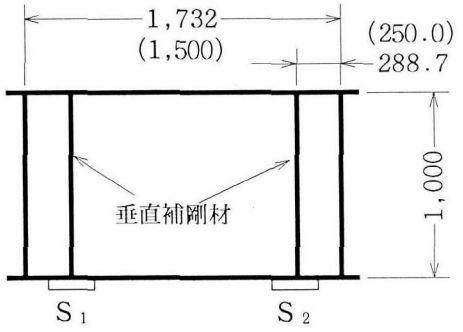
本論文では、特に斜角が支点上ダイヤフラムの挙動に及ぼす影響に注目し、これら４種類８体の模型のうち、主としてタイプＡとタイプＢの２種類４体についての実験結果を報告する。



写真－１　実験用模型



（ａ）平面図及び側面図



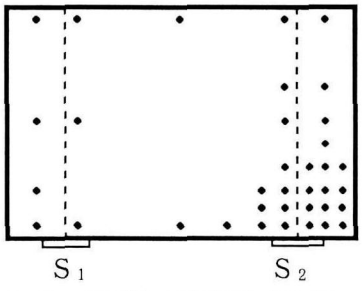
（ｂ）支点上ダイヤフラム

図－２　模型の概略図

２－２　ひずみ、変位等の測定

図－３は、この実験における支点上ダイヤフラムのひずみ測定位置を示している。この図では、右側が斜橋の鈍角側であり、縦の破線の位置が支点上補剛材、それらの直下に支承が配置されている。図中の黒丸●の位置に

は、板の両面に3軸のロゼットゲージが貼付されている。図からわかるとおり、この実験では、大きな支点反力が予想される支点 S_2側により多くのゲージを配置している。図には示していないが、このほか、支点 S_2側（鈍角側）の支点上ダイヤフラムに接した腹板パネルにも若干の3軸ゲージを配置したほか、支点上補剛材には1軸のゲージを配置している。これらのゲージはいずれも大ひずみゲージである。



図－3　ひずみ測定位置（ダイヤフラム）

変位は、ダイヤフラムの面外変形、次節に述べる載荷点、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支点すべてにおいて支点の沈下を測定した。これらの変位の測定は、模型桁の支持装置外に設けた不動点を基準としている。

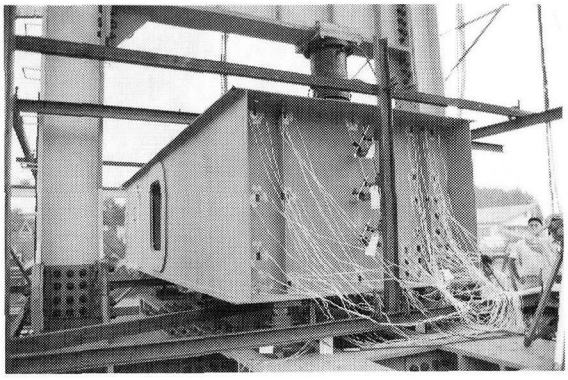
これらの変位の測定は、いずれもひずみゲージ式変位計によっているが、変位計を設置していない部分の面外局部変形を記録するため、適宜、立体写真を併用することとしている。

このほか、支点上ダイヤフラム、及び支点上ダイヤフラムに接している鋭角側の腹板については、ノギスにより、載荷前に面外初期たわみを、実験終了後に面外残量変形を測定している。

2－3　載荷装置・載荷方法および支持装置

載荷装置は、**写真－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、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－2(a)** に文字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、模型の各支点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、支点では、鉛直方向には拘束していない。ただし、タイプBの模型では支点 S_4 で負反力が予想されるため、2体の模型のうち1体（タイプB－1）について、S_4 で上下に拘束し、その影響を調べた。そのため、支点 S_4では圧縮・引張両用のロードセルを用いている。



写真－2　載荷装置等

実験中は、つねに、これら荷重や反力、載荷位置における桁のたわみやダイヤフラムの面外変形の大きさをモニターし、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。

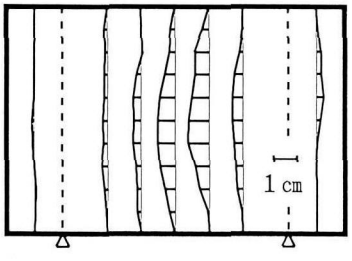
3．実験結果

3－1　初期たわみ

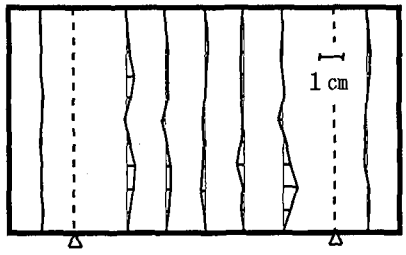
図－4、**図－5**に、例としてタイプA－1とタイプB－1の、支点上ダイヤフラムの面外初期たわみの形状を示す。この図では、初期たわみの測定点におけるたわみの大きさを、横方向にプロットしている。A－1の場合、いずれも、多少の凹凸はあるものの、パネルごとにほぼ正弦半波の初期たわみ形状が見られる。A－2についても、最大初期たわみの大きさはA－1より小さいものの、その形状はほぼ正弦半波であった。一方B－1では、ダイヤフラムについては小さな波が複数見られた。

