

**汎用ロール材利用の小エレメント式
サンドイッチ構造と実構造物への適用**
AN APPLICATION OF SANDWICH COMPOSITE ELEMENTS USING LIGHT GAGED STEEL
TO THE WALLS OF UNDERGROUND PIT

辻井正人* 沖本真之** 高野良広*** 吉住俊彦**** 篠崎晴彦***** 赤星哲也*

by Masato TSUJII, Masayuki OKIMOTO, Toshihiko YOSHIZUMI,
Yoshihiro TAKANO, Haruhiko SHINOZAKI, Tetsuya AKAHOSHI

A new type of sandwich composite elements using light gaged steel is proposed by the authors in order to save labor in construction of small-to-medium scale underground pits. The present paper describes the process of the actual development of the proposed structures, including the concepts of planning and design with structural experiments and examinations of installation.

Weld connection of this small elements is flexible enough to build the complicated walls of underground pit. Using light gaged steel is expected to simplify the process of prefabrication. In experimental study, it turned out that this sandwich composite elements showed the similar shear strength to reinforced concrete(RC) like other composite structures. In addition, corner connection structural details between composite members and RC members are proposed, which are experimentally proved to have satisfactory rigidity. After the actual installation, it is proved that the present composite structures save labor considerably.

1. まえがき

鋼板とコンクリートによるサンドイッチ構造は、その高い耐荷能力・止水性、更に現場施工の省力化（鋼板の型枠・鉄筋兼用機能）等の面から、近年注目されている構造形式である。また、1992年には「鋼コンクリートサンドイッチ構造設計指針（案）」¹⁾が土木学会により発刊されている。本構造形式の土木構造物への適用は従来、沈埋トンネル²⁾、ケーソン³⁾等、形状の単純な大規模構造物を対象としてきた。

筆者らは、製鉄プラント基礎建設の中、工事の省力化を目指したサンドイッチ構造の適用を検討してきた。製鉄プラントの物流は空間的に3次元的に錯綜することが多く、ピット構造物、特に深度3～10m程度の中小規模の地下型基礎が数多く計画される。また、製鉄プラントにおけるピット構造物は、底板、壁、上版から構成される上、複雑な形状が多く、通常の鉄筋コンクリート（以下RCとする）による築造は労働集約型工事となるため多くの人手間を要し、省力化工法の開発を最も必要とする構造物の一つと考えられる。そのため、地下ピット構造物に焦点を当て、以下に示す理由により、サンドイッチ構造の開発対象を地下ピットの壁体部位に絞ることとした（図-1参照）。

*	工修	新日本製鉄㈱	技術開発本部	土木建築技術部（〒299-12 千葉県富津市新富20-1）
**		新日本製鉄㈱	技術開発本部	鋼構造研究開発センター（同上）
***		新日本製鉄㈱	技術開発本部	土木建築技術部（同上）
****	工修	新日本製鉄㈱	技術開発本部	鋼構造研究開発センター（同上）
*****	工修	新日本製鉄㈱	君津製鉄所	設備部（〒299-11 千葉県君津市君津1）

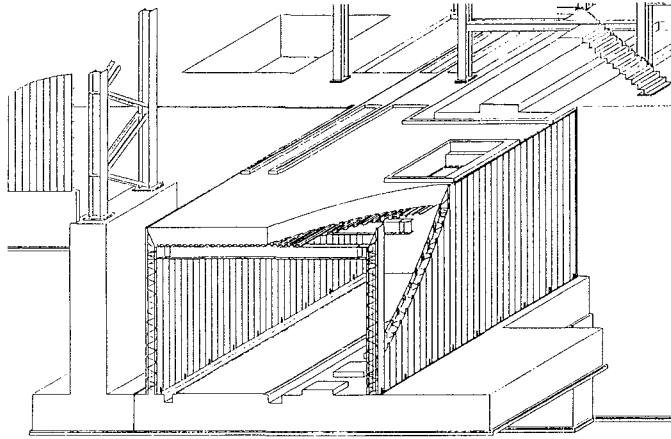


図-1 サンドイッチ構造を用いたピット構造物の概要

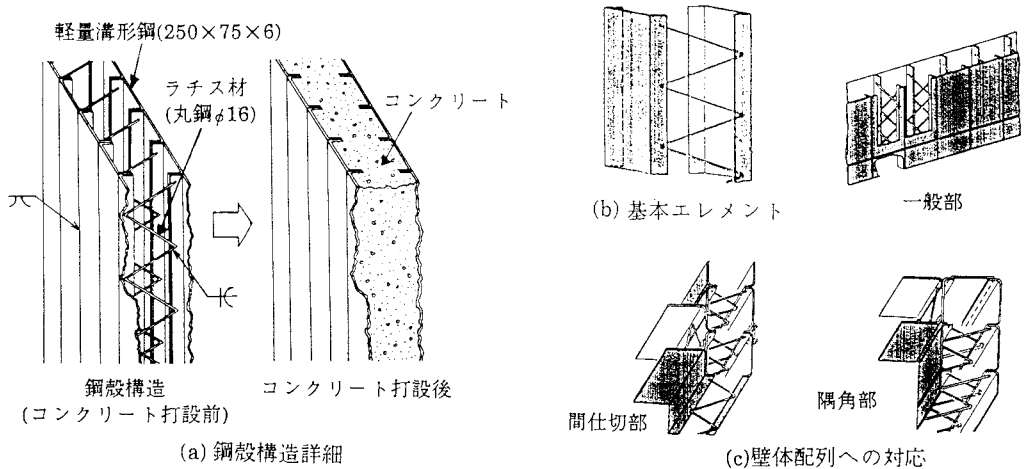


図-2 汎用ロール材利用の小エレメント式サンドイッチ構造の概要

①壁体部は、型枠必要面積（側面積）が大きいため外殻を型枠機能を発揮する鋼板で構成すれば、省力化のメリットが大きい。

②底版及び上版は、機械設備が直接据付くため複雑な断面形状となり、サンドイッチ構造を適用すれば、外殻鋼板の加工度が高くなる。また、型枠必要面積が小さく経済的でない。

