

帯状トラス材を有するサンドイッチ版の静的耐荷性状

Static bearing characteristics of steel-concrete composite sandwich slab with flat plate truss stiffers

北海道開発土木研究所
北海道開発土木研究所
北海道開発土木研究所
北海道開発局旭川開発建設部

○正 員 池田憲二(Kenji Ikeda)
正 員 今野久志(Hisashi Konno)
正 員 皆川昌樹(Masaki Minakawa)
濱中昭文(Akifumi Hamanaka)

1. まえがき

旭川開発建設部は重力式コンクリートダムの管理用橋梁として、鋼・コンクリート合成サンドイッチ床版橋の採用を予定している。予定されているサンドイッチ版は、10mmの上鋼板と9mmの下鋼板の間に幅100mm、厚さ9mmの平鋼をトラス状に曲げ加工したものを挟み込んだ鋼殻を工場製作し、現場架設の後、上下鋼板間に高流動コンクリートを打設し、完成させるものである。総厚は319mmで桁高を低く抑えたこと、および、一般道路交通に供するのではなくダム堤体の管理橋であることから、上下鋼板間に従来のボルトを使った構造ではなく、平鋼を使った簡易な構造により一層のコスト削減を図っている。

現場架設はトラッククレーンで鋼殻を設置し、コンクリート打設前にその上をトラッククレーンが走行して鋼殻の設置を続けるため、鋼殻を吊り下げたトラッククレーンの輪荷重によるコンクリート打設前の上鋼板またはトラス材の座屈耐力が施工計画を支配する。そこで、北海道開発土木研究所は施工時および完成時の基本的な静的耐荷性状について実験を行ったので、ここに報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体

実験に使用した試験体は、上鋼板と下鋼板との間に複数の山部と谷部を交互に形成した平鋼（以後、帯状トラス材）を配置し、山部を上鋼板に、谷部を下鋼板にボルト、ナットを用いて緊結したトラス構造のサンドイッチ版である。

表-1には、実験ケース一覧を示している。実験は小型中空試験体による帯状トラス材の静的座屈強度の確認実験（2体）と大型中空および大型充実試験体による静的耐力確認実験（各1体）の全4ケースである。実橋は支間15mの3径間連続版が4連あり、A活荷重

で設計されている。試験体は実橋と同じ断面諸元（材質、総厚、上下鋼板厚、帯状トラス材の間隔・幅・厚さ）を持つが、試験装置の関係から縦、横の寸法は短くなっている。図-1に小型中空試験体の形状寸法図を、また写真-1に大型試験体の全景を示す。いずれの試験体も、上鋼板の厚さが10mm、下鋼板および帯状トラス材の厚さが9mmである。帯状トラス材の山部～山部あるいは谷部～谷部の間隔および橋軸直角方

