

(43) 鋼・コンクリート合成サンドイッチ頂版を使用した複合構造函渠の研究開発

小野辺 良一¹・今野 久志²・三田村 浩³・吉村 和真⁴

¹正会員 石川島建材工業株式会社 土木・建築事業本部 (〒100-0006 東京都千代田区有楽町1-12-1)
E-mail:ryouchi_onobe@ikk.co.jp

²正会員 独立行政法人北海道開発土木研究所 構造部 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号)
E-mail: konno@ceri.go.jp

³正会員 独立行政法人北海道開発土木研究所 構造部 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号)
E-mail: mitamura@ceri.go.jp

⁴正会員 石川島建材工業株式会社 土木・建築事業本部 (〒100-0006 東京都千代田区有楽町1-12-1)
E-mail:kazuma_yoshimura@ikk.co.jp

複合函渠とは、RC構造の底版・側壁と鋼・コンクリート合成構造の頂版からなる土被りの無いボックスカルバートである。筆者らは、この複合函渠に使用する鋼・コンクリート合成頂版にパイプジベルを介して合成させたサンドイッチ頂版を提案し、種々の実験や解析による検証を行ってきた。この複合函渠の施工を帯広・広尾自動車道でフィールド事業として行い、実車載荷試験による検証を行った。本報告は、室内試験の結果について概説するとともに、設計・施工方法を紹介し、実車による載荷試験結果について報告するものである。

Key Words : compound culvert, sandwich slab, steel-concrete composite slab, pipe shear connector,

1. はじめに

近年、現場作業の省力化、建設コストの縮減、工期の短縮という観点から、鉄筋コンクリートに代わる新しい構造として鋼・コンクリート合成構造（サンドイッチ構造）が開発され、橋梁用床版やシェルター等に採用されてきている。

筆者らが提案する複合構造函渠とは、RC構造の底版・側壁と鋼・コンクリート合成構造の頂版からなる土被りの無いボックスカルバートである。筆者らは、この複合構造函渠の頂版として、上下鋼板とコンクリートを合成させるジベルにパイプジベルを使用したサンドイッチ頂版を提案し、種々の実験や解析による検証を行ってきた。これらの結果をもとに、複合函渠の施工を帯広・広尾自動車道でフィールド事業として行い、実車載荷試験による検証を行った。本報告は、室内試験の結果について概説するとともに、設計・施工方法を紹介し、実車による載荷試験結果について報告するものである。

2. 複合構造函渠の構造と特徴

図-1に複合構造函渠の標準断面図、図-2に側壁と頂版

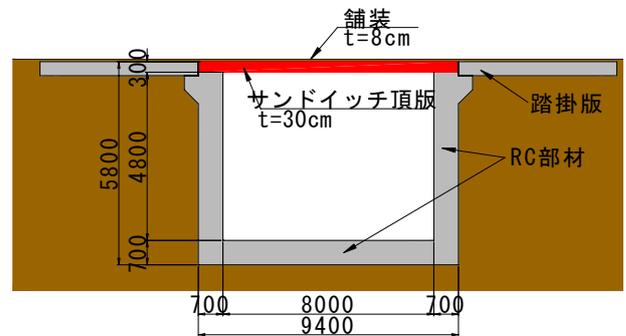


図-1 複合構造函渠の標準断面図

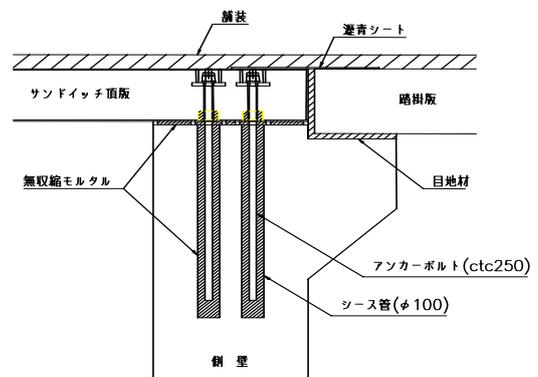


図-2 側壁と頂版の連結部詳細

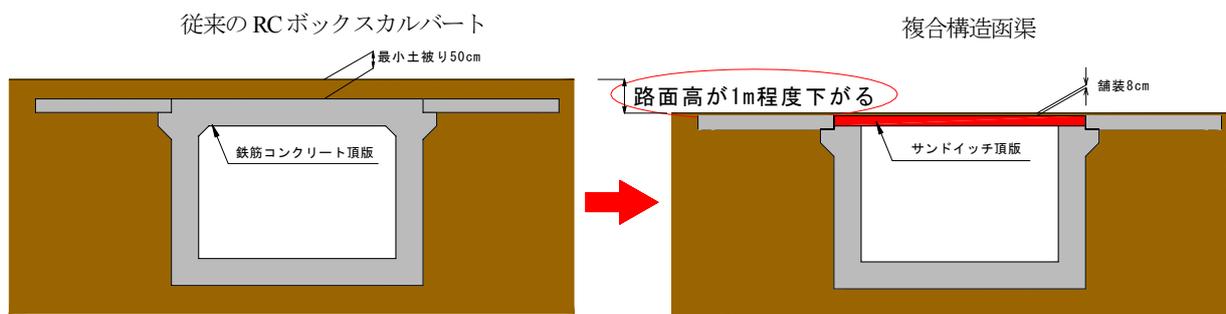


図-3 従来のRCボックスカルバートとの相違点

の連結部詳細の一例を示す。

複合構造函渠は、RC構造の底版・側壁と厚さ25～45cmのサンドイッチ頂版から構成されている。サンドイッチ頂版は、厚さ8mmの上下鋼板(SM400)にパイプジベル(STK400)を溶接し、このパイプジベルを介して上下鋼板とコンクリートを一体化させる構造となっている。頂版は工場でハーフプレキャスト部材として製作し、現地で架設後、高流動コンクリートを打設して合成する。