本報告は実構造物の設計者の立場からピット構造の壁体へサンドイッチ構造を適用するため行ってきた種々の検討、室内試験、実構造物への試験適用等、一連の取組みについて述べるものである。

2. 汎用ロール材利用の小エレメント式サンドイッチ構造の概要

地下ピット構造物の壁体にサンドイッチ構造を適用するにあたって以下の2点を考慮して、図-2に示す汎用ロール材利用の小エレメント式サンドイッチ構造を案出した。

①設備基礎の壁は単純矩形や円形ではなく機械との取り合い上、屈曲した平面配列となる。これに対応するには、短冊状の小エレメントを基本構造とし、これらの組合せによって壁体を形成すれば複雑な平面配列を簡易に実現できる。

②一般に、サンドイッチ構造では内部コンクリートと外殻鋼板のずれ止めや鋼板の座屈防止のため鋼板の加工度が高くなり、RC構造に比べてコスト高となる。従って、外殻構造を一般の汎用ロール鋼材にて構成し、加工度を低減することが効果的である。

この構造は、軽量溝形鋼を両側の外殻鋼板として用い、鋼材量極小化とコンクリート充填の施工性確保の観点から棒鋼（丸鋼）を間隔保持材としてラチス状に組み、軽量溝形鋼のリップにグループ溶接した鋼殻構造としている（図-2（a））。尚、間隔保持材には形鋼リップとの溶接性及び加工精度を考慮して異形棒鋼を用い丸鋼を採用した。この比較的単純な基本エレメント（図-2（b））を形鋼同士の溶接により連結すれば、複雑な壁体配列に対応することが容易となる（図-2（c））。尚、本構造では、先のラチス材にせん断補強筋としての機能、その軽量溝形鋼のリップへの溶接取付部にコンクリートとのずれ止め機能、また軽量溝形鋼のリップに座屈防止機能を期待している。

この構造体をピット構造物の壁に適用した場合、壁体自身は合成構造（サンドイッチ構造）の一種であるが、ピット構造物全体としては底版、上版をRC構造とする混合構造として捉えることができる。そのため、構造上の力学特性に関して以下の課題を検討することが重要であると考えた。

- ①サンドイッチ構造単体の力学特性の評価。
 - ②RC構造である底版、上版と本構造である壁体の隅角接合部の力学特性の評価。
- 以下に各課題への具体的検討内容について詳述する。

3. サンドイッチ構造単体の力学特性について

(1) 既往の知見と今回の構造実験の必要性

サンドイッチ構造の力学的特性については多くの報告がなされており、鋼材とコンクリートとのずれ止めが十分であれば荷重増大に伴う剛性の低下も小さく⁴⁾、RC構造とほぼ同様の考えで耐力評価が可能であることが示されており、圧縮鋼板、圧縮側コンクリートが互いに圧壊や座屈を抑制する効果を発揮すること⁵⁾、また、降伏荷重から最大荷重までの強度増加が大きくじん性に富むこと⁶⁾等が報告されている。

先述した通り、今回のサンドイッチ構造は、ラチス材、その溶接取付部、軽量溝形鋼のリップに各々せん断補強筋、コンクリートとのずれ止め、座屈防止の機能をもたせている。よって、この構造形式でのせん断耐力特性を確認するため、ラチス材の取付間隔を変化させて構造実験を行い、設計上の限界状態に関して既往のRC構造の耐力評価式と照査しながら考察を行った。尚、曲げについては、4. にて後述するフレーム解析結果から、壁体腹部でなく底版及び上

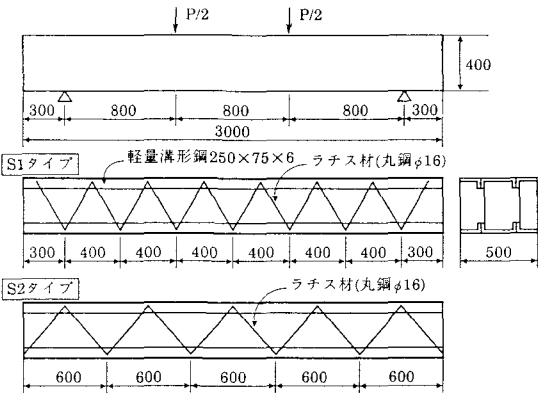


図-3 せん断試験用供試体

表-1 供試体の材料試験結果

供試体	コンクリート 圧縮強度	丸鋼 降伏引張強度
S1タイプ	295kgf/cm ²	0.2%オフセット 3ピース平均
S2タイプ	270kgf/cm ²	3860kgf/cm ²

版との隅角接合部にて発生することが推定されたため、隅角接合部の曲げ試験にて安全性を照査することとし、壁体単体の単純曲げ試験の実施は今回割愛した。

(2) 実験概要

せん断試験における供試体を図-3に示す。ラチス材（丸鋼SR235、φ16）の取付間隔を40cmと60cmとし、供試体軸方向に対してラチス材の傾きを変化させた2種類（各々S1、S2タイプ）である。尚、ラチス材の丸鋼と軽量溝形鋼の溶接仕様は、ラチス材が引張力を受けた時に、丸鋼の降伏荷重においても溶接部が破壊しないように決定している。せん断スパン比は、設計対象とする地下ピットの試設計によるせん断力、モーメントの比から2と設定した。試験は、2点荷重方式とし、供試体中央部のたわみ、軽量溝形鋼及びラチス材の歪を測定した。尚、供試体両端部には、鋼板張り等によるずれへの特別な拘束は行っていない。また、内部コンクリートはS1、S2タイプについては設計基準強度が270kgf/cm²のものを使用した。表-1に各材料試験の結果を整理する。

