

(51) 合成版式沈埋函の構造と設計

Structure and Design of Composite type Immersed Tunnel Element

白岩 成樹*, 河崎 和文*, 清宮 理**, 北澤 壮介***, ○村本 哲二****, 吉川 孝*****
Shigeki Shiraiwa, Kazufumi Kawasaki, Osamu Kiyomiya, Sosuke Kitazawa, Tetsuji Muramoto, Takashi Yoshikawa

- * 運輸省第三港湾建設局 神戸調査設計事務所 (〒650-0024 神戸市中央区海岸通り29番地)
- ** 工博, 早稲田大学教授, 理工学部土木工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)
- *** 工修, (財)沿岸開発技術研究センター 調査部 (〒102-0092 東京都千代田区隼町3-16)
- **** 工修, (財)沿岸開発技術研究センター 調査部 (〒102-0092 東京都千代田区隼町3-16)
- ***** (株)オリエンタルコンサルタンツ 関西支社 (〒532-0003 大阪市淀川区宮原3-3-31)

Composite type immersed tunnels have been constructed at Osaka area and so on. Composite type elements are fabricated by open-sandwich type members or sandwich type members. Bearing capacity of shear connectors, mechanical properties at unfilled concrete part, etc. were examined to make design code of composite type immersed tunnel. This paper is described on various loading tests and design method. Furthermore outline of immersed tunnel by composite members are explained.

1. はじめに

沈埋トンネルの施工方式には、ドライドックでコンクリートを打設し函体を製作する方式と洋上に浮かべた鋼殻の中にコンクリートを打設する方式がある。しかし、いずれの場合も函体断面を構成する構造部材としては、鉄筋コンクリート構造であり、コスト縮減と工期短縮の観点から、仮設工として利用していた鋼殻の本体利用やドック使用期間の短縮が開発課題とされてきた。

従来、鉄筋コンクリート部材の外側表面に配置していた防水鋼板あるいは仮設鋼殻を構造部材として取り扱うという発想から始まり、コスト縮減、工期短縮を実現した事例として大阪咲洲トンネルを、さらに製作時の支保工と配筋工を不要とすることで、より一層のコスト縮減と工期短縮を図った事例として神戸港島トンネルを挙げ、これらのトンネルで採用した合成版の開発経緯を述べる。本稿では、鋼とコンクリートの合成構造の成立に不可欠とされているシアコネクタに関する実験とそれを踏まえ開発した設計手法について主に報告する。

2. 構造概要

2.1 オープンサンドイッチ構造の概要

オープンサンドイッチ構造は、部材の片側面が通常の鉄筋コンクリート構造で、もう一方の表面にシアコネクタ付きの鋼板を配置した合成構造である。大阪咲洲トンネルでは、せん断補強筋として鋼板に溶殖したスターラップをシアコネクタとして利用した。図-1にオープンサンドイッチ構造の概要図を示す。

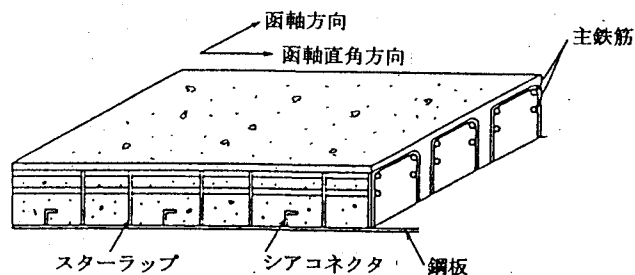


図-1 オープンサンドイッチ構造の部材

2.2 オープンサンドイッチ構造の適用事例

大阪咲洲トンネルは、大阪の都心に近い港区と開発中の南港地区を道路と鉄道で結ぶ延長約1kmの沈埋トンネルで1997年に開通し現在供用中である。図-2に大阪咲洲トンネルの函体断面図を示す。本トンネルでは、下床版と側壁にオープンサンドイッチ構造形式の合成版を適用した。