なお、ダイヤフラムと補剛材の取り付け部（図の破線の部分）については、測定が困難であること、そこでの初期たわみは他の部分と比べ小さいと考えられることから、本実験では、測定していない。

ダイヤフラムの最大初期たわみは、A－1、A－2、B－1、B－2それぞれ、約9.4mm(1/106)、約5.1mm(1/196)、約4.6mm(1/217)、3.3mm(1/303)であった。ただし、かっこ内は桁高で無次元化した値である。



図－4　面外初期たわみ（タイプA－1）



図－５　面外初期たわみ（タイプＢ－１）

３－２　支点反力の分配と最大荷重

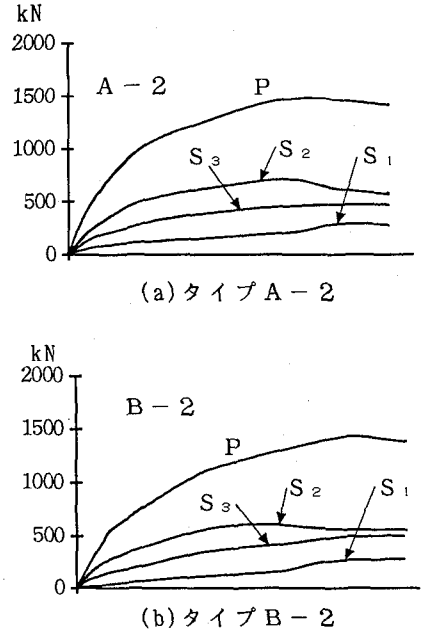
桁の全体としての挙動に注目した場合、直橋と斜橋の違いは、各支点に対する反力の分配、すなわち各支点ごとの反力の大きさの違いとして観察される。**図－６**は、タイプＡ－２とＢ－２の、荷重とS_1～S_3の３つの支点の支点反力の値の変化をプロットしたものである。図中の文字Ｐで示した曲線は荷重の変化を、S_1～S_3で示した曲線はそれぞれ支点S_1～S_3における支点反力の大きさの変化を表している。この図の横軸は、実験中の載荷の段階であり、横軸の大きさ自体には物理的な意味はないが、荷重や各支点反力の大きさをの推移を比較するため、このかたちで示した。なお、これら二つのモデルとも、支点S_4についてはその反力は小さく、この図では横軸とほとんど一致している。

この図によると、タイプＡ－２の場合、最大荷重付近までは、支点S_1～S_3の反力は、荷重の増加とともに、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、S_2の反力がわずかながら減少に転じているとともに、S_1に増加傾向が見られる。すなわち、支点S_2は最大荷重の前後で支点反力に耐えられなり、その分をS_1が負担したと考えられる。

一方タイプＢ－２の場合、支点S_2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、S_2の反力はむしろわずかながら減少している。それに対し、支点S_3の反力は、後半の段階で、最高荷重をすぎても増加しており、最終の段階ではS_3の反力はS_2のそれとほぼ同じ値となっている。すなわち、斜橋であるＢ－２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。

図には示していないが、タイプＡ－１の場合、支点反力の大きさの変化については、おおむねタイプＡ－２と類似の傾向が得られている。

タイプＢ－１についても、概略ではタイプＢ－２と類似の傾向が見られたが、このモデルでは支点S_4を鉛直方向に拘束したため、S_2の反力が減少に転じて以降、その支点に負反力が発生したほか、最終段階近くでは、支点S_3の反力がS_2のそれを上回った。なお、このタイプＢ－１では、後に示す荷重変形曲線からわかるように、最終段階に至っても荷重Ｐは減少に転じていない。このモデルでは、支点S_2の反力が最大に達した前後からダイヤフラムの支点付近に後述するような局部変形が観察されたこと、支点S_3の反力がS_2のそれを上回り、荷重の増加につれさらにその傾向が強まることが予想されたことから、支点上ダイヤフラムに注目した実験の目的は達成されたと判断して載荷を中止している。そのため、このモデルでは、桁としての最大荷重は求めていない。