(3) 試験結果と設計式の考察

図-4に試験後の各供試体のひびわれ発生状況を示す。S1、S2両タイプ共にせん断破壊の特徴である斜めひびわれが発生している。両タイプの斜めひびわれはラチス材を横断しており、ひびわれと部材軸がなす角度は両者共30°程度であった。このことから、通常のRC構造で軸方向のせん断補強筋が密に配置された場合の角度30°前後¹⁾とよく一致しているため、ラチス材によるせん断補強効果が有効に働いていることが推定できる。

図-5に荷重と供試体中央部のたわみの関係を示す。図中の直線は弾性理論により求めた計算値である。

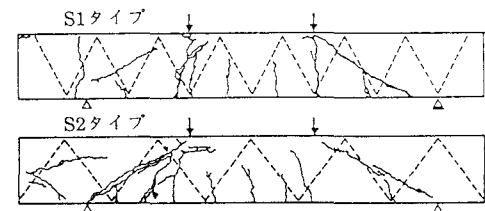


図-4 せん断試験後のひびわれ発生状況

表-2 せん断試験時の状態変化点の特徴

	載荷重 P(tf)		現象の特徴
	S1	S2	
P ₁	20.0	18.1	曲げひびわれの発生
P ₂	29.6	38.8	RC理論弾性直線からの離脱点
P ₃	76.5	59.0	斜めひびわれの発生
P ₄	108.0	87.6	ラチス材の降伏

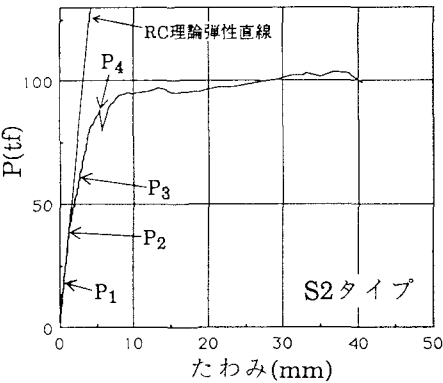
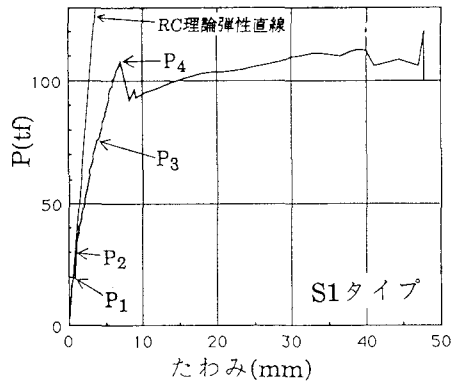


図-5 せん断試験の荷重P～たわみ曲線

せん断補強として機能するラチス材の取付間隔が小さいS1タイプの方が大きな耐荷力を有する結果となった。本図に併記した $P_1 \sim P_4$ はこの荷重～たわみ曲線及び試験時のひびわれ伸展の観察から得られた状態の変化点であり、表-2に各々の状態変化の定義とそれに対応する載荷重を示した。この中で、曲げひびわれの初期発生と考えられる P_1 は、サンドイッチ構造の場合、外殻部が鋼板で覆われているため、通常のRC構造の使用限界となる曲げひびわれの幅は使用上問題とならないことから、これを除いた $P_2 \sim P_4$ が、耐力を検討する上での基本となる限界状態を規定するものと考えられる。

以下に、これらの変化点に関し、RC構造に対する強度評価式と対比させながら考察を加える。

〔 P_2 ；RC理論弾性直線からの離脱点；鋼殻のリブとコンクリートの付着降伏〕

この変化点は、断面下端において鋼殻（軽量溝形鋼）のリブとコンクリートの付着が切れ始めた状態であると考えられる。コンクリートから鋼殻への応力伝達は鋼殻のリブとコンクリートの付着、及び間隔保持材取付部の支圧とせん断が負担するが、特に鋼殻のリブとコンクリートの付着は施工性にも左右され易く応力伝達への期待度が低いため、載荷初期の段階から付着が切れ始めるものと推察される。この仮定に基づけば、図-6より鋼殻とコンクリートの付着力 T_r は、次の(1)式で求められる。

$$T_r=2n \cdot H \cdot L \cdot f_b \quad (tf) \quad \cdots \cdots \cdots (1)$$

ここに、 n ；供試体断面下端のリブ本数

H ；リブの高さ7.5cm

L ；載荷点から供試体支点までのリブ長さ
今回は80cm

f_b ；鋼板とコンクリートの付着強度

($f_b=0.4 \times 0.6 \times f_c^{2/3}$ ；コンクリート標準示方書⁷⁾)

f_c ；コンクリートの圧縮強度

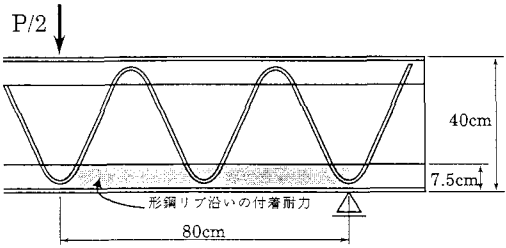


図-6 コンクリートと軽量溝形鋼リブの付着

(1)式より求めた付着力が軽量溝形鋼の引張力に伝達すると仮定して形鋼の弾性歪を導き、荷重～歪測定結果を用いて載荷重 P_{cal} を算出した結果を実験値 P_2 と比較して表-3に示す。これより、計算値は実験値をやや下回る結果となった。この差は間隔保持材（ラチス材）取付部の支圧の影響度等が考えられ、今後の定量的検討が必要であるが、設計上は上式にて安全性が確保されるため特に問題ないと判断した。

