

有孔合成版部材の曲げ挙動と孔周辺の応力状態

FLEXURAL BEHAVIOR AND STRESS DISTRIBUTIONS AROUND RECTANGULAR OPENINGS
OF STEEL-CONCRETE COMPOSITE SLAB

太田俊昭* 日野伸一** 奥石正巳*** 鬼束俊一**** 黒田一郎****

By Toshiaki OHTA, Shin-ichi HINO, Masami KOSHIISHI, Syun-ichi ONITUKA and Ichiro KURODA

This paper describes the flexural behavior of TSC composite slab having two rectangular openings. The slab is made of steel plate-concrete composite construction with pyramidal shear connectors. From the test results, it can be seen that the properties of the narrowest cross section could be used for safe and simple design except at the corners of openings. However, a considerable stress concentration, which cannot be evaluated by an ordinary RC beam theory, occurs around the corners. It can be sufficiently estimated by the finite element analysis using three-dimensional Aranea-elements. Here it is possible to insert arbitrary axial reinforcements in any direction of the rectangular prism element. The analytical results indicate that it may be more effective to make haunches at the corners of the rectangular openings for stress relaxation.

1. まえがき

市街地などにおける配電管用大型地中縦坑には、図-1に示すように送電機器の搬入・搬出やメンテナンスのための出入口となる孔を有する数層の床構造が設けられている。従来、この床構造には、場所打ち施工によるRC床版が採用されてきたが、その施工に対し、コンクリート打設にともなう型枠、支保工、配筋等の現場作業の煩雑さや、下段より一段毎に順次施工せざるを得ないことによる工期の長期化が問題とされている。特に、市街地の場合には周辺環境への影響のため工事が夜間に限定されるなど長期化が必至となっており、現場作業の簡略化、急速施工が強く望まれている。

これに対して、工場で配筋がプレハブ化され、かつ底鋼板が型枠を兼ねる各種の鋼・コンクリート合成床版が開発されており^{1), 2)}、上記の問題解決のため、その採用が考えられる。特に、ピラミッド状のジベルを介して鋼板とコンクリートを合成した立体トラス型ジベル付き合成床版^{3), 4)}(以下、TSC合成床版と略称する)は、合成後の耐荷性能はもとより、コンクリート打設時においても鋼板、上側鉄筋及びジベル斜材から成る立体構造として所要の曲げ耐力と曲げ剛性を保有するため、支保工が不要になり、したがって一度に数段の床版施工が可能となるなど、大幅な工期の短縮、現場施工の省力化が期待できるものである。

-
- * 工博 九州大学教授 工学部土木工学科 (〒812 福岡市東区箱崎6丁目10番1号)
 ** 工博 九州大学助教授 工学部土木工学科 (〒812 福岡市東区箱崎6丁目10番1号)
 *** 工修 清水建設(株) 土木本部技術第1部 (〒108 東京都港区三田3丁目13番16号)
 **** 九州大学大学院 工学研究科 (〒812 福岡市東区箱崎6丁目10番1号)

以上より、本研究はTSC合成床版の大型地中縦坑の床版への適用を目的として、施工時ならびに完成後の各構造系における有孔TSC合成版部材の曲げ挙動について実験的検討を行うものである。あわせて、孔周辺の応力状態についても3次元有限要素解析を行い、考察を加えることにする。

2. 実験方法

(1) 供試体

従来の地中縦坑に用いられるRC床版では、軸方向鉄筋を縦坑側壁に定着した両端固定支持版として設計、施工されている。これに代わるTSC合成床版の場合には、構造上および施工上の観点から、側壁に取り付けた鋼製ブラケットまたはRCコーベルの上に床版を設置する単純支持形式が有利と考えられる。

以上より、実験は単純、固定の両支持形式の有孔TSC合成床版と、曲げ部材としてこれとほぼ等価な断面諸元を有するRC床版に対して行ったが、本論文では単純支持形式の場合に限定して耐荷性能を検討する。供試体の断面諸元は、図-2に示すように実構造のおよそ1/4のスケールとした。したがって、幅69cm、スパン2,08m、版厚およそ13.0cm(RC床版は15.0cm)の一方方向スラブに対して、幅と長さが19x52cm、23x26cmの長方形孔が2ヶ所設けられている。これらの孔幅の全幅に対する比はそれぞれ0.28、0.33となっている。ただし、底鋼板の板厚や鉄筋径については最小寸法の制限から必ずしも実構造と相似にはなっていない。また、実験では、実構造に対して危険側サイドに立って、孔隅角部周辺での応力状態をより明確に表現できるように隅角部には特にハンチ、補強筋を用いていない。両者の主要諸元を表-1に、また使用材料の試験結果を表-2にそれぞれ示す。