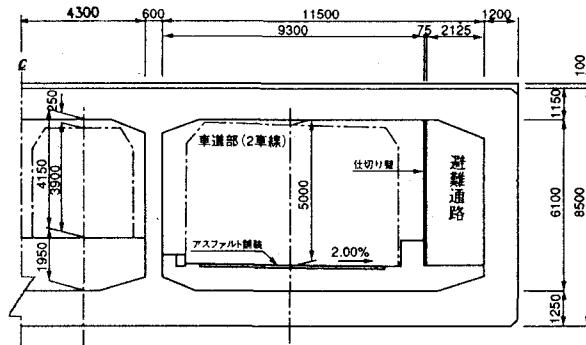


図-2 大阪咲洲トンネル函体断面図(単位mm)

2.3 フルサンドイッチ構造の概要

フルサンドイッチ構造は、部材の両面にシアコネクタ付きの鋼板を配置し、鋼板とコンクリートとを一体化し合成構造としたものである。この構造は、土木学会の「鋼コンクリートサンドイッチ構造設計指針(案)平成4年(以下、学会指針案)」でいう「サンドイッチ構造」を基本としたものである。神戸港島トンネルでは、シアコネクタとして山形鋼を利用した他、コンクリートの打設区画形成の役割を併せ持つダイヤフラムを併用した。図-3にフルサンドイッチ構造の概要図を示す。

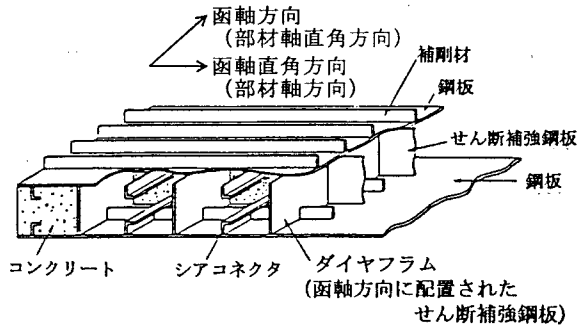


図-3 フルサンドイッチ構造の部材

2.4 フルサンドイッチ構造の適用事例

神戸港島トンネルは、神戸の中心市街地と海上都市ポートアイランドとを連絡する延長約520mの道路沈埋トンネルであり、1999年7月に供用を開始した。図-4に神戸港島トンネルの函体断面図を示す。本トンネルでは、下床版にオープンサンドイッチ構造を、上床版と側壁にフルサンドイッチ構造と称する合成版を適用した。

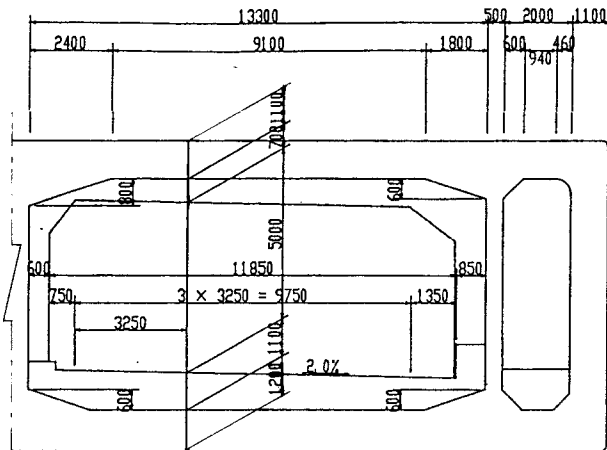


図-4 神戸港島トンネル函体断面図(単位mm)

3. オープンサンドイッチ構造

3.1 載荷実験の概要

本構造を実構造物に適用するにあたり、各種実験を実施した。ここでは、特にスタッドジベルとスターラップをシアコネクタとした場合の押抜きせん断実験を中心に、その概要を報告する。