この状態までは、供試体全体の変形は急激な変化を現さないため、本変化点において設計の限界状態を規定する必要はないと考える。

〔 P_3 ；斜めひびわれの発生〕

この状態に対しては、RC構造を対象とした斜めひびわれの発生応力 f_v を規定する各種の評価式が提案されている。図-7に各種の提案式（ACIの式、岡村の式⁹⁾、荒川の式⁹⁾）をもとに算定した斜めひびわれ発生強度 P_{cal} と実験値 P_3 との関係を示す。図より、岡村の式による強度算定値が試験値を比較的好く推定している。岡村の式は、斜めひびわれの発生及びその進展に影響を及ぼす主なパラメータはコンクリートの圧縮強度 f_c 、せん断スバ

表-3 算定値～試験値の照査(P_2 ;載荷重)

供試体	算定荷重 $P_{cal}(tf)$	試験荷重 $P_2(tf)$	$\frac{P_2}{P_{cal}}$
S1タイプ	23.5	29.6	1.26
S2タイプ	22.2	38.8	1.75

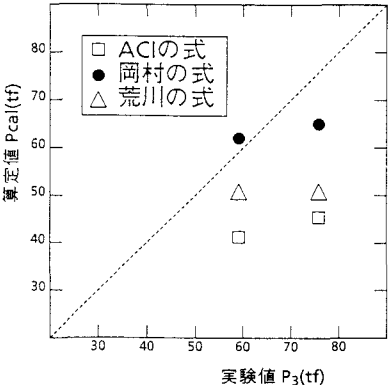


図-7 算定値～試験値の照査

(P_3 ;斜めひびわれ発生時載荷重)

ン a、梁の有効高さ d、引張鉄筋（ここでは軽量溝形鋼）比 p_w であると考えて、せん断強度を次式にて表している。

$$f_v = 0.94 f_c^{1/3} \cdot \left(0.75 + \frac{1.4}{a/d} \right) (1 + \beta_p + \beta_d) \quad (\text{kgf/cm}^2) \dots\dots(2)$$

$$\text{ここに、} \beta_p = (100 p_w)^{1/2} - 1 = 0.511$$

$$\beta_d = (1/d)^{1/4} - 1 = 0.257$$

$$a/d = 2$$

また、この状態以降も荷重～たわみ曲線は大きな変化を現さず、さらに大きな耐力の発現がみられていることから、本状態は設計上、特に考慮すべき終局限界状態とはいえず、荷重増大時の過渡的な変化点であると考えられる。

〔 P_4 ；終局破壊へつながるピーク値〕

この荷重に到達後、急激な荷重低下を起こすことなく変位が増大しており、鋼材（鋼殻あるいはラチス材）の降伏による鋼殻とコンクリートのずれが顕著に現れたためであると考えられるが、急激な破壊形態に至らないのは、鋼材の塑性域での粘り強さや鋼殻に拘束されたコンクリート内の応力拡散によるものと推察される。

図－8は S1 タイプにおける引張側ラチスの荷重と歪の関係を示した結果である。これによれば、斜めひびわれ進展直後（ $P=77\text{tf}$ ）にラチスの一部に急激な歪増大がみられ、当該ピーク荷重（ $P=108\text{tf}$ ）において全ラチスが一挙に降伏していることがわかる。これより、本荷重においてラチスのせん断補強効果が限界に達したものと判断される。

せん断補強筋の効果を表す式として Ritter-Morsh のトラス理論がある。これは、せん断補強筋をトラスの引張腹材、コンクリートを圧縮弦材、引張弦材を軸方向鉄筋とする考えに基づいている。ここで本状態を規定するせん断耐力が、せん断補強筋降伏時のせん断耐力 V_2 と先の斜めひびわれ発生剪断耐力 V_1 との和で表されると考えれば、せん断耐力 V は次式のように表される。

$$V = V_1 + V_2 \quad (\text{tf}) \dots\dots\dots(3)$$

$$V_1 = b \cdot d \cdot f_v$$

（岡村の式(2)による斜めひびわれせん断耐力）

$$V_2 = A_w \cdot \sigma_w \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha) \cdot z / s \quad (\text{tf}) \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 b ；供試体の幅

A_w ；一組のラチス材の断面積

σ_w ；ラチス材の降伏強度

α ；ラチス材と部材軸のなす角度

z ；応力中心間距離

s ；ラチス材の取付間隔

上式に基づく算定荷重 P_{cal} は表－4 に示すように S1、S2 両タイプ共よく適合している。これより、鋼殻とコンクリートのずれによる影響を反映していないものの、両タイプに関しては上記理論式にて設計上、比較的精度よく耐力評価できるものと考えられる。これ以降

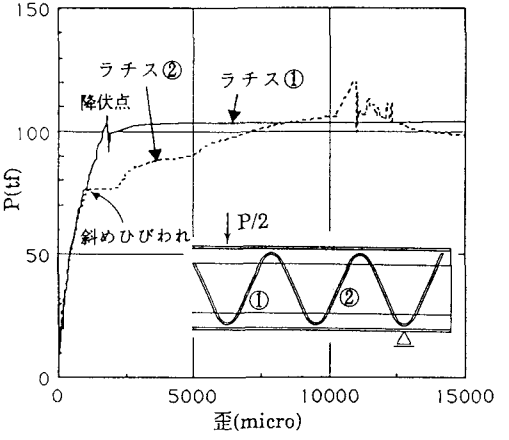


図-8 ラチス材の荷重～歪曲線(S1タイプ)

表-4 算定値～試験値の照査(P_4 ；載荷重)

供試体	算定荷重 $P_{cal}(\text{tf})$	試験荷重 $P_4(\text{tf})$	$\frac{P_4}{P_{cal}}$
S1タイプ	98.3	108.0	1.09
S2タイプ	87.3	87.6	1.00

は急激な変形増大を起こすことから、この状態が終局限界状態を現すものとして設計上取扱うことができる。

以上より、今回のサンドイッチ構造のせん断耐力は、厳密な破壊機構の解明には鋼殻とコンクリートのずれによる耐力への影響度評価等、詳細検討を要するものと考えられるが、設計上はRC構造の評価式に則ってほぼ推定できることがわかった。