(2) 荷重試験

荷重試験は、TSC床版に対してはコンクリート死荷重および施工時荷重を想定した架設系、また

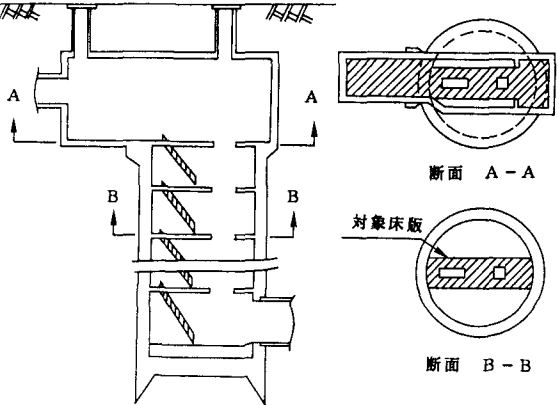


図-1 地中縦坑概略図

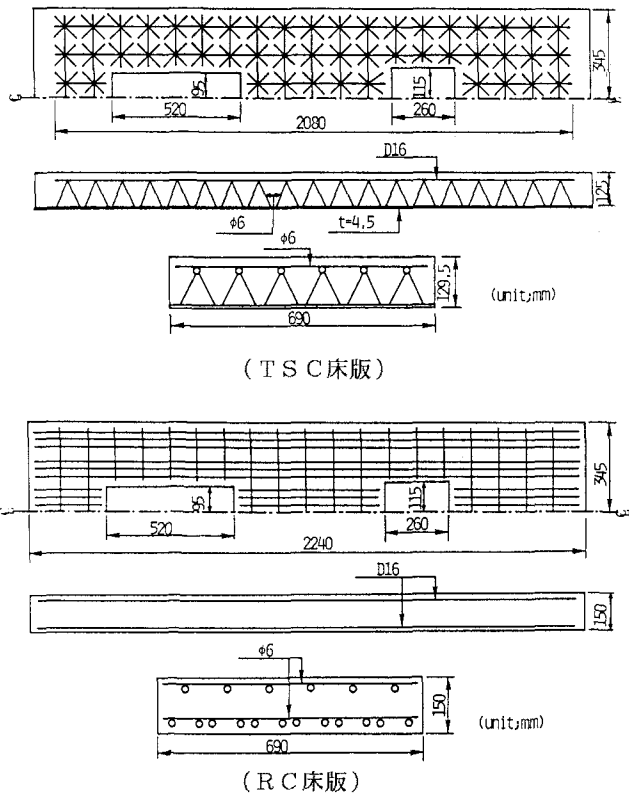


図-2 供試体の断面および配筋図

表-1 供試体の断面諸元

供試体	幅 (cm)	全高 (cm)	有効高さ (cm)	引張鋼材比 p (%)	圧縮鋼材比 p' (%)	設計曲げ耐力 M_u (tf·m)	換算断面2次モーメント I_e (cm ⁴)
TSC床版	69	13	12.5	3.6	1.4	9.55	25600
						6.36	17000
RC床版	69	15	12.5	2.8	1.4	8.59	22000
						5.73	14700

(注) M_u 、 I_e の上段は全幅断面による値、下段は最小幅断面による値。(コンクリート引張強度無視)