1) 押抜きせん断実験

a) 実験目的

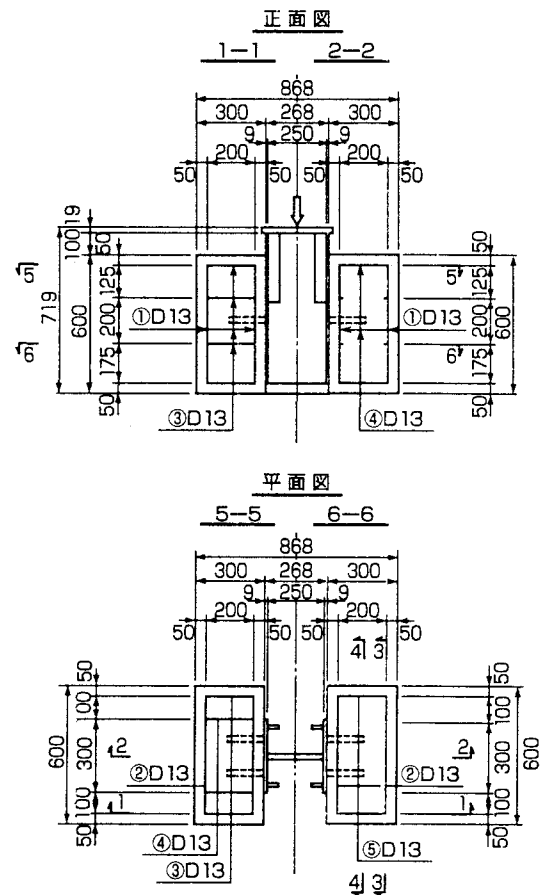
- ・スタッドジベル、スターラップのせん断耐力確認
- ・コンクリート打設方向の影響確認
- ・他の実験供試体用の小径シアコネクタとの耐力値照査

b) 実験供試体

H形鋼にビルトアップした鋼板のフランジ部にスタッドジベルおよびスターラップを溶接し、そのフランジ部をコンクリート打設した供試体を作成した。図-5に供試体（スタッドジベルの例）を示す。

c) 実験方法

載荷は200t構造物試験機を用い、破壊するまで単調増加で載荷した。計測項目は、荷重と変位である。



(a) スタッドジベル供試体 (D13の場合)

図-5 押し抜きせん断実験の供試体

d) 確認事項

押抜きせん断実験の結果（スタッドジベルの例）を表-1に示す。

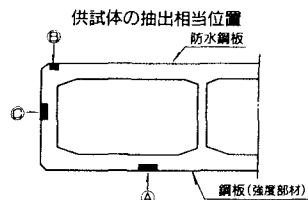
表-1 押抜きせん断実験の結果

供試体No.	コンクリート 打設方向に よるタイプ	コンクリート ずれ止め仕様				コンクリート 圧縮強度 (kgf/cm ²)	ずれ止め 1本当りのせん断 耐力 (tf)	道路橋示方書 式より推定し た1本当りの せん断耐力 Qa(tf)
		A	B	C	D			
実 績	下床版に相当	①	○			385	14.1	12.7
構 造	上床版に相当	⑥	○			358	13.5	12.3
造	側壁に相当	②		○		387	14.7	12.8
実験 供試体	隅角部供試体を使用	③			○	16	120	382
		④			○	13	100	383
	断面供試体を使用	⑤			○	9	70	384

注) ・推定計算値算出に用いたスターラップの長さは、コンクリートスラブ高(30cm)とした。
・スターラップの場合の径dは公称直径を使用。
・道路橋示方書式によるずれせん断耐力推定式(許容せん断耐力算定式に安全率6を乗じた)は次のとおりである。
 $Q_a = (30 \cdot d \cdot \sqrt{\sigma_{ck}}) \times 6$