本サンドイッチ構造のせん断耐力が先の考察結果によるRC構造の評価式に準ずると仮定すれば、同一断面寸法にて本サンドイッチ構造とRC構造とのせん断耐力を比較した場合、サンドイッチ構造の方がRC構造に必要なかぶりの量だけ有効断面が増加することとなるため、斜めひびわれ発生時を例にした場合、図-9（RC構造のかぶり7cm、鉄筋SD295、 $f_c=295\text{kgf/cm}^2$ 、 $a=80\text{mm}$ 、 d は鉄筋径とかぶりより各々算定）に示すような両構造の耐力差が現れる。

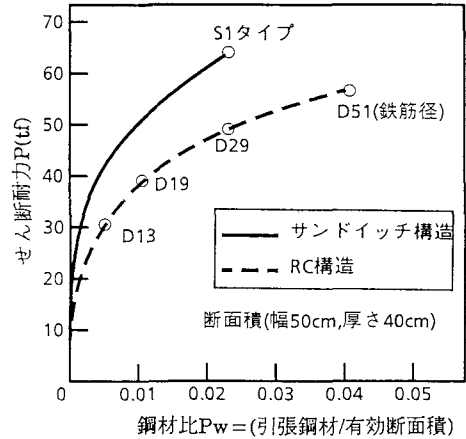


図-9 サンドイッチ構造とRC構造の斜めひびわれ発生耐力の比較 (岡村の式による算定値)

4. RC構造との隅角接合部の曲げ強度評価について

(1) 接合部の必要機能と接合形式の提示

RC構造とサンドイッチ構造との接合部については、橋梁の分野では橋桁について実構造への適用がなされた例¹⁰⁾があるものの、地下構造物の分野でしかも構造物の隅角部を対象としたものについては報告事例が非常に少ない。サンドイッチ構造同士の隅角接合部の検討が数種報告^{11), 12)}されているのみである。ピット構造物に適用するにあたっては、事前にコンクリート打設した底版上にサンドイッチ構造壁体を建込むため簡潔な接合形式を考案し、この部位の力学特性を把握する必要がある。壁体と底版及び上版との隅角接合部には回転剛性が大きく（部材間角度の変化が小さく）、確実に力を伝達できる力学特性を持たせるのが望ましい。そこで、図-10に示す次のタイプの接合形式に着目し、実験によって隅角接合部の曲げ強度特性を評価することとした。尚、壁体部材にはS1タイプを採用している。

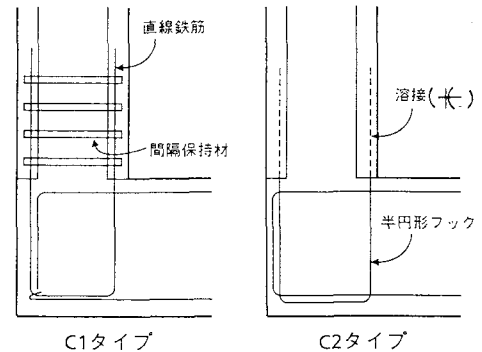


図-10 隅角接合部の2形式

①C1タイプ・・・壁体端部の軽量溝形鋼のリブへの間隔保持材取付部とRC構造（底版、上版）から立上った直線鉄筋との間でコンクリートを介して力を伝達させる形式。

②C2タイプ・・・壁体端部の軽量溝形鋼に溶接した半円形フックとRC構造（底版、上版）の端部配筋を半円形フックにしたものとを重ね継手とした形式。

C2タイプでは、サンドイッチ構造壁の鋼殻の内側に鉄筋溶接する必要があるため加工度が上昇する上、コンクリート打設後の底版上に鋼殻を設置する場合にこの溶接が困難であるため、壁体と底版の隅角接合部への適用には不向きである。今回は壁体と底版の接合はC1タイプ、壁体と上版の接合はC2タイプにて対応することを想定して各形式の回転剛性及び安全性の照査を主な検討対象とした。