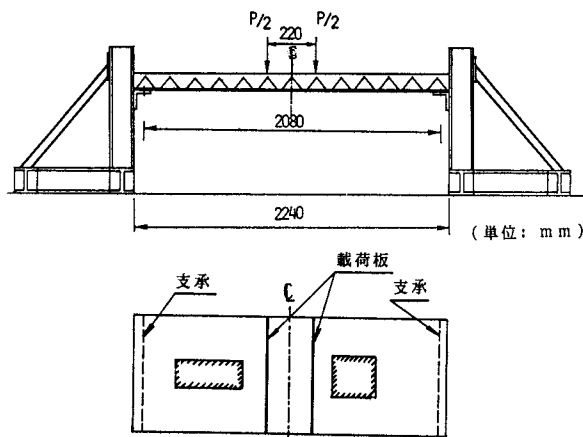


図-3 載荷試験装置と載荷条件

合成後のTSC、RC両床版の完成系について、それぞれ実施した。試験装置および載荷条件の概要を図-3に示す。実構造の設計荷重は架設系、完成系ともに等分布荷重であるが、実験の都合上、曲げモーメントモードが類似した載荷点間距離22cmの2点線載荷とした。また、端部は底鋼板を支承フレームに鉛直方向にボルト止めし、上側鉄筋は自由とした。荷重は、架設系に対して0.2t刻みで1.0tまで、完成系に対しては0.5t刻みで破壊までそれぞれ漸増した。各荷重レベルにおいて、供試体のたわみ、鋼材およびコンクリートのひずみなどを測定した。

3. 架設系での曲げ挙動

架設系におけるTSC床版に荷重1.0tを載荷したときの底鋼板、上側鉄筋のスパン方向ひずみの分布をそれぞれ図-4

、5に示す。図中の○、▲、□印は右側の孔縁より幅方向にそれぞれ1, 5, 16cm離れたスパン方向の各測定ラインを表している。また、供試体の縦横比は3以上の一方方向スラブであることより、実験値とともにRCはり理論に基づいて計算した結果をあわせて図中に示した。ここで、一点鎖線は変断面はりとして各断面の断面2次モーメント（実幅断面）を、また破線は有孔部の最小幅（46cm）からなる等断面はりとしての断面2次モーメント（最小幅断面）をそれぞれ用いた値である。底鋼板のひずみは両端のボルト締結による拘束のため、完全な単純支持のモードとはならず、孔隅角部を除き、全体的に計算値よりも過小な値を示している。しかし、測定位置よりさらに孔縁に近い隅角部付近ではかなりの応力集中が生じているものと予想される。

上側鉄筋のひずみ分布は幅方向のラインにほとんど依存せず、最小幅断面の計算値に近い典型的な単純モードを示しており、架設系において、両孔間のスパン中央部の鉄筋の荷重負担はほとんど期待できないことを示唆する結果といえよう。また、たわみ分布は、最小幅断面の等断面はりとしての計算値よりもやや大きい結果を示していた。

以上より、設計にあたり、基本的には中央の有孔部分を除いた両外側すなわち最小幅断面で荷重に抵抗するものとし、さらに孔周辺部については架設系での鋼板応力度が許容応力度に対してかなりの余裕があるも

表-2 材料強度

コンクリート		鉄筋 (D16)		鋼板 (t=4.5mm)	
圧縮強度 (kg/cm ²)	弾性係数 (kg/cm ²)	降伏強度 (kg/cm ²)	引張強度 (kg/cm ²)	降伏強度 (kg/cm ²)	引張強度 (kg/cm ²)
303	2.23×10 ⁵	3380	5280	2910	3860

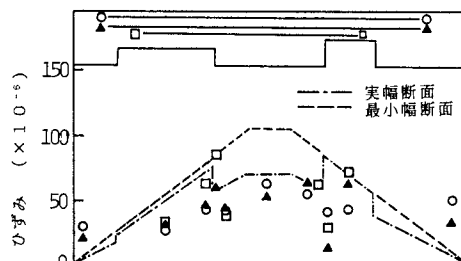


図-4 底鋼板のひずみ分布

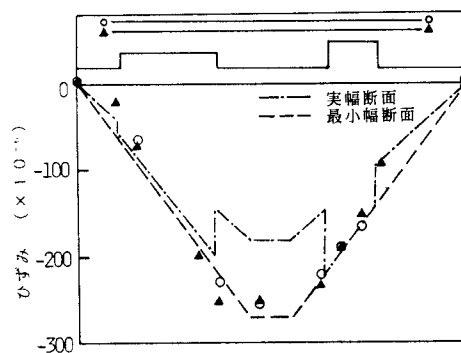


図-5 上側鉄筋のひずみ分布

の、応力集中緩和のためのハンチ、補強鉄筋の配置などの処置を講じる必要があると考えられる。

4. 完成系での曲げ挙動

(1) 応力、変形挙動

完成系（合成断面）でのスパン方向各ラインにおける底鋼板（TSC床版）および下側鉄筋（RC床版）のひずみ分布を、目視でコンクリートにひびわれが発生する前（ $P = 4t$ ）とひびわれ発生後（ $P = 13t$ ）の2ケースについてそれぞれ図-6、7に示す。なお、目視によるコンクリートのひびわれ発生荷重はTSC床版が6.0t、RC床版 5.0tであった。図中の計算値は、前者（ $P = 4t$ ）に対してはコンクリート断面の引張抵抗を考慮し、また後者（ $P = 13t$ ）に対してはそれを無視した換算断面（ $n = E_s/E_c = 9.42$ ）について架設系（図-4）と同様に求めたものである。図中の測定ラインはTSC床版については架設系と同様であり、RC床版については右側の孔縁よりそれぞれ 2、8cmのものである。