図－６　荷重と支点反力

表－３　最大荷重と支点反力

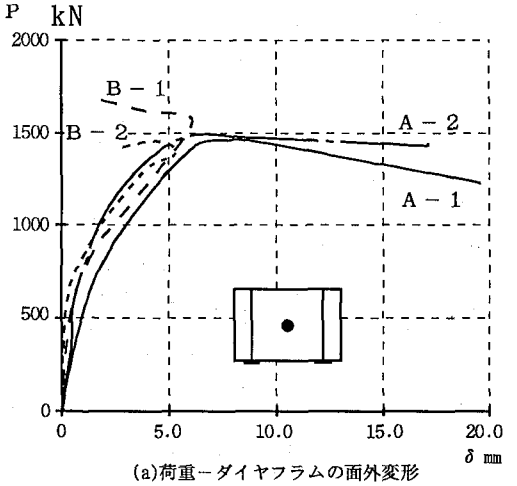
タイプ	モデル名	最大荷重(kN)	最大反力(kN)
A	A－1 A－2	1433 1450	701 695
B	B－1 B－2	(1640) 1409	646 600

実験により得られた各モデルごとの桁としての最大荷重（Ｂ－１の場合は最終段階での荷重の大きさ）と、支点S_2における最大の支点反力は、**表－３**に示すとおりである。条件の同じＡ－１とＡ－２では、最大荷重、支点反力ともその差は１％程度であり、ほぼ同じ結果が得られたと言える。支点の条件がこれらのモデルと同じである、斜橋のタイプＢ－２では、桁としての最大荷重は1,409kNであり、Ａ－１やＡ－２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600kNとなっている。負反力に対して支点S_4を鉛直に拘束

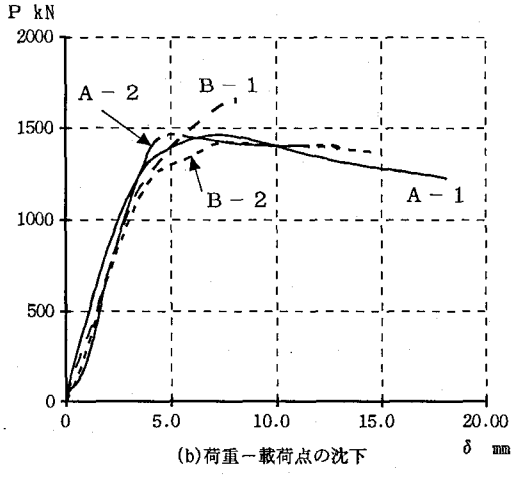
したタイプＢ－１の場合、支点Ｓ$_2$の最大反力は、Ｂ－２より約８％大きいが、直橋のＡ－１やＡ－２と比較すると８％程度小さい。

３－３　荷重変形曲線

図－７は、この論文で取り上げた２タイプ４つのモデルＡ－１、Ａ－２、Ｂ－１、Ｂ－２の、荷重と支点上ダイヤフラムの面外変形、および荷重と載荷点の桁のたわみの関係を図示したものである。一方、**図－８**は、同じくこれらの模型の、支点Ｓ２における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（**図－３**の右下部）の沈下量の関係を示している。これらの図の横軸には、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。またダイヤフラムの面外変形は、ダイヤフラム中央パネルの中央点で測定した値である。図中の黒丸は計測位置を示す。



(a)荷重－ダイヤフラムの面外変形

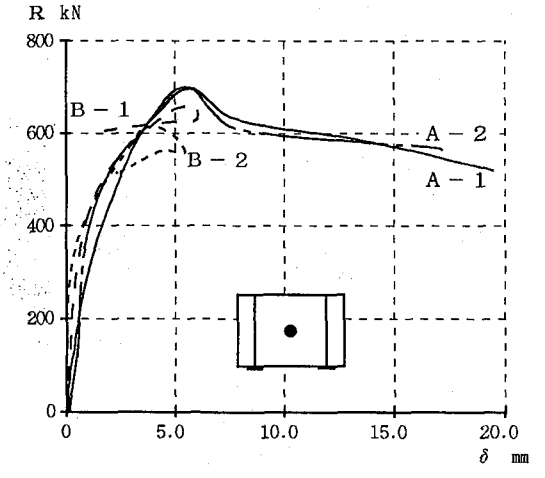


(b)荷重－載荷点の沈下

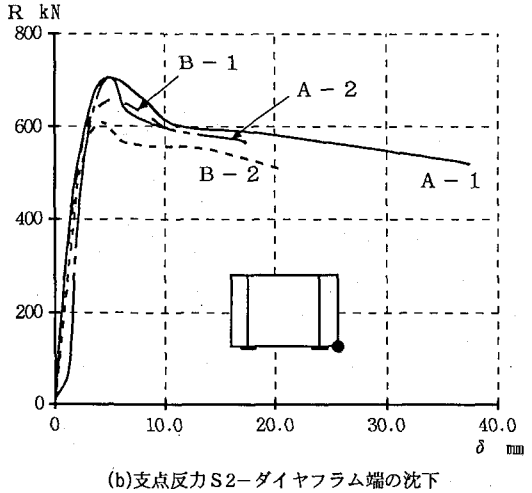
図－７　荷重－変形曲線

図－７(a)および**図－８(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、荷重がおおむね1000kNを超えると変形の増加率が大きくなっている。