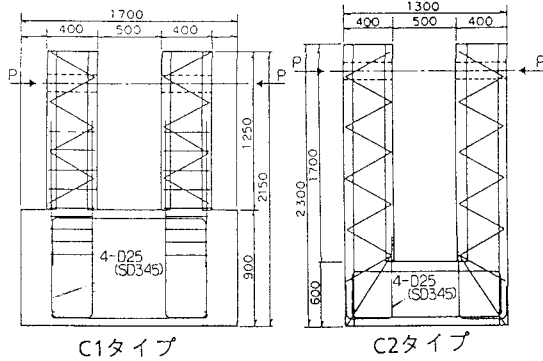


図-11 隅角接合部の曲げ試験供試体

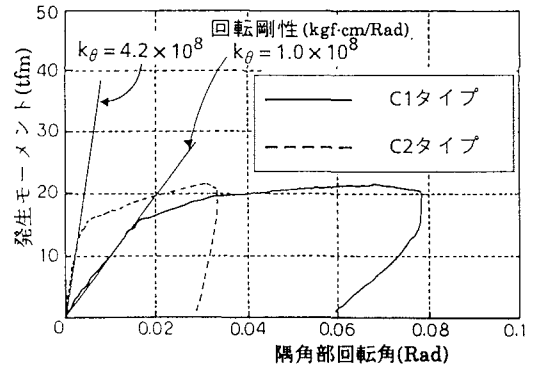


図-12 載荷モーメント～隅角部回転角曲線

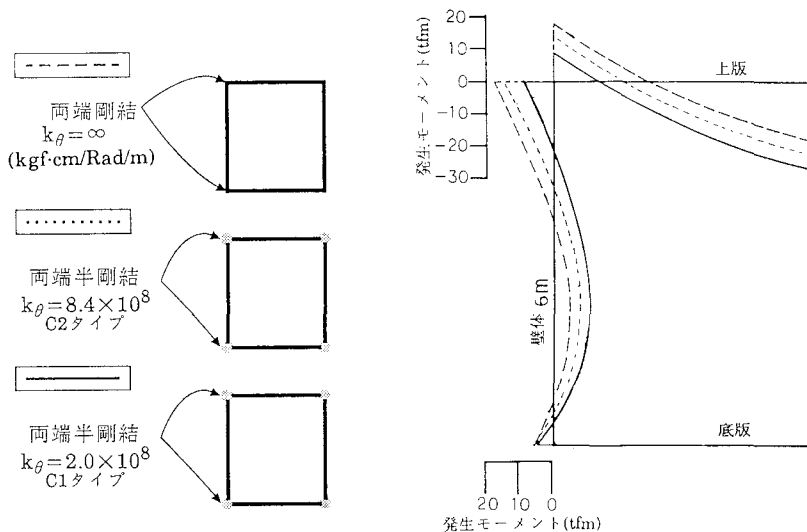


図-13 回転剛性値(試験結果)を導入した壁体解析

(2) 実験概要

図-11に隅角接合部の曲げ強度試験に準備した2種類(C1、C2タイプ)の供試体を示す。供試体の断面は、サンドイッチ構造壁体の適用対象とするビット構造物での隅角接合部の挙動を実際のレベルで補足できるように実大寸法としている。尚、供試体の厚さは50cmとしている。

隅角接合部の回転角は、これを構成する壁体及びRC版の外側面に変位計を取り付け整理している。

(3) 実験結果と曲げ耐力の評価

実験で得られた載荷曲げモーメントと隅角接合部の回転角との関係を図-12に整理する。これより以下の点が指摘できる。

- ① C1、C2タイプ共に約22tfm(1m厚さでは約44tfm/m)の曲げ耐力を示し、適用対象とするビット構造物での、隅角接合部を剛結として算定される単位m当たりの設計曲げモーメント6tfm/m、17tfm/mを十分な安全率をもって確保している。

②隅角接合部の回転剛性 K_{θ} ($=M/\theta$, M ; 載荷曲げモーメント , θ ; 隅角接合部の回転角) は、C 1、C 2タイプで各々 $1.0 \times 10^8 \text{ kgf} \cdot \text{cm/rad}$ 、 $4.2 \times 10^8 \text{ kgf} \cdot \text{cm/rad}$ の値を示し、C 2タイプはC 1タイプの約4倍の回転剛性を確保している。

尚、1タイプでは載荷の比較的初期の段階からサンドイッチ構造壁面とRC版面との境界において乖離が見受けられたが、C 2タイプでは終局まで外観上の変化は観察されなかった。

C 1タイプでは回転剛性がC 2タイプのものに比し小さく、しかも壁体とRC版境界面に乖離が生ずるのは、壁体とRC版間での曲げモーメント伝達に關与するサンドイッチ構造壁体の軽量溝形鋼とRC版より延びる鉄筋との間でのコンクリートを介した荷重伝達が、軽量溝形鋼リブへのラチス材取付部とRC版の鉄筋との間での比較的大きなずれを前提とした機構で行われていることに起因するものと考えられる。

この実験で得られた2タイプの隅角接合部回転剛性を適用対象であるビット構造の隅角接合部に設定し、発生断面力を算定した結果を図-13にまとめる。尚、同図には隅角接合部を剛結として算定した結果も比較のため示している。C 1、C 2タイプの回転剛性を用いた曲げモーメントの算定結果はいずれも剛結を前提とするものに対して、隅角接合部で小さくまた、隅角接合部を結ぶ一般部(壁体部)で大きな値となっている。また、壁体と上版との隅角接合部の回転剛性が、壁体と底版のそれに比べて曲げモーメントに対し、鋭敏に關与する傾向にある。このことから、当初の計画通りC 1タイプを壁体と底版との接合部に、また、回転剛性大きなC 2タイプを壁体と上版との接合部に適用することとした。

5. 実構造物への適用

上記検討の結果、図-14に示すビット構造物の壁体に本サンドイッチ構造を試験的に適用することとした。尚、実構造物に適用したサンドイッチ構造の仕様は、先の各構造実験に用いたS 1タイプかつC 1タイプと同一である。尚、腐食については建築基礎構造設計指針の鋼管杭設計に準じて、鋼殻部である軽量溝形鋼の外側1mmを腐食代¹³⁾として考慮している。また、仮設時のコンクリート打設応力については、リブを支点とする軽量溝形鋼のフランジ部の曲げ抵抗及びラチス材の引張抵抗にてとらせた設計を行い、コンクリート打

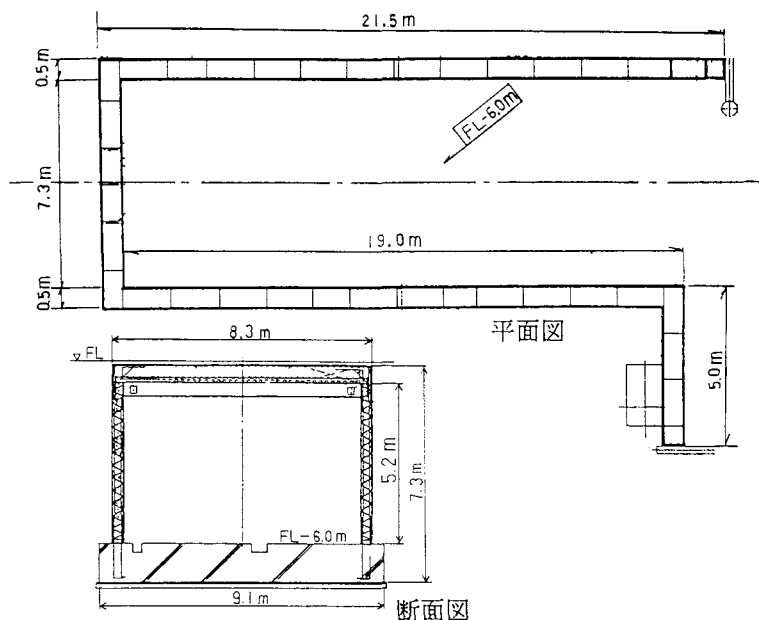
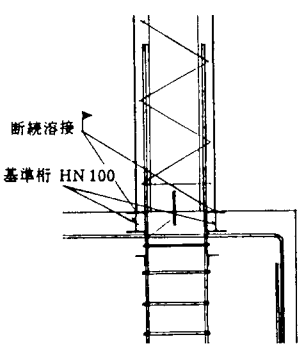
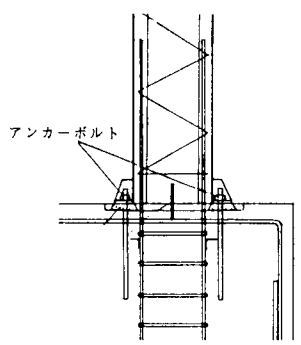
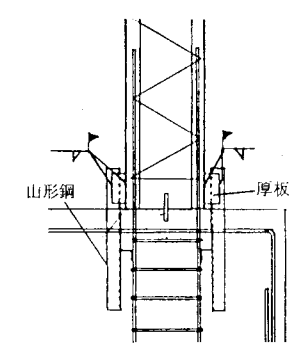