側壁とサンドイッチ頂版の連結は、図-2に示すようにアンカーボルトで行い、剛結構造としている。

図-3に従来のRCボックスカルバートと複合構造函渠との相違点を示す。従来のRCボックスカルバートは、最小土被り厚50cmを確保する必要がある¹⁾。サンドイッチ構造は、橋梁用床版でも実績があるように軽量で剛性が高く、土被りの無い構造に適用可能であり、部材厚をRC構造の約半分程度にできる。これより、カルバートが縦断線形のコントロールポイントとなっている場合は、路面高を1～1.5m程度下げることができると、路線全体の盛土量が減少し、建設コスト縮減が可能となる。

3. 要素試験

(1) 梁部材による静的荷重試験²⁾

試験体は、図-4に示すように、幅1.0m×厚さ0.16m×長さ2.9mの梁形状とし、上下面に厚さ6mmの鋼板(SS400)を使用し、この鋼板に直径60.5mm、厚さ3.8mmのパイプ(STK400)をそれぞれすみ肉溶接して固定した。上下面の鋼板は、適当な間隔でボルト・ナット(M16)を配置して間隔保持し、鋼板間の空間には高流動コンクリートを打設して一体化した。試験体数はNo.1とNo.2の2体とした。

荷重方法は、支間2.6mの荷重台に供試体をセットし、支間中央部に荷重間隔0.6mの線荷重を2点荷重した。

図-5に荷重と支間中央におけるたわみの関係、図-6に荷重と支間中央における鋼板応力度の関係を示す。

荷重とたわみの関係は、試験体No.1とNo.2でほぼ同様の結果が得られた。荷重荷重が増加するに従い、たわみは直線的に増加し、直線の傾きは全断面有効時の計算値

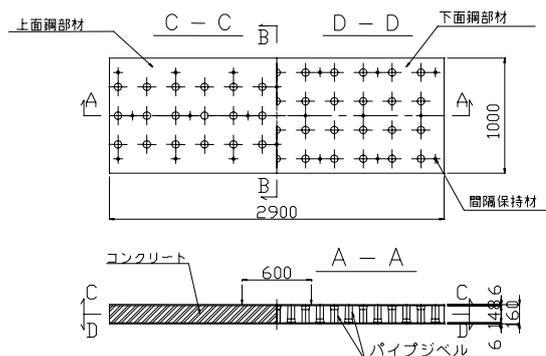


図-4 梁部材による静的試験用の試験体

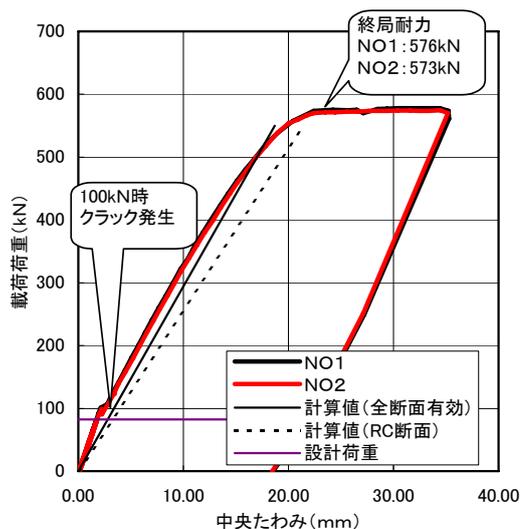


図-5 荷重とたわみの関係

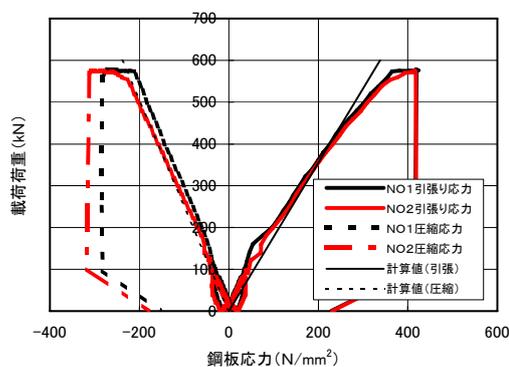


図-6 荷重と鋼板応力度の関係

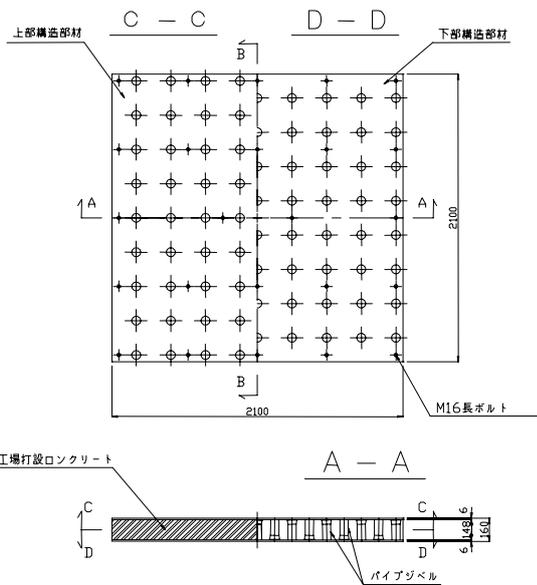


図-7 版部材による静的載荷試験用の試験体



図-8 版部材による静的載荷試験後の切断面

とほぼ一致する結果となった。載荷荷重500kNを超えると、たわみは全断面有効時の計算値およびRC断面の計算値を上回り、破壊を迎える結果となった。

以上より、パイプジベルを使用したサンドイッチ構造は、曲げモーメントに対して従来から合成構造で行われているRC計算が適用可能である。

(2) 版部材による静的載荷試験²⁾

試験体は図-7に示すように、幅2.1m×厚さ0.16m×長さ2.1mの正方形版で、鋼板およびパイプは梁部材による静的載荷試験と同じとした。試験体数は1体とした。

載荷方法は、支間1.8mの4辺単純支持とし、10cm×10cmの支圧板を中央に置いて1点載荷した。

載荷荷重100kN付近で、曲げ試験と同様に試験体側面にひび割れが発生した。その後、載荷荷重の増加に伴い外観的にはおおきな変化はなく、載荷荷重70kN付近で荷重が上がらなくなり、最終破壊を迎えた。破壊性状としては、目視による試験体の破壊状況および図-8の切断面から、コンクリートの押抜きせん断破壊であった。