コンクリートの打込み方向と供試体形状

タイプ	コンクリートの 打設方向	載荷試験
A		
B		
C		
D		



- ①シアコネクタのせん断耐力の実験値は、道路橋仕方書より推定した値に比べ約1割大きかった。
- ②スターラップのせん断耐力は、それと同径のスタッドジベルと同等のせん断耐力を有した。
- ③シアコネクタの破壊に対する安全率を3としても、荷重-せん断変位図から想定される降伏点に対しては十分安全性が確保されていた。
- ④コンクリートの打設方向により、せん断耐力は若干異なった。
- ⑤上記①の傾向は、他の実験供試体用の小径シアコネクタでも同様であり、実験供試体のシアコネクタの効果は実構造と同様に評価できる。

2) その他の実験

オープンサンドイッチ構造を実構造物へ適用するにあたり、上記実験の他、はり部材載荷実験、隅角部強度確認実験、断面載荷実験等を実施し、鉄筋コンクリートの慣用設計理論の適用妥当性や破壊形態の確認を行った。

3.2 オープンサンドイッチ構造の部材設計法

オープンサンドイッチを適用した合成版では、まず部材のせん断補強筋として必要なスターラップの径と配置を決め、それをシアコネクタとして利用し、シアコネクタ耐力が不足する部分についてのみスタッドジベルを

配置し、コンクリートとの一体化を図るものとした。¹⁾

ここでは、上記実験結果および既往の関連基準類に基づき策定した、大阪咲洲トンネルの沈埋函の設計指針案(内部資料)についてその概要を述べる。

1) 部材断面算定の基本

- ①断面力は、沈埋函断面をはりを組み合わせたラーメン構造として算定する。
 - ②曲げおよび軸力が作用する部材に対する断面算定は、鉄筋コンクリートの慣用設計理論によるものとする。
 - ③せん断力が作用する部材に対しては、コンクリートとスターラップで負担するものとする。
- なお、本設計では許容応力度法によるものとした。

2) シアコネクタの設計

- ①表面鋼板に取り付けるシアコネクタには、スタッドジベルを使用するものとするが、溶接したスターラップもシアコネクタとして考慮できるものとする。
- ②シアコネクタは水平せん断力に対して設計する。
- ③シアコネクタの許容せん断耐力は次式により算出する。

$$Q_s = 60 \cdot d^2 \cdot \sqrt{\sigma_{ck}}$$

Q_s ; 許容せん断力(kgf/本)

d ; シアコネクタの径(cm)

σ_{ck} ; コンクリートの設計基準強度(kgf/cm²)

- ④シアコネクタの最大間隔は60cmとする。
- ⑤シアコネクタの最小間隔は5dまたは10cmのうち大きい方とする。また、シアコネクタと鋼板定着端との最小純間隔は 2.5cmとする。
- ⑥スタッドジベルの径は19mm、22mmとし、全高は150mmを標準とする。また、シアコネクタとして考慮できるスターラップ径はD19、D22を標準とする。

4. フルサンドイッチ構造

4.1 載荷実験の概要

本構造を実構造物に適用するにあたり、各種実験を実施した。ここでは、特に山形鋼をシアコネクタとした場合のずれ止めせん断実験を中心に、その概要を報告する。

1) 山形鋼ずれ止めせん断実験^{2),3)}

a) 実験目的

- ・大きなサイズの山形鋼のずれせん断耐力の確認
- ・載荷方向と形鋼の向きの影響の確認
- ・形鋼の配置間隔の影響の確認

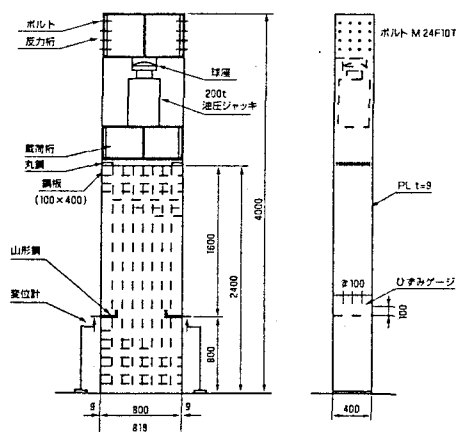
b) 実験供試体

鋼板(SS400、t=9mm、幅40cm)に設計使用サイズの山形鋼(SS400、150×90×9)を溶接し、コンクリート($\sigma_{cs}=399\text{kgf/cm}^2$)に埋め込んだ2面せん断型の供試体を作成した。図-6に供試体図を示す。