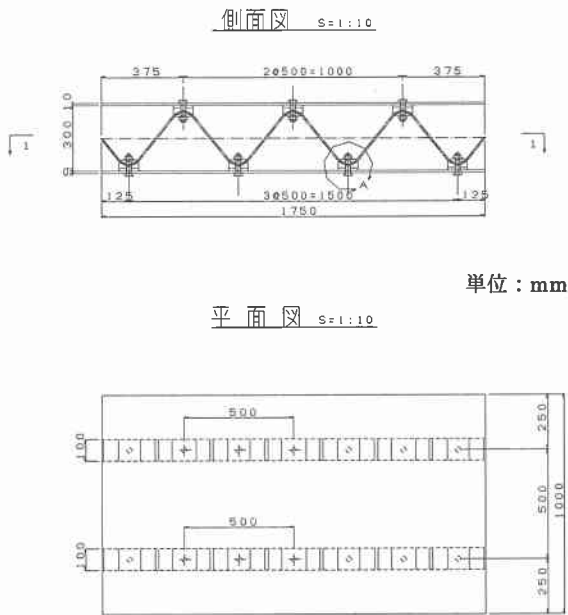


図-1 小型中空試験体の形状寸法

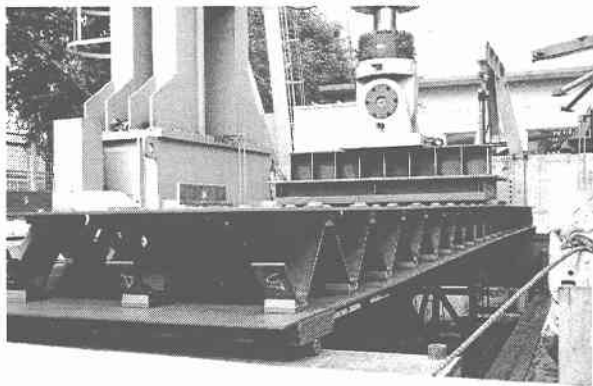
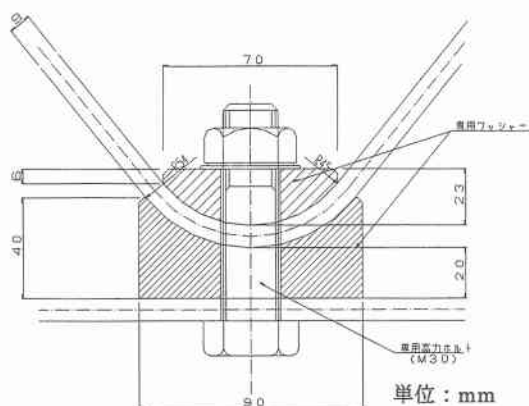


写真-1 大型中空試験体全景

表-1 実験ケース一覧

試験体		断面	寸法 (mm) 幅×長さ	実験内容
小型	No.1	中空	1,000×1,750	静的耐荷性状および 終局破壊形態の確認
	No.2			
大型	No.3	中空	2,200×10,500	
	No.4	充実		



図－２ 専用ワッシャーの形状寸法

向の配置間隔はともに 500mm である。また上下鋼板と帯状トラス材の接合部は、図－２に示すように帯状トラス材の形状に合わせた専用ワッシャーを用い高力ボルト（M24～M30）により緊結されている。上下鋼板とコンクリートの一体化は、鋼板に設置した専用ワッシャーが突起として作用し、鋼板とコンクリートとの境界に発生するせん断力に抵抗するものとしている。すなわち、帯状トラス材を鋼板に止めている高力ボルトをスタッドとして評価している。大型充実試験体では、作用せん断力の大きい端部に対して高力ボルトのサイズアップ（M30）を行うと共に、さらにせん断耐力の不足分に対してはスタッドジベルを配置している。

表－２には、試験体を使用した鋼材の特性値を示している。上鋼板および帯状トラス材の材質はいずれも SS400、下鋼板は SM490 である。また大型充実試験体の中詰コンクリートは普通ポルトランドセメントを用いた増粘剤系の高流動コンクリート（設計基準強度 30MPa）であり、実験時における圧縮強度は 35.6MPa、弾性係数が 24.4GPa、ポアソン比が 0.189 である。

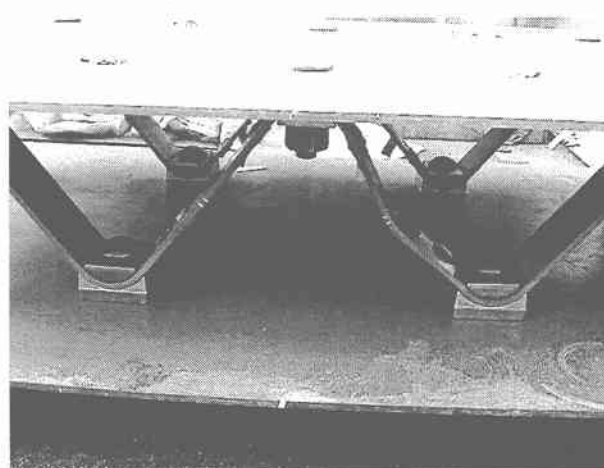
2.2 実験方法

実験は、いずれの試験体に対しても静的最大荷重 3MN の油圧サーボ試験機を用いて行った。載荷は変位制御で行い、小型および大型中空試験体については帯状トラス材および上鋼板が完全に座屈し除荷状態となるまで、また大型充実試験体については下鋼板が降伏し荷重が増加せず変形のみが進行する状態で実験を終了している。