図-14 適用対象のビット構造物概要図

表-5 鋼殻パネルの建込方法

I1タイプ	I2タイプ	I3タイプ
		
基準桁(埋込H形鋼)のフランジに鋼殻パネルを溶接する方法。	底版のチッピング後、パッド打、アンカーボルトの据付による鋼殻パネルの建込み方法。	底版から起立する山形鋼と鋼殻パネルに溶接した厚板とで精度を調整する方法。

設試験により安全性を照査した。さらにコンクリートの打継目となる隅角接合部の止水材の選定、鋼殻建込時の風荷重に対する補剛材溶接の必要長設計等を実施し、実構造物への適用の安全性を確認した。

実構造物への適用では、現場でのハンドリング性を考慮し、工場にて小エレメントを10枚程度全溶接継手した鋼殻パネル（高さ5.5m、幅約2.5m、重量約2tf）を1単位として現場建込工事を実施することとした。この場合、以下の問題点から鋼殻パネル建込に対する高い精度の必要性が予想された。

①C 1タイプの隅角接合部にて、壁体の間隔保持材と底版からの立上がり直線鉄筋が干渉しないように所定の位置に精度よく鋼殻を設置する必要がある。

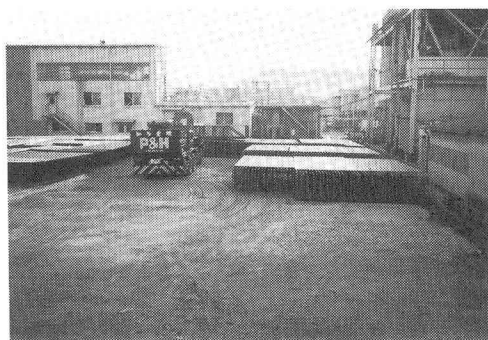
②型枠支保工を不要化するため、鋼殻パネルの上端に上版支持梁を取付け、その上にデッキプレートを載せる工法を採用した。よって、鋼殻パネルの建込精度は鉄骨工事並の精度が要求される。

建込精度の確保のため、表－5の3種類の建込方法を提案し、建込精度，施工時間，経済性等に関して比較検討した（詳細は省略）。その結果、I 3方式が最も経済的であつ建込誤差を吸収し易いため、実機化において採用することとした。尚、精度調整板の溶接長は仮設時の風荷重に対して算定している。

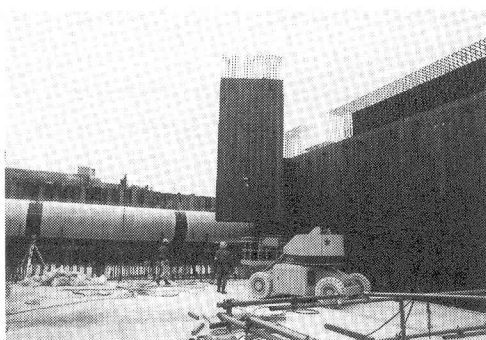
写真－1に実施工における鋼殻パネルの仮置状況、建込状況、パネル間溶接、及び建込完了時のピット全景を示す。

本工事は当初、不慣れによる多少の手戻りが生じたが、施工の慣れに従って特に大きな問題もなく順調に遂行することができた。今回は、サンドイッチ構造の省力化効果を定量的に把握するため、施工歩掛を調査した。その調査結果を一般のRC構造壁と比較して図－15にまとめる。図中、RC構造物の溶接工とは、機能上、ピット壁面に埋込む金物類の溶接を意味する。結果から本サンドイッチ構造の適用により通常のRC構造に対して約80%の省力化効果が確認できた。これは、RC構造築造に占める作業量が多い型枠工と鉄筋工がサンドイッチ構造採用により不要化できたためであり、サンドイッチ構造の施工面での優位性が顕著に現れた例である。

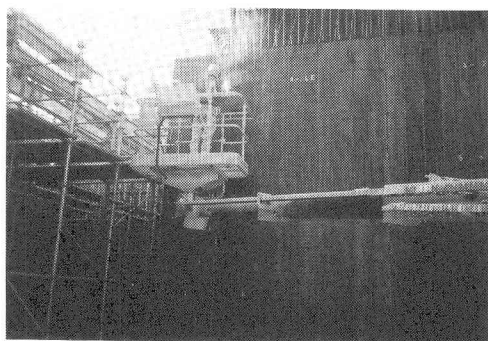
尚、コスト面では設計上必要最小限の断面をもつRC構造に比べて約30%程度割高となった。コスト差が大きくなったのは、適用対象の壁に対して、今回採用のサンドイッチ構造が安全性を大きくとった仕様としていたことに起因するものである。但し、工場における加工度の低減等、経済性における改善の余地は今後も残されていると考えられる。