c) 実験方法

載荷は200t構造物試験機を用い、破壊するまで単調増

加で載荷した。計測項目は、荷重と変位である。



図－6 山形鋼ずれ止めせん断実験の供試体

d) 確認事項

- ①実験値は計算値に比べて、山形鋼が1個の場合で約30%、山形鋼が2個の場合で約20%小さかった。ここで、計算値とは学会指針案における安全係数をすべて1.0とした場合の値である。
- ②山形鋼の刃先が上向き(前面が支圧面)の場合の耐力は、下向きの場合に比べて約10%小さかった。
- ③山形鋼を60cmまたは90cm間隔で2個配置した場合の耐力は、1個の場合の耐力の2倍程度となり、配置間隔の影響は見られなかった。

表－2に、ずれせん断耐力実験の結果を示す。

表－2 山形鋼ずれ止めせん断実験の結果

ケース名	実験要因			実験値 (tf)	計算値 (tf)	実験値 計算値
	向き	個数	間隔			
A-1-a)	上	1	—	81.8	116.9	0.70
A-1-b)	下	1	—	75.0	117.0	0.71
A-2-a)	上	2	60cm	180.0	191.5	0.94
A-2-b)	下	2	60cm	149.0	192.0	0.78
A-3-a)	上	2	90cm	187.8	213.5	0.88
A-3-b)	下	2	90cm	159.9	212.3	0.75

2) コンクリート未充填部の影響確認実験⁴⁾

フルサンドイッチ構造の成立には、鋼殻内にコンクリートが完全に充填されることが前提となるが、上面が閉塞した空間への充填となるため、上面の鋼板裏に未充填部が残る可能性がある。適切な空気孔設置等により対応するが、仮に未充填が発生した場合でもエポキシ充填等により処理することが可能である。

しかしながら、未充填部検出や後注入には膨大な作業手間を必要とし、工程や工費に与える影響が極めて大きい。ここでは、未充填部が耐力に及ぼす影響の程度を確認し、充填管理の目標値を設定することとした。

a) 実験目的

- ・コンクリート未充填が耐力に及ぼす影響の確認

b) 実験供試体

- ・山形鋼ずれ止めせん断実験と基本的には同様の供試体であり、充填不良の再現は発泡スチロールにより行った。

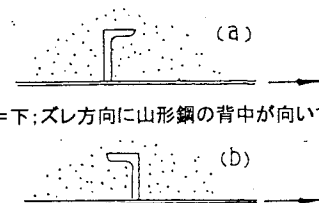
c) 実験方法

- ・完全充填ケースの他、充填不良の程度を図－7に示す3段階とし、1)と同様の方法で実験を行った。

供試体 No.	山形鋼 サイズ	向き	コンクリート		備考
			呼び強度 σ_c (kgf/cm ²)	セメント Gmax (mm)	
V0-(a)	L150×90×9	上	300	早強セメント	完全充填
V0-(b)	"	下	"	"	"
V1-(a)	"	上	"	"	充填不良レベル1
V1-(b)	"	下	"	"	"
V2-(a)	"	上	"	"	充填不良レベル2
V2-(b)	"	上	"	"	"
V3-(a)	"	下	"	"	充填不良レベル3
V3-(b)	"	下	"	"	"

鋼板:PL9

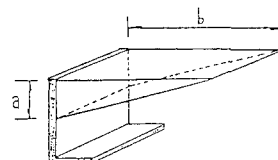
注)山形鋼向き=上;ズレ方向に山形鋼の刃先が向いている



山形鋼向き=下;ズレ方向に山形鋼の背中が向いている

充填不良形状寸法

供試体No.	a(mm)	b(mm)	備考
V0	0	0	完全充填
V1	10	100	充填不良レベル1
V2	20	200	充填不良レベル2
V3	30	300	充填不良レベル3