小型中空試験体は、支点部に補強鋼板と丸鋼（φ 50mm）を溶接し純スパン長 1.5m で単純支持している。大型中空および充実試験体については、支点部の構造を小型試験体と同様とし、純スパン長 10.0m で単純支持している。小型中空試験体は、H 型鋼とボルト部を穴あけした幅 150mm、厚さ 22mm の鋼板を介してトラス格点近傍に集中荷重を与えている。大型中空試験体については上述の鋼板をトラス格点上に設置し載荷点間隔 500mm で 2 辺集中荷重を与えている。大型充実試験体については上述の鋼板を中央部に 2 枚並

表－２ 鋼材の特性値

試験体	材質	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)
小型中空	上鋼板 (SS400)	301	428	31
大型中空	下鋼板 (SM490)	515	589	21
大型充実	上鋼板 (SS400)	292	436	33
	下鋼板 (SM490)	479	575	21



写真－２ 実験終了後の小型中空試験体の状況

べ載荷幅 300mm で集中荷重を与えている。

計測項目はいずれの試験体も載荷荷重、試験体各部の変位、鋼材のひずみである。

3. 実験結果

3.1 帯状トラス材の座屈強度

実験では、2 試験体共に鉛直荷重が約 300kN で帯状トラス材の座屈が確認された。写真－２に実験終了後の試験体状況を示す。鉛直荷重 300kN が作用した場合に帯状トラス材の 1 斜材に作用する荷重を静定トラス計算により求めると 98kN となる。この荷重を座屈荷重として帯状トラス材の応力度を求めると 109 N/mm²であった。また、帯状トラス材に貼り付けたひずみゲージの値から計算した座屈応力度の平均は 124N/mm²であった。

次に、オイラーの座屈理論により、両端ヒンジの場合の座屈応力度 σ_{cri} は以下の式で与えられる²⁾。

$$\sigma_{cri} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{A \cdot L^2}$$

ここに、L：座屈長（mm）

I：断面 2 次モーメント（mm⁴）

A：断面積（mm²）

E：ヤング率、E=2.06×10⁵（N/mm²）

座屈長に帯状トラス材の格点間距離を与えて、オイラーの座屈応力度を計算すると 112 N/mm² となり、

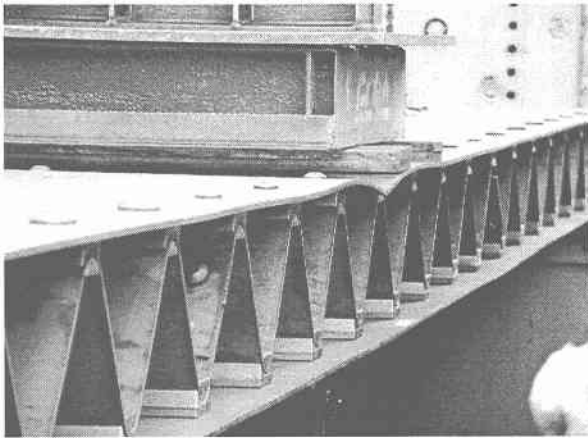


写真-3 実験終了後の大型中空試験体の状況

実験結果の座屈応力度とほぼ一致する。このことから、帯状トラス材の座屈応力度はオイラーの座屈理論で評価可能であることがわかった。

3.2 大型中空試験体による座屈耐力

写真-3には実験終了後の試験体状況を示している。写真より、試験体は荷重点近傍のボルト間の上鋼板が下側凸の状態で座屈しているのが確認できる。図-3には荷重荷重-試験体中央部変位の関係を示している。試験体中央部の変位は荷重荷重に比例してほぼ線形に増加しているが、荷重荷重 310kN 程度から変位量が急激に増加し始め、荷重 319kN で終局に至っている。

図-4は荷重荷重と試験体中央部の下鋼板応力度および座屈発生点より支点側に約 500mm 離れた位置の上鋼板応力度との関係を示している。下鋼板の応力度は荷重荷重に比例してほぼ線形に増加しており、荷重 319kN における応力度は 144N/mm² であり、荷重除荷後も残留応力が発生していないことから、降伏応力に達していないことがわかる。一方、上鋼板の応力度は荷重荷重 250kN 程度まではほぼ線形に増加しているもののそれ以降は荷重点近傍で発生した上鋼板の座屈の影響により急激に引張り側の応力度に転じている。また、実験後に実施した FEM 解析による座屈耐力は 250kN であることから、中空時サンドイッチ版の静的耐力は上鋼板の座屈耐力に支配され、座屈耐力は FEM 解析によって評価可能であることがわかった。