しかし、前述のように、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、これらの図では、斜橋であるＢ－１およびＢ－２は直橋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、**図－７**に示す荷重との関係では、最大荷重の以前にダイヤフラムの変形は減少に転じている。また、**図－８**に示す支点反力に対しては、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り、支点Ｓ$_2$の反力の大きさは載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。



(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－８　支点反力（Ｓ$_2$）－変形曲線

一方、**図－７(b)** を見ると、桁としての荷重の大きさと桁のたわみの関係は、Ｂ－１を除き、おおむね、互いによく似た傾向を示すと考えて良いと思われる。すなわ

ち、Ｂ－１を除く各モデルでは、その最大荷重近くまで、桁のたわみはほぼ荷重に比例して増加している。最大荷重近くでは、たわみの増加がやや加速され、最大荷重後は、荷重が緩やかに減少するにつれてたわみが急速に増加している。この図を見ると、斜橋であるＢ－２では、Ａ－１やＡ－２に比べ、やや低い荷重段階からたわみの増加が加速されているようである。

図－８(b) の、支点反力とダイヤフラム端の沈下の関係は、載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、Ｂ－１を含むすべてのモデルで、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。なお、この実験の結果得られたダイヤフラムの変形が、過去に著者らが行った解析結果と類似していることから、このことは、実験・解析を通じて言えるものと思われる。

３－４　ダイヤフラムの変形

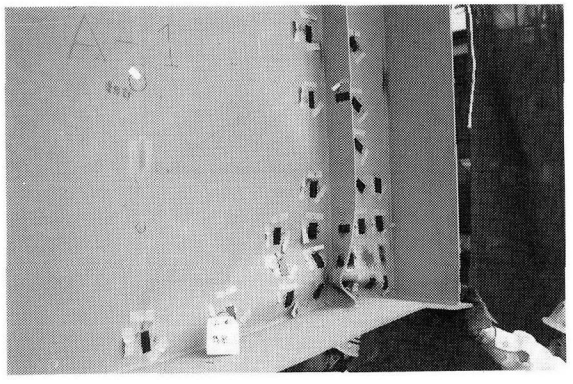
直橋の支点上ダイヤフラムの崩壊を扱った文献 14)、あるいは斜橋の支点上ダイヤフラムの崩壊を扱った文献 16)、17) によると、ダイヤフラムパネルには、崩壊時に支点付近で局部的な面外変形の波が現れ、また、支点上補剛材はねじれ座屈的な挙動を示すことが、解析により予想されている。

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 S_2側支承近傍の残留変形を示している。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。S_2 上の補剛材も、その下部で大きく変形している。写真からのみでは明確ではないが、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。本論文中では示していないが、タイプＡ－２についてもほぼ同様の変形が観察されている。また、支点 S_4 における負反力の扱いが異なるタイプＢ－１でも、変形量はやや小さいものの、これらとほぼ同様の変形が見られた。

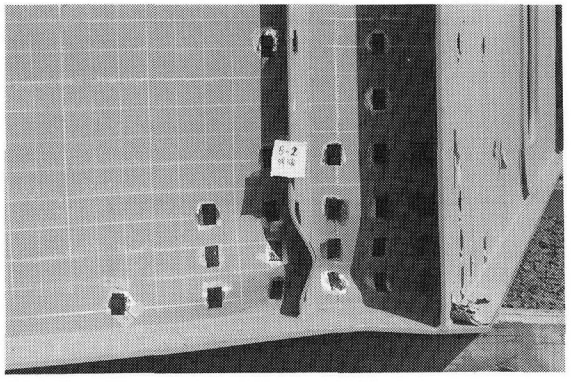
支点上補剛材のねじれの方向は、Ａ－１とＡ－２、Ｂ－１とＢ－２がそれぞれ同じであり、タイプＡとタイプＢではねじれの方向は逆であった。

図－９に、４体すべての模型の局部変形の発生位置の詳細を示している。この図は、支点 S_2 近傍のダイヤフラムの面外変形の発生位置をプロットしたもので、図中の実線又は破線の曲線が、面外変形の山（凸）または谷（凹）の位置を表している。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。