本試験体と主筋方向で同程度の曲げ剛性を有する鉄筋コンクリート床版として、版厚26cm、上下主筋D19@100mm、上下配力筋D19@100mm、主筋かぶり4cmの押抜きせん断耐力を、松井式⁴⁾を用いて計算すると740kNなる。これより、サンドイッチ床版の押抜きせん断耐力は、RC版の計算値より若干低い結果となっている

表-1 鋼板の応力度振幅と載荷荷重

| 供試体 No. | 下限荷重 (kN) | 上限荷重 (kN) | 応力度振幅 (N/mm ²) |
|---------|-----------|-----------|----------------------------|
| 3 | 20 | 161 | 80 |
| 4 | 20 | 330 | 175 |
| 5 | 20 | 210 | 108 |
| 6 | 20 | 230 | 119 |
| 7 | 20 | 110 | 51 |

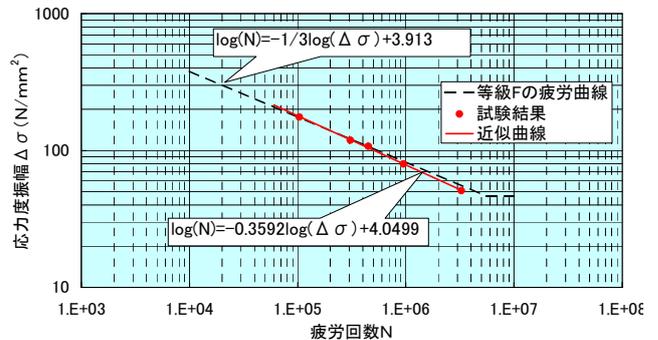


図-9 S-N線図

が、ほぼ同等の押抜きせん断耐力があると考えられる。

(3) 梁部材による定点疲労載荷試験³⁾

試験体は、前述の図-4に示す梁部材による静的載荷試験に使用した試験体と同じとし、試験体数は5体とした。載荷荷重は、サンドイッチ頂版のS-N線図を得る目的から、疲労による破壊回数が10万回～300万回の範囲でプロットされるよう載荷荷重を決定した。表-1に試験で採用した下限荷重、上限荷重および支間中央における下面鋼板の応力度振幅を示す。

破壊形態は、いずれの試験体も下面鋼板の破断によるものであった。試験結果をもとに、S-N線図を求めると図-9のようになる。図中には、「鋼構造物の疲労設計指針・同解説（社）日本港構造協会」における強度等級F（中空断面部材をすみ肉溶接した継手）の疲労設計曲線を併記した。図-9より、破壊回数と応力度振幅は密接な関係にあることが確認できる。その関係は、強度等級Fに近い関係となっているが、応力度振幅が小さい領域では、強度等級Fよりも若干下回る結果となった。この一因としては、パイプジベル溶接部ではなく、間隔保持材として使用した高ナット溶接部より鋼板が破断したことが挙げられる。一般に疲労設計曲線は式(1)で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta \sigma_m \cdot N &= C_0 \quad (\Delta \sigma > \Delta \sigma_{ce}, \Delta \sigma_{ve}) \\ N &= \infty \quad (\Delta \sigma \leq \Delta \sigma_{ce}, \Delta \sigma_{ve}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、

m：定数（直応力の場合m=3）

$\Delta \sigma_{ce}$ ：一定振幅応力， $\Delta \sigma_{ve}$ ：変動振幅応力

C_0 ： $2 \times 10^6 \cdot \Delta \sigma_{fm}$

($\Delta \sigma_{fm} : 2 \times 10^6$ 回基本応力範囲)