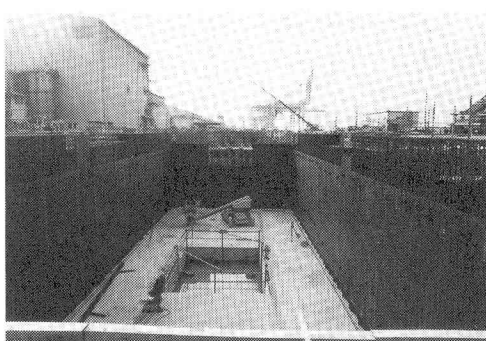
ア-鋼殻パネルの仮置



イ-鋼殻パネルの建込



ウ-パネルの溶接



エ-建込完了時の全景

写真-1 実構造物への適用状況

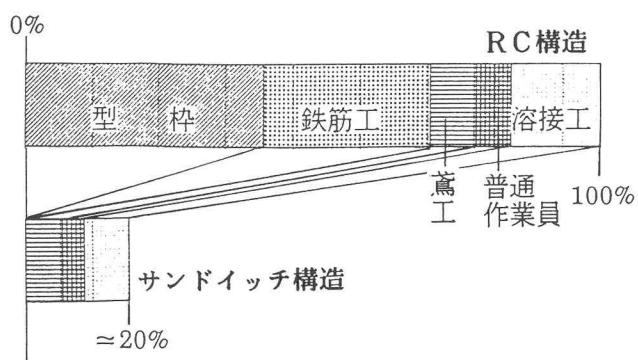


図-15 施工歩掛調査結果

6. 結論及び今後の課題

工事の省力化を狙いに、汎用ロール材利用の小エレメント式サンドイッチ構造のビット構造物の壁体部への適用に際して、構造性能評価及び実施を行った。今回の検討で得られた知見を以下に示す。

- ①本構造単体のせん断試験を実施した結果、断面強度は既存のRC構造に対する設計式（斜めひびわれは岡村の式、終局破壊状態は岡村の式＋トラス理論式）にて設計上、推定できる。
- ②RC構造との接合箇所である隅角部の構造形式2種類（直線鉄筋によるC1タイプと半円形フックによるC2タイプ）について曲げ試験を実施した結果、両者共、設計上必要な曲げ耐力を発揮することが確認できた。但し、回転剛性に関してはC2タイプの方が高い剛性を確保できる。
- ③実構造物への試験適用の結果、通常のRC構造による築造に比べて80%程の現場省力効果が発揮されることが確認できた。

今後、本サンドイッチ構造の適用範囲の拡大、経済性の追求のためには、以下に示した検討課題が挙げられる。

- ①各構成要素（軽量溝形鋼，ラチス材）の構造細目を変化させた構造実験の実施による、鋼殻とコンクリートのずれの構造部材耐力への影響度の定量的把握。
- ②今回は安全性確認を主体としたため検討を割愛したサンドイッチ構造単体の単純曲げ試験の実施による曲げ破壊機構の検討。
- ③隅角接合部形式の構造実験によるより高い剛性を発揮する構造の検討。
- ④試験適用した構造物壁体部の止水状況、腐食状況等の観測の実施。
- ⑤エレメント間溶接を減少できる継手形式の改善等による経済性の追求。
- ⑥地下ビット構造物だけでなく他の構造物への適用を念頭にした本サンドイッチ構造の適用性の拡大（例えば、部材軸直角方向の剛性評価による2方向版としての強度検証等）。

最後に、本構造の構造実験実施において尽力して頂いた環境エンジニアリング㈱の関係各位、並びに実構造物への適用にあたり、鋼殻パネルの建込、コンクリート打設等で貴重な御助言を頂いた奥村組・不動建設JV、大成建設・フジタ・若築建設JVの関係各位に対し深い感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会：鋼コンクリートサンドイッチ構造設計指針（案），1992年7月。
- 2) 平島：沈埋函に合成構造を初採用，日経コンストラクション，PP.19～21,1990年1月。
- 3) 花岡・篠原・香川：東京湾横断道路鋼殻ケーソンの設計，土木学会第45回年次学術講演会概要集，PP530～531.1990。
- 4) 栖原・西牧・松石・竹下・岩田：鋼板とコンクリートから構成されるサンドイッチ式複合構造の強度に関する研究，日本造船学会論文集第141号，PP.205～216，1977。
- 5) 大野・塩屋・大内田・長谷川：氷海向け石油掘削プラットフォーム用鋼・コンクリート合成構造の構造特性と施工性，コンクリート工学年次論文報告集12-2，PP.23～28，1990。
- 6) 高橋・太田・内田・石川・日野：静的载荷を受ける鋼・コンクリート合成部材の弾性曲げ挙動に関する実験的研究，土木構造・材料論文集第4号，PP.39～48，1989年1月。
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書・設計編，1991年9月。

- 8) Okamura H. and Higai T. : Proposed Design Equation for Shear Strength of Reinforced Concrete Beams without Web Reinforcement, Proc. of JSCE, NO.300, 1980.8.
- 9) 荒川：鉄筋コンクリートはりのせん断抵抗に関する研究，北大工学部研究報告25号，1961年3月．
- 10) 日本鋼構造協会：複合構造，複合斜張橋，PP.97～104 JSCCレポート NO.4, 1987年5月．
- 11) Rungrojsaratis V. AND Ueda T. : DESIGN METHOD FOR CORNER CONECTION BETWEEN SANDWICH AND OPEN-SANDWICH COMPOSITE MENBERS SUBJECTED TO BENDING MOMENT, 土木学会論文集NO.402/V-10, PP.169～177, 1989.
- 12) 横田・清宮：鋼・コンクリートハイブリッド構造のL型接合部の力学特性，コンクリート工学年次論文報告集12-2, PP.17～12, 1990.
- 13) Ohsaki Y. : Corrosion of Steel Piles Driven in Soil Deposite, Research Report 81-04, Dept. of Architecture, Tokyo Univ., 1981.

(1992年9月21日受付)