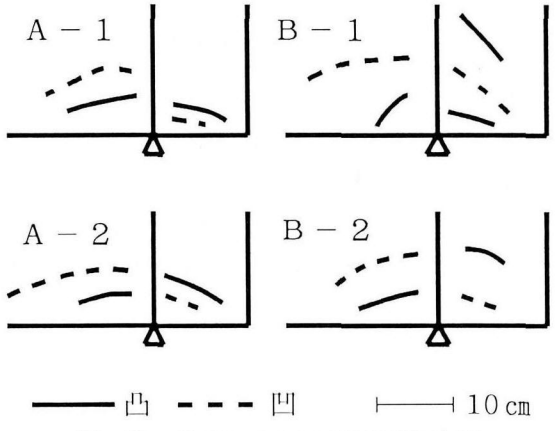
これらの変形は、いずれも最高荷重に達する前にはほとんど観察されず、**図－７、８**の荷重－変形曲線がピークに達する前後に突然現れた。このことから、ダイヤフラムの強度はこれらの局部変形に支配されていると考えられる。



写真－３　ダイヤフラムの残留変形（タイプＡ－１）



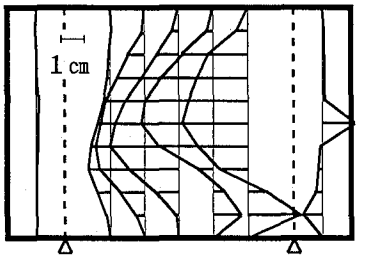
写真－４　ダイヤフラムの残留変形（タイプＢ－２）



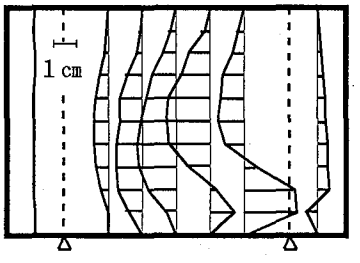
図－９　ダイヤフラムの局部残留変形

一方、**図－１０、図－１１**は、これらの模型の、ダイ

ヤフラムパネル全体にわたる面外残留変形を、**図－４**、**図－５**と同様にプロットしたものである。この図は、ダイヤフラムパネル全体の面外変形のようすを知るために、１０cm間隔（タイプＢの水平方向には11.5cm間隔）で測定したもので、支点付近のように小さな凹凸が現れる部分の変形は、十分には表現していないことに注意されたい。

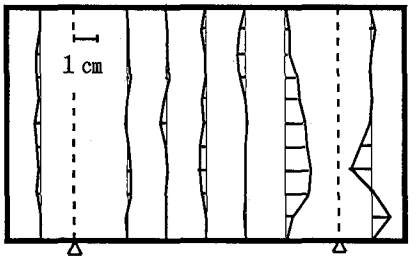


(a)タイプＡ－１

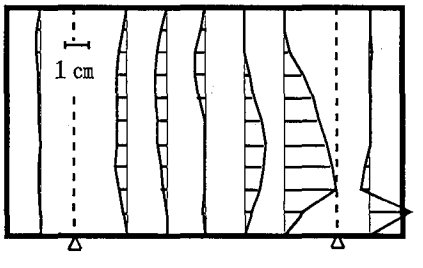


(b)タイプＡ－２

図－１０　ダイヤフラムの残留変形（タイプＡ）



(a)タイプＢ－１



(b)タイプＢ－２

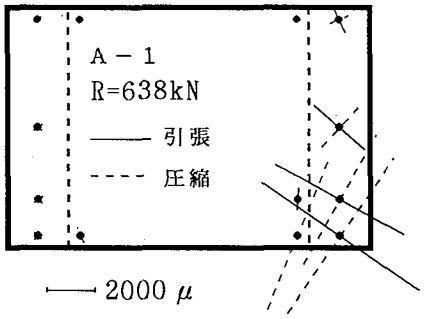
図－１１　ダイヤフラムの残留変形（タイプＢ）

タイプＡの２体では、いずれも、ダイヤフラムの中央パネル中央付近で初期たわみの方向に大きな変形が見られる。支点付近の局部変形を別にすると、タイプＡでは、中央パネルの変形はほぼ一つの半波からなっている。一方、タイプＢの２体では、パネル中央部分の変形はタイプＡよりもかなり小さい。パネル中央点における残留変形の大きさは、Ａ－１、Ａ－２でそれぞれ21.5mmと15.1mmであったのに対し、Ｂ－１、Ｂ－２ではそれぞれわずか1.1mmと0.1mmであった。これは、斜橋の場合、直橋よりも早い段階で支点付近が限界に達したためと思われる。