パイプジベルを使用したサンドイッチ頂版の 2×10^6 回基本応力範囲は、 $\Delta \sigma_{fm} = 61 \text{ N/mm}^2$ となる。

4. 輪荷重走行試験

(1) サンドイッチ頂版本体に着目した輪荷重走行試験⁵⁾

試験体の形状寸法を図-10に示す。試験体は、幅2.6m、長さ4.3m、厚さ0.24mであり、上下面に厚さ8mmの鋼板(SS400)を使用し、この鋼板に直径89.1mm、厚さ3.2mmのパイプ(STK400)をそれぞれすみ肉溶接して固定している。上下鋼板は適当な間隔でパイプジベル内に配置されたボルト・ナット(M16)により間隔保持され、鋼板間の空間には高流動コンクリートを打設して鋼板とコンクリートを一体化している。

試験は、図-11に示す輪荷重走行試験機を使用し、試験体は走行方向の2辺を単純支持、直角方向の2辺をばね支持の状態を設置した。

本試験装置の載荷荷重範囲は120~500kN、走行ストロークは3.0m、車輪は鉄輪であり直径が750mm、幅は320mmである。

既往の研究によれば、橋梁のRC床版において、最大実測荷重153kN、1車線当たりの交通量が2万台/日、大型車混入率40%の条件下で輪荷重試験による走行回数82万回で疲労寿命が50年に相当することが明らかにされている。本サンドイッチ頂版においては耐用年数を100年に想定して走行試験を実施するものとし、載荷荷重は186kN、走行回数は200万回とした。載荷荷重および載荷パターンを図-12に示す。試験では、走行回数0回、1千回、4万回、8万回、20万回、50万回、100万回、150万回および200万回に達した時点で走行試験を一時中断し、静的載荷試験を実施した。計測項目は上下鋼板、パイプジベルおよび試験体各部のひずみである。

試験体中央断面における走行方向の下鋼板ひずみ分布を図-13に示す。各計測箇所のひずみはパイプジベルとの位置関係により多少ばらついているものの200万回終了まで大きな変動もなく、 100μ 以下の値を示している。

図-14には、試験体中央におけるたわみと走行回数の関係を示している。載荷時たわみから除荷時たわみを除いた活荷重時たわみは、緩やかな勾配で200万回まで増加しており、輪荷重走行試験における試験体の破壊時の特徴である活荷重たわみが急増する現象は認められなかった。このことから実験終了後には下鋼板のパイプジベル溶接部にクラックが確認されたものの、本サンドイッチ頂版の疲労耐久性は特に問題ないものと判断される。