3.3 大型充実試験体による静的曲げ耐力

図-5には荷重荷重と試験体中央部の変位との関係を FEM 解析結果と共に示している。図-5より大型充実試験体は、荷重の増加によりコンクリートにひび割れが発生した後、ボルト部に滑りが生じるまで試験体中央部の変位は荷重荷重にほぼ比例して増加している。ボルト部に滑りが発生した後は荷重荷重の増加に対する変位の増加割合が大きくなり最大荷重 860kN で実験を終了している。実験結果と FEM 解析結果との比較では全断面有効とした場合および引張断面無視とした場合の解析結果の傾きはいずれも実験結果のひびわれ発生前後の結果と一致していることがわかる。

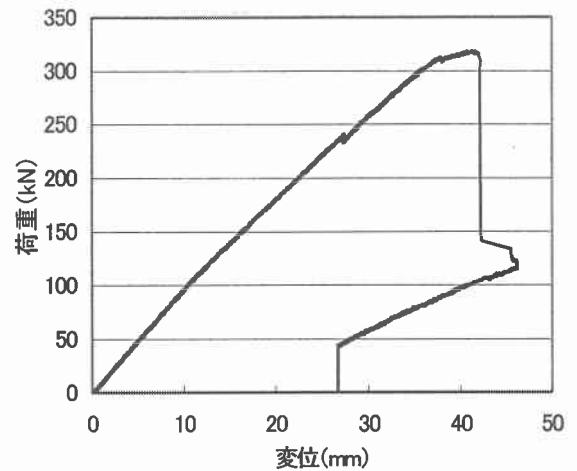


図-3 大型中空試験体の荷重-変位関係

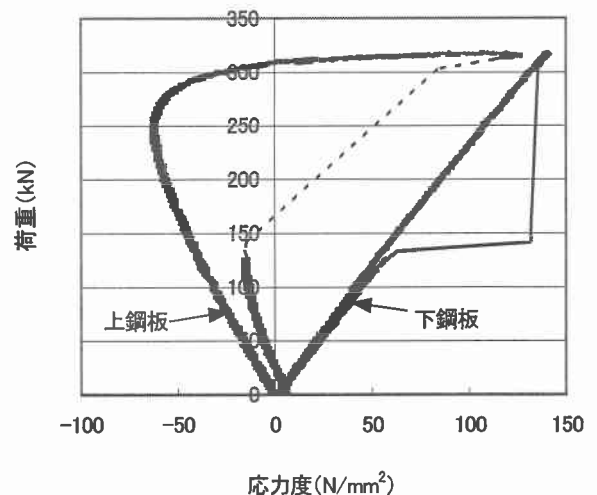


図-4 大型中空試験体の荷重-鋼板応力度関係

図-6には荷重荷重と下鋼板の応力度との関係を FEM 解析結果と共に示している。図-6より下鋼板は荷重荷重 840kN、応力度 394N/mm² で降伏していることがわかる。FEM 解析結果との比較ではひび割れ発生までの勾配は全断面有効とした解析結果と実験結果はよく一致しているもののひび割れ発生以降については引張断面無視とした場合の解析結果と実験結果は一致しておらず実験結果の勾配が小さく示されている。

表-3には実験結果によるコンクリートのひび割れ発生荷重、ボルトに滑りが発生した時点の荷重、下鋼板の降伏荷重と各荷重段階における試験体中央部の変位、上下鋼板の発生ひずみおよび応力度を示している。これらの値を用いて全断面有効時およびコンクリートの引張断面無視時について、以下に示す2種類の方法によって断面二次モーメントの算出を行った。

① 実験から求められた荷重と変位より算出する場合

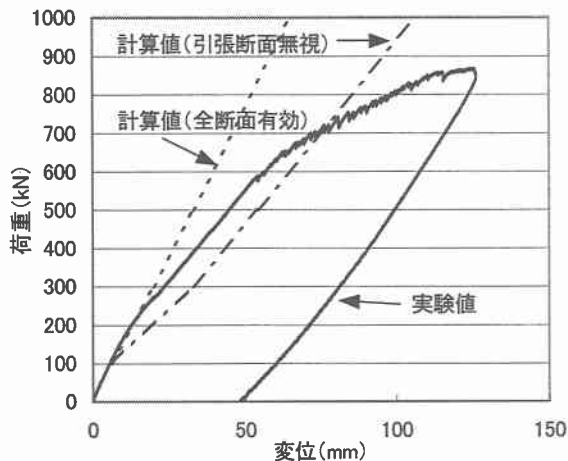
$$I_{01} = \frac{PL^3}{48E\delta}$$

ここで、P：荷重 (N)