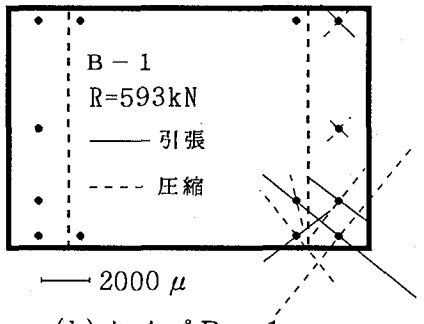
これらの図の右下の部分には、いずれのモデルも支点付近の局部変形に伴う変形が見られる。このパネル右下部分の変形の方向は、パネル中央部とは逆になっている。

３－５　ダイヤフラムのひずみ

図－１２は、タイプＡ－１、Ｂ－１の、実験で測定された、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、支点S_2の反力が、Ａ－１で638kN、Ｂ－１で593kNの場合のもので、いずれも支点S_2の反力が最大値に達する直前のものである。なお、これらの主ひずみは、ダイヤフラムの表面および裏面で測定されたひずみの平均値として求めた、ダイヤフラム中央面における値である。



(a)タイプＡ－１

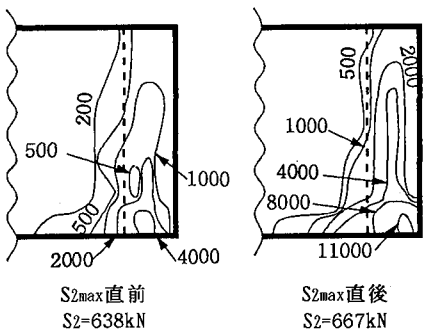


(b)タイプＢ－１

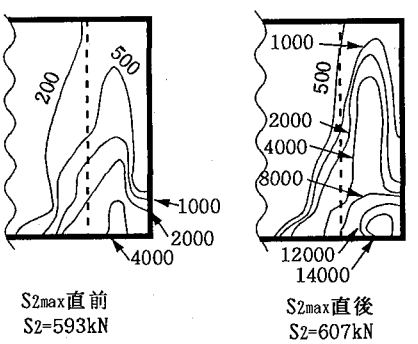
図－１２　ダイヤフラムの主ひずみ分布

この図を見ると、直橋、斜橋いずれの場合も、S_2側の側パネル下部で大きなひずみが現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支点S_2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。