図－7 充填不良の状態

d) 確認事項

表－3および図－8に実験結果を示す。

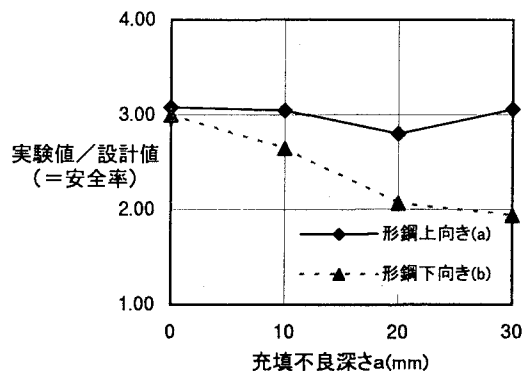
- ①形鋼の向きにより耐力が異なった。
- ②形鋼が上向きの場合、充填不良深さが少なくとも30mm程度まではずれ量が大きくなっても、耐力の低下は殆ど見られなかった。
- ③形鋼が下向きの場合、充填不良深さが大きくなる(ずれ量の増加)に伴って、耐力が低下する。その傾向はほぼ未充填深さに比例した。

表－3 充填不良とシアコネクタ耐荷力の実験結果

供試体 No.	形鋼向き 未充填サイズ	破損荷重 Pu(tf)	換算実験値 Qw(tf)	換算実験値／設計値 Qw(tf)／Qc(tf)
V0-(a)	上向き 充填不良無	70.0	77.2	3.08
V0-(b)	下向き 充填不良無	68.0	75.0	3.00
V1-(a)	上向き 10×100mm	69.0	76.1	3.05
V1-(b)	下向き 10×100mm	60.0	66.2	2.65
V2-(a)	上向き 20×200mm	65.0	70.1	2.80
V2-(b)	下向き 20×200mm	48.0	51.8	2.07
V3-(a)	上向き 30×300mm	71.0	76.6	3.06
V3-(b)	下向き 30×300mm	45.0	48.5	1.94

鋼板厚 tf:8.98(mm) 形鋼厚 tsc:8.47(mm)
 コンクリート圧縮強度 σ_c : V0-(a)～V1-(b) 385(kgf/cm²)
 V2-(a)～V3-(b) 403(kgf/cm²)

注)換算実験値
 $Q = Pu \times \sqrt{\frac{300}{\sigma_c}} \times \sqrt{\frac{100}{80}}$
 $Q = 25.0(\text{tf/m})$



図－8 充填不良とシアコネクタ耐荷力の関係

e) 設計上の取扱いおよび施工上の留意点

設計は、あくまでもコンクリートが完全充填されていることを条件として取り扱うものとした。一方、施工面では、完全充填を原則とし、未充填部が生じた場合にはその深さが5mmを越える箇所について、後注入を行うものとした。

3) その他の実験

オープンサンドイッチ構造を実構造物へ適用するにあたり、上記実験の他、はり部材載荷実験、隅角部強度確認実験、施工時応力影響確認実験等を実施し、鉄筋コンクリートの慣用設計理論の適用妥当性、破壊形態の確認、施工時応力が無視できることの確認を行った。

4.2 フルサンドイッチ構造の部材設計法

フルサンドイッチタイプの合成版では、まずコンクリート充填時に必要な型枠として、打設区画割りと補剛材配置を決め、仮設の鋼殻設計を行う。

合成時には、打設区画割り用の鋼板のうち、部材軸方向に配置した鋼板を、せん断力を受け持つウェブとして、

部材直角方向に配置した鋼板(ダイヤフラム)を、シアコネクタとして利用する。また、施工時の補剛材となる山形鋼を合成時のシアコネクタとして利用するものとした。

ここでは、上記実験結果および既往の関連基準類に基づき策定した、神戸港島トンネルの沈埋函の設計指針案(内部資料)についてその概要を述べる。

1) 曲げモーメントと軸力に対する設計

沈埋函横断面の断面力を平面骨組解析で算出し、表面鋼板をかぶりがゼロの引張鋼材として扱い、通常の鉄筋コンクリート部材設計の慣用理論に従い、曲げモーメントと軸力に対する鋼板とコンクリートの応力度を算定する。部材設計は許容応力度法による設計とした。