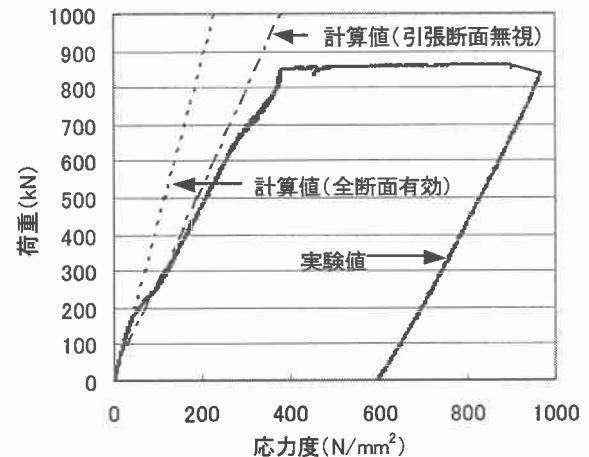
L：スパン長 (mm)

表－3 大型充実試験体の実験結果一覧

試験体の状態	荷重 (kN)	変位 (mm)	下鋼板		上鋼板	
			ひずみ	応力	ひずみ	応力
			(μ)	(N/mm ²)	(μ)	(N/mm ²)
ひび割れ発生	113.7	6.5	125	25.7	-116	-24.0
ボルト滑り発生	585.1	53.9	1220	251.2	-663	-136.6
下鋼板降伏	840.9	110.6	1915	394.3	-993	-204.5



図－5 大型充実試験体の荷重－変位関係



図－6 大型充実試験体の荷重－下鋼板応力度関係

E：鋼材の弾性係数 (N/mm²)

δ ：変位量 (mm)

- ② 実験により求められた荷重と下鋼板のひずみより算出する場合

$$I_{02} = \frac{(PL/4) \cdot y}{E\epsilon}$$

ここで、P：荷重 (N)

L：スパン長 (mm)

y：試験体下縁から中立軸までの距離 (mm)

E：鋼材の弾性係数 (N/mm²)

ϵ ：鋼板のひずみ

上記により求められた断面二次モーメントの計算結果と試験体材料の実弾性係数比により RC 断面として求めた理論値を表－4に示す。この結果より計算値と理論値の比はいずれも 1.0 以上の値を示しており、本サンドイッチ版は従来から行われている RC 計算を適用可能であることが明らかとなった。

4. まとめ

帯状トラス材を有するサンドイッチ版の床版橋への適用を考慮し、各種試験体を用いた静载荷実験を実施した。

本研究により得られた結果を要約すると以下のとおりとなる。

- 1) 帯状トラス材の座屈応力度は 110N/mm²程度であることが実験より確認された。この応力度はオイ

表－4 断面二次モーメントの計算値と理論値

計算方法	計算条件	弾性係数比	計算値* ×10 ⁶ mm ⁴	理論値** ×10 ⁶ mm ⁴	*/**
①	全断面有効	8.4	1,759	1,576	1.12
	引張断面無視		1,007	997	1.01
②	全断面有効	8.4	1,761	1,576	1.12
	引張断面無視		1,078	997	1.08

ラーの公式により座屈長を帯状トラス材の格点間距離とし、両端ヒンジの条件で算定可能である。

- 2) 大型中空試験体の終局破壊形態は上鋼板の座屈であり、座屈耐力は FEM 解析で推定可能である。
- 3) 大型充実試験体の終局破壊形態は下鋼板の降伏であり、RC 計算によって静荷重載荷時の設計が可能である。

今後は、帯状トラス材の配置を千鳥配置とした場合の効果の確認、仮設方法および中空断面時の座屈防止対策、コンクリート充填後の疲労耐久性等について検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 近藤千秋ほか：ハーフプレハブ化した鋼合成サンドウィッチ床版、第4回複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集、1999.11
- 2) 渡辺昇：橋梁工学 p159、朝倉土木工学講座 11