なお、走行回数200万回終了後に載荷荷重を393kNに増加し40万回の走行試験を実施しているが試験体は破壊せず

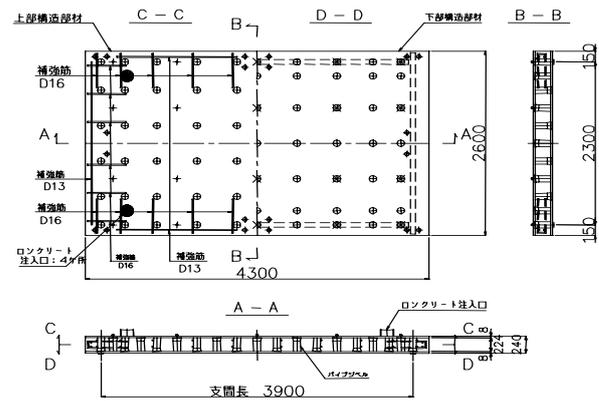


図-10 本体に着目した輪荷重走行試験用の試験体



図-11 輪荷重走行試験機

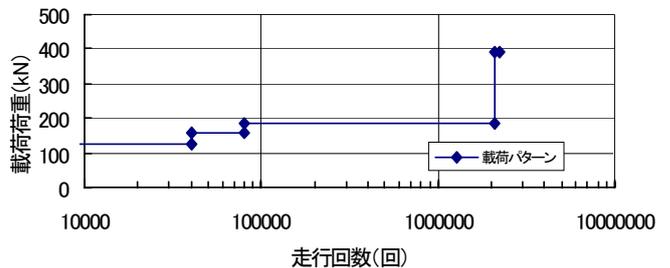


図-12 載荷パターン

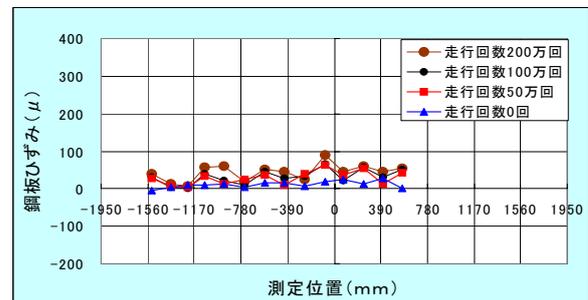


図-13 試験体中央断面における走行方向の下鋼板ひずみ分布

十分な疲労耐久性を有していることを確認している。

(2) 側壁との連結部に着目した輪荷重走行試験⁶⁾

本試験は、図-15に示す内空幅8mのボックスカルバートに、厚さ30cmのサンドイッチ頂版を使用する場合を

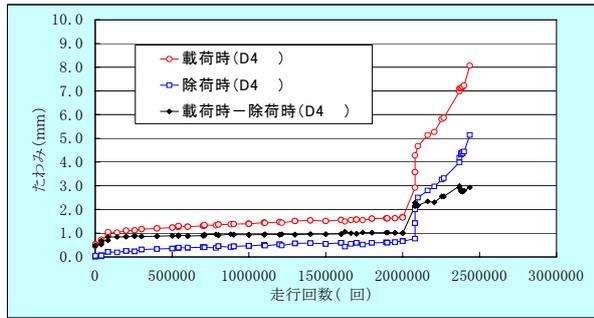


図-14 試験体中央におけるたわみと走行回数との関係

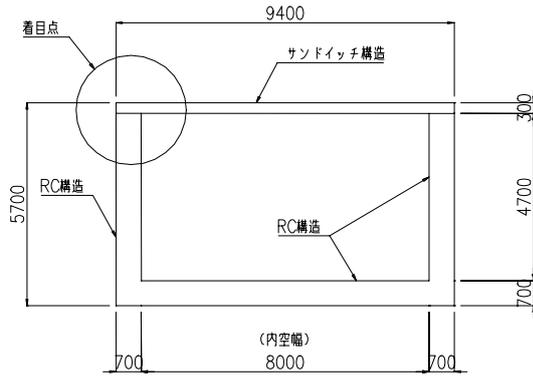


図-15 想定したボックスカルバート

想定し、頂版と側壁の連結部に着目した。試験体は、図-16に示すように走行試験機の寸法と走行範囲を考慮して幅1.0m、長さ4.15m、厚さ0.3mとした。側壁と頂版の連結部は剛結、内空側はバネ支点とした。上下鋼板は厚さ8mm (SM400A)、ジベルは直径89.1mm (STK400)の鋼管とした。ジベルは鋼板に溶接し、上下鋼板を組合せ、M16ボルト・ナットで上下を固定した。試験体を走行試験機に設置した後、鋼板間の空洞部に高流動コンクリートを打設して鋼板とコンクリートを一体化した。頂版と側壁の連結部は、アンカーボルトで結合した剛結構造としている。アンカーボルトはコンクリート硬化後にナットを締付け、設計荷重により発生する応力度 ($160\text{N}/\text{mm}^2$) を導入して、頂版と側壁との間に目開きが起こらないようにした。

試験は、前述の図-11に示した輪荷重走行試験機を使用した。載荷荷重は側壁と頂版の連結部に発生する負曲げモーメントが、想定したボックスカルバートと同様になるように決定した。載荷荷重および載荷パターンを図-17に示す。4万回まで100kN、それ以降204万回まで120kNで走行し、0,1,4,8,20,50,100,150,204万回で静的載荷を行なった。アンカーボルトにはひずみゲージを、側壁外側にはクリップゲージを設置し、走行回数に伴う変化を測定した。