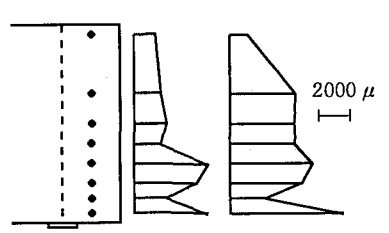


(a)モデルA－1

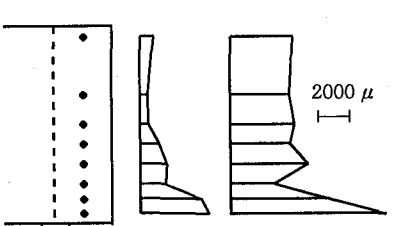


(b)モデルB－1

図－13　相当ひずみの分布（×10^{-6}）



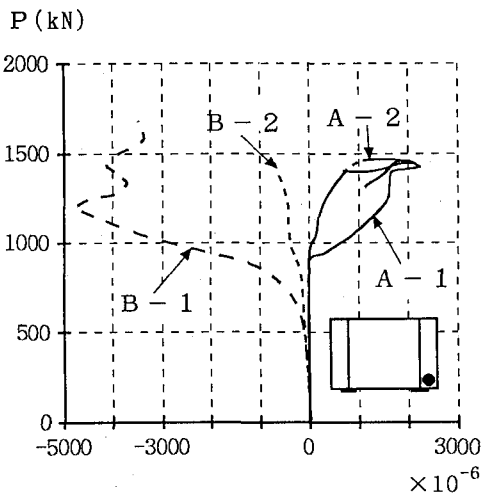
(a)モデルA－1



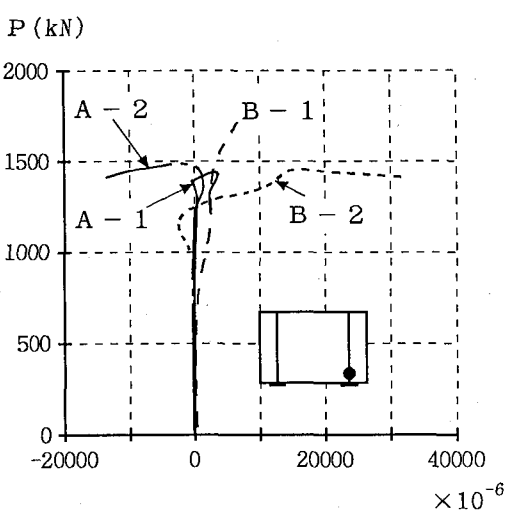
(b)モデルB－1

図－14　側パネルのひずみ分布

図－13には、モデルA－1、A－2のダイヤフラムの、支点S_2付近における相当ひずみの分布を、等高線の形で示す。これらの相当ひずみは、ひずみゲージにより測定されたひずみから求めたものであり、いずれも、図の左側がS_2における反力が最大値に達する直前のもの、左側が最大値に達した直後のものである。なお、測定点の数の関係上、この等高線は、細部まで十分に正しいとは限らない。これらの図では、いずれも、主ひずみ分布と同様に、側パネル下部に大きなひずみが見られる。最大反力に達する前は、このパネル下部のひずみの大きさは直橋・斜橋ともほぼ同じであるが、最大反力後は、斜橋では、大きな相当ひずみが見られる。



(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－15　支点付近の曲げひずみ

図－14は、側パネルのせん断ひずみの大きさを、モデルA－1、B－1について示したものである。この図では、側パネル中央線に沿って配置されたゲージの測定値より求めた値を、横方向にプロットしている。いずれも、S_2の支点反力が最大となる直前では、パネル下部に大きなせん断ひずみが見られるが、最大反力直後には、パネル上部のひずみも大きな値となっている。

一方**図－15**は、S_2側側パネルの中央下端より12.5

cmの位置、およびS_2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の、荷重との関係をプロットしたものである。この図の曲げひずみは、表・裏の両面で測定されたひずみの差の1／2として求めている。

図－15(a) を見ると、タイプAの2つのモデルでは、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1,000kN 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、斜橋であるタイプBのモデルでは、500kN 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－15(b)** の補剛材下部の曲げひずみは、タイプAの場合、最大荷重のちか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 700 kN付近から、B－2で1,000kN 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。

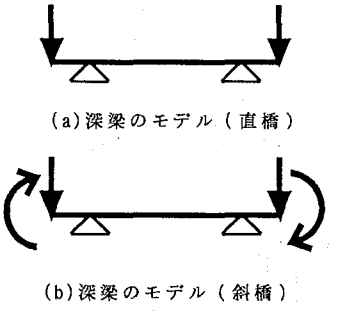
4．実験結果に対する考察

この実験の結果、直橋であるタイプA－1、A－2、斜橋であるB－1、B－2の、この論文で取り上げたすべてのモデルについて、支点上ダイヤフラムは、S_2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、ダイヤフラムパネルでは、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S_2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、支点上ダイヤフラムの崩壊は、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、著者らがこれまでに行ってきた数値解析による研究[14) 16) 17)] の結果と極めて類似している。従って、著者らが14)16)17) などで指摘しているように、支点上ダイヤ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。

実験により得られた、桁としての最大荷重は、条件の同じA－1とA－2ではほぼ同じであったが、タイプBでは、条件により大きく異なっている。しかし、支点上ダイヤフラムの強度は、桁に作用する荷重の大きさではなく、むしろ、そのダイヤ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S_2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、一つの支点で支持しうる反力は直橋の場合に比べ小さいことになる。

直橋であるA－1、A－2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。支点S_4を鉛直方向に拘束したB－1の場合、桁としての最大荷重は他のモデルよりも大きかったものの、この荷重増加は、支点S_2の反力が減少に転じた後は、S_1やS_3の反力の増加により負担されていた。支点S_3の反力は最終的には684kNに達しており、これはS_2の反力の最大値を上回っている。この実験では、支点S_1とS_2があるダイヤフラムに注目しており、模型の設計では、載荷桁部分の支点上ダイヤフラムの崩壊が先行しないよう、S_3のある断面はかなり剛にしている。この支点S_3のある支点上ダイヤフラムの剛性が注目断面のそれと同じであれば、S_3の支点もS_2と同様に崩壊したものと推測される。

また、ダイヤフラムの崩壊に密接に関連していると思われる支点付近の局部変形は、斜橋の場合、直橋より早い段階から発生している。一般に、直橋の場合、支点上ダイヤフラムはしばしば**図－16(a)**に示すような deep beam にモデル化され、腹板から主としてせん断力を受ける。ところが、斜橋では、ダイヤフラムは、せん断のほか、面内曲げなど複雑な力を腹板から受けていると考えられる。例えば、斜橋のダイヤフラムは、せん断力に加え、腹板の曲げ（桁としての曲げ）に伴い**図－16(b)**のようなモーメント荷重も受けることになる。このことが、早い段階からダイヤフラム下部に変形が発生することに関係していると推測されるが、その詳しいメカニズムは現在のところ不明である。