2) せん断力に対する設計

コンクリートの平均せん断応力度が許容応力度を越える場合、作用せん断力に対し、式1により算出される厚さ以上の鋼板「せん断補強板(ウェブ)」を配置する。

$$t_w = S / [\sin^2 \alpha (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot z \cdot \sigma_{s,1}] \cdots (1)$$

これは、学会指針案の式(6.3.12)を基本とし、板厚 t_w について導いたものである。

3) ずれせん断力に対する設計

シアコネクタとして表面鋼板内面の形鋼およびダイヤフラムを利用する。シアコネクタの量は、着目範囲に作用するずれせん断力の合計値に対して、シアコネクタの許容せん断力の合計値が上回るように決定する。式2にその関係式を示す。

ただし、上・下床版の上面鋼板に配置される形鋼については、その間隔が狭くなるとコンクリートの充填性およびずれせん断耐力の低下を招くおそれがあるため、最小間隔を60cm以上とした。

$$\sum_{i=1}^n S_{s,i} / S \geq 1.0 \quad \cdots \cdots (2)$$

ここに、

S; 区間Lにおける鋼板とコンクリートとの間で単位幅当たり作用するずれせん断力

$S_{s,i}$; 単位幅当たりの個々のシアコネクタの許容ずれせん断力

n; 区間Lにおける単位幅当たりのシアコネクタの総数

L; 設計荷重作用時の最大曲げモーメント作用断面と曲げモーメントが0となる断面との間の区間

また、シアコネクタに作用するずれせん断力は、鋼板に作用する軸方向力の変化であり、以下の方法で算出する。曲げモーメントが最大となる断面では鋼板に軸方向力が作用し、曲げモーメントが0となる断面では鋼板の軸方向力は0となる。つまり、曲げモーメントが最大となる断面と曲げモーメントが0となる断面との間の区間Lにおける軸方向力の変化量は、曲げモーメントが最大

となる断面における鋼板の軸方向力と同じ大きさであり、この場合の区間Ⅰにおける鋼板とコンクリートとの間で単位幅あたりに作用するずれせん断力は、式3で算出される。

$$S = t_w \cdot \sigma_s \quad \cdots \cdots (3)$$

ここに、

t_w ：最大曲げモーメント作用断面の鋼板の厚さ

σ_s ：最大曲げモーメント作用断面における鋼板の引張応力度(kgf/cm²)

$\sigma_s = f_{yd} \cdot (M_{max} / M_r)$

f_{yd} ：鋼板の引張降伏強度(kgf/cm²)

M_{max} ：最大曲げモーメント作用断面の設計曲げモーメント

M_r ：最大曲げモーメント作用断面の抵抗曲げモーメント

また、シアコネクタの許容ずれせん断力は、形鋼については実験により形鋼のずれ耐力を求め、安全率を3として求めており、その値は表-4に示すとおりである。

表-4 山形鋼の許容ずれ耐力

形 鋼 サ イ ズ	150×90 × 9	150×150 ×12	150×150 ×15	200×200 ×15
許容ずれ せん断力	2.5	2.5	2.5	2.7

注) $\sigma_{ck}=300\text{kgf/cm}^2$ 、配置間隔 $\geq 60\text{cm}$ 、
鋼板の板厚 $t \geq 9\text{mm}$ 、形鋼材質SS400

ダイヤフラムをシアコネクタとして利用する場合の算式は式4のとおりである。

$$Qa = t_w \times w_{sc} \times \sigma_{sa} / \sqrt{3} \quad \cdots \cdots (4)$$

ここに、

t_w ：ダイヤフラムの板厚(cm)

w_{sc} ：ダイヤフラムの幅(cm)