静的載荷直下におけるたわみと走行回数の関係を図-18に示す。たわみは、走行回数204万回まで、緩やかに

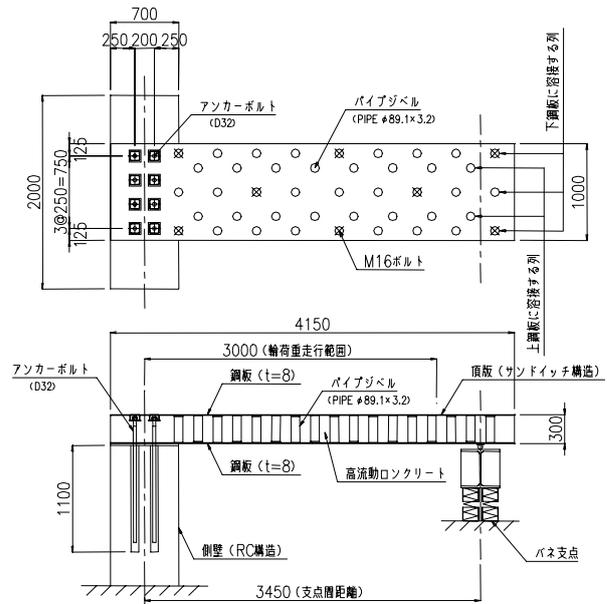


図-16 側壁との連結部に着目した輪荷重走行試験用の試験体

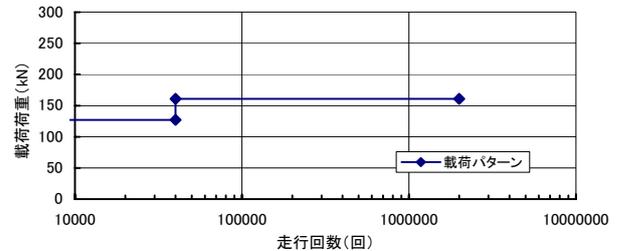


図-17 載荷パターン

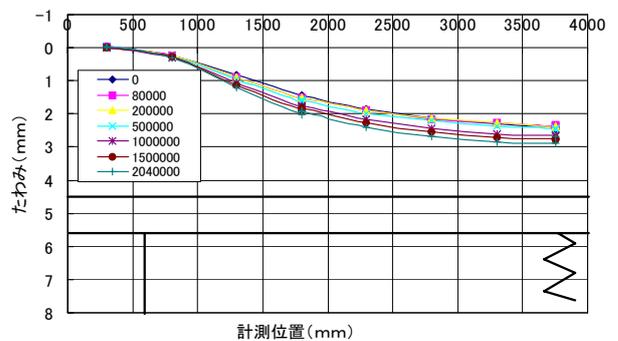


図-18 たわみと走行回数の関係

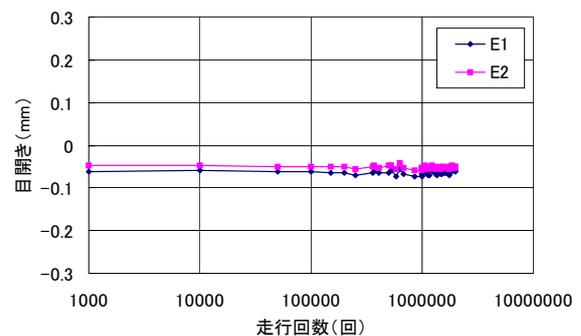


図-19 目開きと走行回数の関係

増加し、破壊の特徴である急増現象は見られなかった。

目開きと走行回数との関係を図-19に示す。目開きの変動は0.02mmの範囲内に収まっており、大きな変化はなかった。また目視で確認できるひび割れはなく、接合目地は健全な状態であった。これよりアンカーボルトに軸力を導入することが目開きに対し、有効であると考えられる。また、アンカーボルトの応力度は、内側・外側ともに応力度の変動範囲は2~3N/mm²程度であり、204万回走行後も同様であった。したがって、結合部の剛結構造は保たれていると考えられる。

4. 複合函渠工の設計・施工⁷⁾

(1) 概要

帯広・広尾自動車道は、北海道横断自動車道より分岐し、帯広市、中札内村を経て、広尾町に至る高規格幹線道路である。この内、帯広川西IC~幸福IC間は工事費に占める土工費の割合が40%と大きいので、路面高を下げることに伴う路線全体の工事費の削減を目的に、版厚が薄く、土被りが不要である複合構造函渠工を試験フィールド事業として9基採用した。

(2) 設計手法

前述までの各種要素試験および輪荷重走行試験により、パイプジベルを使用したサンドイッチ頂版の耐力および疲労耐久性は確認され、側壁と頂版の連結部についても輪荷重走行試験により安全性が確認された。

複合構造函渠の設計は、従来のRCボックスカルバートと同様に平面骨組み解析により断面力を算出し、上下鋼板を鉄筋に置き換えたRC断面計算により安全性を確認した。なお、頂版の厚さは3次元FEM解析結果および鋼板の疲労照査に基づき、図-20のように標準化している。複合構造函渠の頂版は、橋梁床版と同様の荷重条件となるため、「道路橋示方書」の衝撃荷重を準用し、頂版の活荷重（衝撃を含まない）によるたわみの許容値は「鋼構造物設計指針PARTB合成構造物」に準拠して側壁軸線間距離の1/2000を目安とした。

(3) サンドイッチ頂版の製作

底版および側壁の現場施工と並行して、頂版の鋼殻を工場製作した。工場での製作状況を図-21に示す。レーザー切断および孔開加工した上下鋼板にパイプジベルを自動溶接し、上下鋼板を重ね合わせてボルトで固定し、上面にはジンクリッチペイント、下面にはC-2系の塗装を行った。

(4) 現場施工

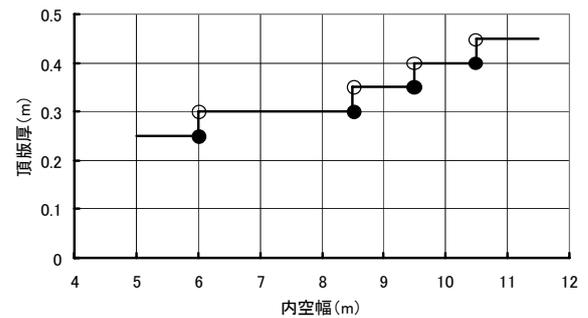


図-20 頂版厚と内空幅の関係



パイプジベル溶接 上下鋼板の組立
図-21 工場製作状況

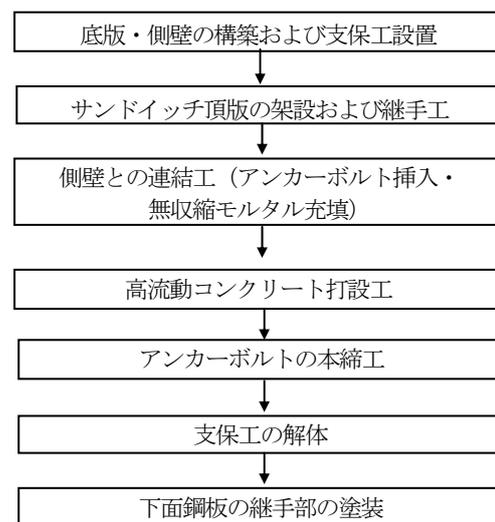


図-22 現場における施工手順

現場における施工手順を図-22に示す。底版および側壁は従来のRCボックスカルバートと同様に現地打設で施工した後、サンドイッチ頂版を現地に輸送し、トラッククレーンにより架設した。図-23にサンドイッチ頂版の架設状況を示す。サンドイッチ頂版は、鋼殻の状態ではコンクリート打設時の荷重を支持できないため、架設に先立ち支保工を設置し、荷重支持およびキャンバー調整を行った。サンドイッチ頂版架設後、側壁にあらかじめ設置しておいたシース管にアンカーボルトを挿入し、無収縮モルタルを充填することにより側壁と一体化した。