(a)深梁のモデル（直橋）

(b)深梁のモデル（斜橋）

図－16　ダイヤフラムの受ける力のモデル

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渡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。支点上ダイヤフラムの崩壊は、支点付近の局部変形に依存しており、ダイヤフラムの中央部分の面外変形は崩壊とは直接の関係を持たない。特に斜橋の場合、ダイヤフラム中央部の面外変形は、最大荷重、あるいは最大反力に達する前後から減少の転じており、斜橋におけるダイヤフラム中央部の残留変形

はわずかであった。これは斜橋の場合、支点付近の崩壊が早く進み、反力の再配分が早い段階で行われたためと思われる。

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など[12)14)-17)]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、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。

5．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

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、

などのことが挙げられる。また、直橋、斜橋を通じ、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こともわかった。

ここで報告した内容については、今後、有限要素法による数値解析なども行い、さらに検討を加える予定である。また本論文では、著者らが行った一連の実験の結果うち、特に斜橋と直橋の比較に絞って報告した。この他の実験の結果については、別の機会に報告する。

謝辞

この実験は、㈱宮地鐵工所松本工場実験室において実施されたものであり、実験にあたっては、同実験室の方々を始め、同工場の多くの皆様に多大のご協力を頂きました。また、信州大学大学院の福永悦男、同工学部卒研生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。

本研究で用いた実験用模型は、㈱宮地鐵工所千葉工場で念入りに製作されたものであります。同工場の関係の方々にも、併せて感謝いたします。

参考文献

1) Dowling, P. J., Loe, J. A. and Dean, J. A. : The Behaviour up to Collapse of Load Bearing Diaphragms in Rectangular and trapezoidal Stiffened Steel Box Girders, Steel Box Girder Bridges, Proc. Intl. Conf., ICE, London, 1973, pp. 95-117

2) Dowling, P. J. : Strength of Steel Box Girders, Proc. ASCE, 101, ST9, 1975, pp. 1929-1944

3) Rockey, K. C. and El-Gaaly, M. A. : Stability of Load Bearing Trapezoidal Diaphragms, Publ. IABSE, 32-II, 1972, 155-172

4) El-Gaaly, M. A. : Stability of Orthogonally Stiffened Load Bearing Trapezoidal Diaphragms, Publ. IABSE, 34-Ⅱ, 1974, pp. 73-89

5) The Committee on Inquiry into the Basis of Design and Erection of Steel Box Girder Bridges : Interim Design and Workmanship Rules (IDR), Her Majesty Stationery Office, London, 1973

6) Puthli, R. S and Crisfield, M. A. : Strength of Stiffened Box Girder Diaphragms, TRRL Supplementary Report 353, Structural Department, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, 1977

7) Crisfield, M. A. : A Combined Rayleigh-Ritz/Finite Element Method for the Non-Linear Analysis of Stiffened Plate Structure, Computers and Structures, 8, 1978, pp. 678-689

8) ECCS TWG 8.3 : Behaviour and Design of Steel Plated Structures, ed. P. Dubas and E. Gehri, Applied Statics and Steel Structures ETH-Hönggerberg, Zurich, 1986

9) Megson, T. H. G and Hallak, G : Optimum Design of Load-Bearing Box Girder Diaphragms Having Supports at a Distance From the Flange/Web Junctions, Thin-Walled Structures, 22, 1995, pp. 275-289

10) Megson, T. H. G and Hallak, G : Optimum Design of Load-Bearing Box Girder Diaphragms Having a Central Support, Thin-Walled Structures, 22, 1995, pp. 203-215

11) 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，No.276，1978, pp. 13-23

12) 福本啸士、清水　茂、古田秀博：鋼箱桁支点上ダ

イヤフラムの強度に関する実験的研究，土木学会報告集，No.318，1982，pp.149-161
13) 金原慎一、清水　茂、吉田俊彌：連続箱桁の中間支承上ダイヤフラムの座屈強度評価に関する一考察，土木学会第35回年次学術講演会概要集，1980，pp.291-292
14) Shimizu, S. : An Elasto-plastic Large Deflection Analysis on Steel Box Girder Support Diaphragms, Jour. Constructional Steel Research, 1995, pp.191-206
15) 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
16) Kimbara, S. and Shimizu, S. : Elasto-plastic Large Deflection Analysis of End Support Diaphragms in Skew Steel Box Girders, Jour. Constructional Steel Research, 32, 1995, pp.173-190
17) 金原慎一：斜橋の支点上ダイヤフラムの挙動と鋼床版の疲労強度に関する基礎的研究，信州大学学位論文，1994.3

（１９９５年９月１８日受付）