σ_{sa} ：鋼板の許容引張応力度(kgf/cm²)

4.3 フルサンドイッチ構造部材の設計例

本項ではフルサンドイッチ構造部材における「ずれせん断力に対する設計」事例を報告する。

図-9に沈埋函断面の照査区分を示す。

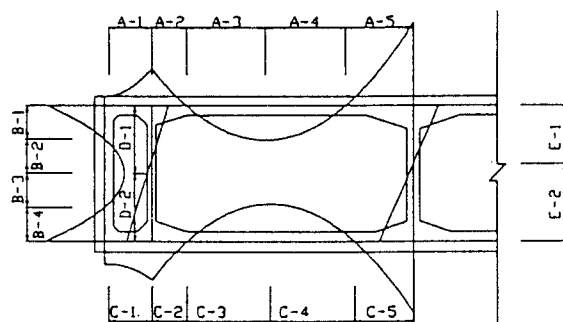


図-9 ずれせん断力の照査区分

ずれせん断力に対する照査結果を、上床版(A-1～A-5)を例にとり、表-5に示す。

表-5 ずれせん断力の照査結果

		ずれ せん断 力 (tf)	ずれせん断耐力				
			形 鋼		ダイヤフラム(t=8mm) (スターラップ)		耐力の 合計 (tf)
			耐 力 (tf)	数	1枚目 耐 力 (D22)	2枚目 耐 力 (D19)	
上 床 版	A-1	105.2	22.65	3	97.0	97.0	261.9
	A-2	125.7	22.65	2	97.0	97.0	239.3
	A-3	101.7	22.65	5	97.0	—	210.2
	A-4	100.8	22.65	5	97.0	—	210.2
	A-5	246.5	22.65	4	97.0	102.8	284.6

5. まとめ

合成部材を使用した構造部材では鋼とコンクリートを結合するずれ止めの評価が重要である。サンドイッチ部材とオープンサンドイッチ部材に使用するずれ止めとして、形鋼、スタッド、せん断補強筋に関するずれせん断耐荷力を実験的に把握した。載荷実験よりスタッドとせん断補強筋では、破壊に対する安全率を3としても良いこと、スタッドとせん断補強筋では径が同じであれば耐荷力はほぼ同一であることが判明した。形鋼に関しては、大型(実物)の形鋼は従来の設計式より小さな耐荷力になること、形鋼の向きにより耐荷力に差がでること、コンクリート未充填部が大きくなると耐荷力がかかなり低減すること等が判明した。ずれせん断実験、曲げ載荷実験など各種の載荷実験を基に沈埋函の構造設計法を今回提案した。

6. 今後の展望

合成式沈埋トンネルの計画が今後も進められており、大阪咲洲トンネルと神戸港島トンネルでの設計指針案が計画されているトンネルの参考になると考える。しかし設計法としては限界状態設計法と許容応力度設計法が混在しており、過渡的なことと考えている。今後性能照査型の設計指針に移行していきたい。

最後に、今回の検討では大阪市立大学園田教授ほか多数の関係各位の御指導を頂いている。ここに関係各位に感謝の意を表するものである。

参考文献

- 1) 山田昌郎、清宮理：形鋼とスタッドの混用、コンクリート工学年次論文報告集, pp. 791-796, 1992. 6
- 2) 清宮理、木村秀雄：形鋼によるずれ止めの力学特性、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17, pp. 1385-1390, 1996. 7
- 3) 清宮理、横田弘：形鋼によるずれ止めの耐力評価、合成構造の活用に関するシンポジウム, pp. 113-118, 1986. 9
- 4) 清宮理、木村秀雄、渡辺英夫：未充填部を有するサンドイッチ部材の基本的な力学特性、第3回合成構造の活用に関するシンポジウム, pp. 13-18, 1995. 11