高流動コンクリートの打設は、隔壁で仕切られた頂版のパネル毎に行った。ポンプ車を函渠の横に配置し、高流動コンクリートを頂版上面まで圧送して頂版上面に



図-23 サンドイッチ頂版の架設状況



図-24 高流動コンクリートの打設状況

設置した打設口より高流動コンクリートを自然流下方式で打設した。打設中は随時、空気孔、確認窓、打音検査等で充填状況を確認した。高流動コンクリートの打設状況を図-24に示す。

高流動コンクリートは、粉体系、増粘剤系、併用系の3種類に分類されるが、この工事で使用した高流動コンクリートは、粉体量の増加により材料分離性を付与し、高性能AE剤により高い流動性を付与した粉体系とした。

5. 現場載荷試験⁸⁾

(1) 概要

完成した複合構造函渠に対して、実車による現場載荷試験を行った。載荷試験は土砂を積載したダンプトラックを用いて行い、車輪の軸重は、後輪が各100kN、前輪は60kNであった。載荷は、図-25に示すように支間直角方向に壁高欄側と道路中心線上の2測線を設け、各測線上で支間方向に3箇所シフトした計6ケースを設定し、各ケースに対して3回の計測を行った。なお、計測は上下鋼板のひずみおよび頂版の鉛直方向の変位について行った。

ここでは、後輪中心位置を支間中央に合わせたCASE1とCASE4の試験結果について述べる。

(2) 3次元FEM解析

載荷試験を実施する複合構造函渠を3次元でモデル化し、FEM弾性解析を行った。底版・側壁・頂版はシェル要素、壁高欄はソリッド要素でモデル化した。解析は壁高欄を含めた場合と含めない場合で行い、試験結果と比較した。

(3) 試験結果

(a) CASE1載荷時

CASE1載荷時の計測線1における支間方向応力度分布を図-26に、支間方向変位分布を図-27に示す。試験値は壁高欄の剛性を考慮した解析値に近い値となり、壁高欄

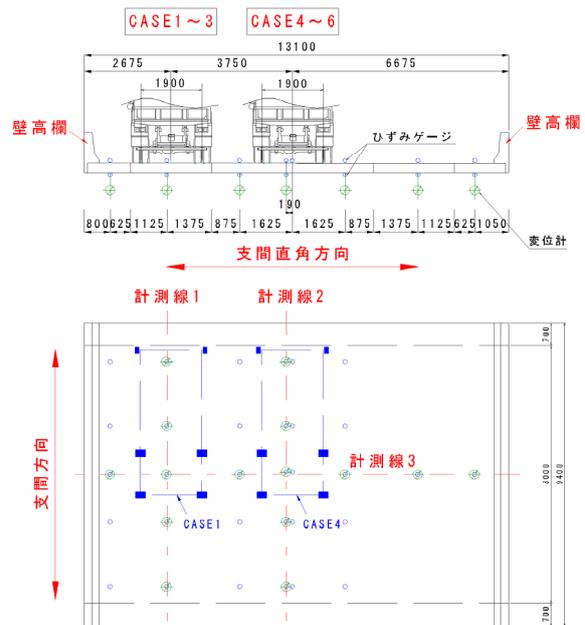


図-25 現場載荷試験概要図

の合成が有効に作用していることが確認された。

変位分布は試験値が解析値を下回り、鋼板の応力度分布は試験値が解析値を上回る結果となったが、いずれもその差は小さいものであった。

(b) CASE4載荷時

CASE4載荷時の計測線2における支間方向の応力度分布を図-28に、支間方向の変位分布を図-29に示す。上下鋼板の応力度はほぼ対称に発生しており、全断面有効とした3次元FEM解析結果と近似している。また、変位分布についても試験値と解析値は近似している。

また、3回の計測結果において、解析値に対する試験値の応力度の割合は89~94%であり、変位については支間中央に着目すると95~99%であった。

6. まとめ

鋼・コンクリート合成サンドイッチ頂版を使用した

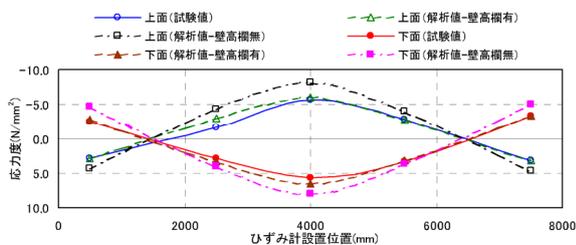


図-26 支間方向の応力度分布 (CASE1)

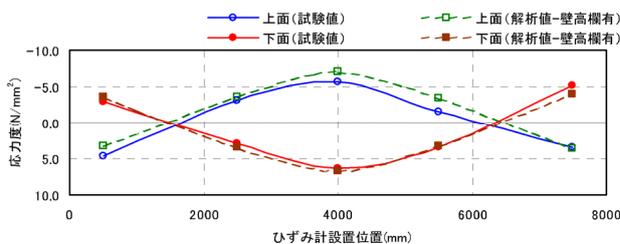


図-28 支間方向の応力度分布 (CASE4)

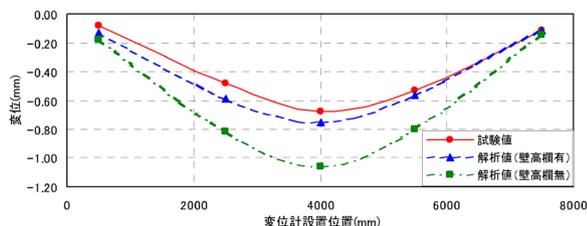


図-27 支間方向の変位分布 (CASE1)

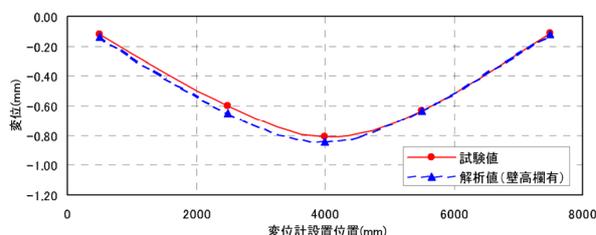


図-29 支間方向の変位分布 (CASE4)

複合構造函渠に関する各種試験，実地施工，現場載荷試験を通して，以下が明らかとなった。

- (1) パイプジベルを使用したサンドイッチ構造は，曲げモーメントに対してRC計算が適用可能であり，主筋方向で同程度の曲げ剛性を有する鉄筋コンクリート床版と同程度の押抜きせん断耐力を有する。
- (2) パイプジベルを使用したサンドイッチ構造の疲労破壊形態は下面鋼板の疲労破断であり，強度等級Fに近似する。
- (3) 輪荷重走行試験の結果より，サンドイッチ頂版本体および側壁と頂版の連結部ともに，十分な疲労耐久性を有する。
- (4) 施工は全国初ということもあり，問題点の検証を行いながら行った。
- (5) 現場載荷試験では，3次元FEM解析結果と載荷試験における鋼板応力度と頂版変位がほぼ一致しており，3次元FEM解析の妥当性が確認された。

今後は，今回の施工状況および試験結果等をもとに，設計・施工上の問題点を再検討し，改善・改良を重ねていく予定である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路土工 カルバート工指針，1998.7.
- 2) 畑山 朗，今野 久志，小野辺 良一，細谷 均：パイプジベルを使用したサンドイッチ床版の静的強度特性，土木学会北海道支部 論文報告集，Vol.59，pp.168-169，2003.2.
- 3) 畑山 朗，今野 久志，松井 繁之，小野辺良一：パイプジベルを使用したサンドイッチ床版の疲労強度特性，土木学会年次学術講演開講演概要集第I部，Vol.58，pp.289-290，2003.9.
- 4) 前田，松井：鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐力の評価，土木学会論文報告集，No.148/V-1，pp.43-13，1981.8.
- 5) 今野 久志，池田 憲二，皆川 昌樹，松井 繁之，小野辺良一：パイプジベルを使用したサンドイッチ床版の輪荷重走行試験，土木学会北海道支部 論文報告集，Vol.60，pp.210-211，2004.2.
- 6) 吉村 和真，三田村 浩，今野 久志，小野辺良一：パイプジベルを使用したサンドイッチ構造の剛結部に着目した輪荷重走行試験，土木学会年次学術講演開講演概要集共通セッション，Vol.60，pp.105-106，2005.9.
- 7) 古田 勝章，古城 学，今野 久志，住岡 栄悦：頂版に鋼・コンクリート合成床版を使用した複合構造函渠の設計・施工，土木学会年次学術講演開講演概要集共通セッション，Vol.60，pp.83 - 84，2005.9.
- 8) 今野 久志，三田村 浩，谷口 直弘，古田 勝章：複合構造函渠の現場載荷試験，土木学会年次学術講演開講演概要集共通セッション，Vol.60，pp.85 - 86，2005.9.

THE STUDIES AND DEVELOPMENT OF THE COMPOUND CULVERT WITH STEEL-CONCRETE COMPOSITE SANDWICH SLAB

Ryouchi ONOBE, Hisashi KONNO, Hiroshi MITAMURA, Kazuma YOSHIMURA

The Compound Culvert is the box-culvert which has no earth covering which consists on the bottom slab of RC, the side wall of RC and the steel-concrete composite slab. The authors propose the sandwich slab using the shear connector of the steel pipe for this Compound Culvert, are doing a varioud experiment and verification by the analysis. It built this Compoud Culvert as the field project of the OBIHIRO-HIROO highway and it verified by the loading test. This report is the outline about the indoors test result, the explanation of the way of designing and building and the result of the loading test.