TSC床版では、ひびわれ発生前後でひずみ分布性状に変化は特に認められず、孔縁より5cm以上離れたライン（図中の○、▲印）では実幅断面のはりとしての計算値とほぼ等しい結果を示している。しかし、孔縁に近いライン（図中の□印）では孔隅角部付近でひずみが一不連続になり、隅角部での応力集中の影響が推測される。また、左側孔縁よりスパン中央寄りに 7cm離れた位置において荷重の増加に対するひずみ変化（図-8参照）をみると、架設系と同様に両孔間の中央付近での荷重負担は小さく、外側の応力が卓越しているのがわかる。そして、これらの応力はコンクリートの引張抵抗を無視した実幅断面による応力算定では、終局荷重の40%以上の荷重

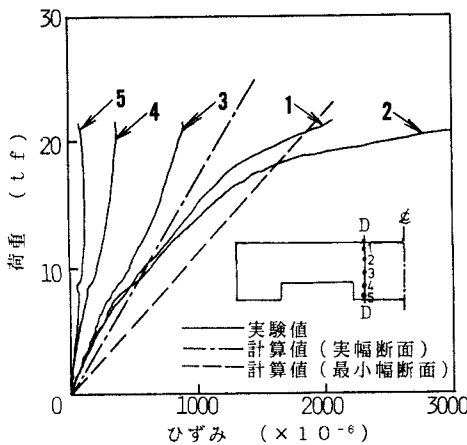


図-8 TSC床版の底鋼板ひずみ変化

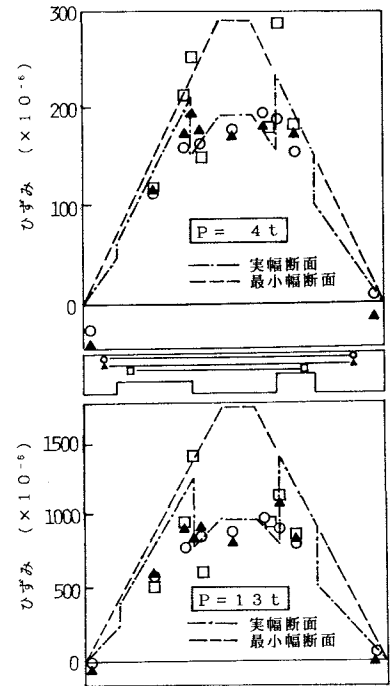


図-6 TSC床版の底鋼板ひずみ

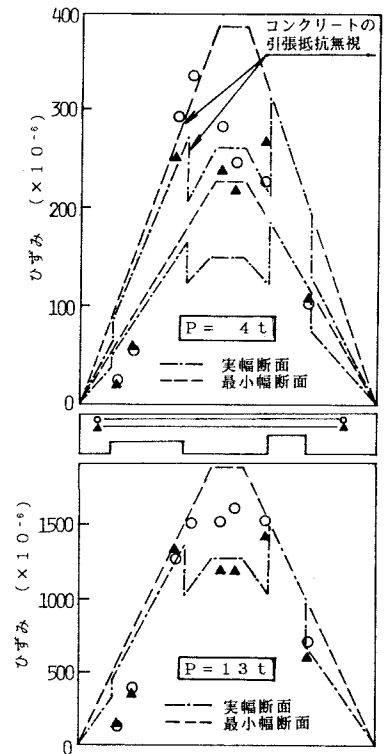


図-7 RC床版の下側鉄筋ひずみ

レベルにおいて危険側の評価を与えることを示している。したがって、孔隅角部周辺の局所的な応力集中を除き、中央の孔部分を除外した最小幅断面として、応力評価することが設計上安全かつ実用的であると考えられる。

一方、RC床版では、 $P=4t$ で実験値がコンクリート断面有効の計算値を大きく上回り、引張抵抗無視の計算値と概ね一致する結果を示している。このことより、RC床版では既に $P=4t$ で目視で発見できなかったひびわれが隅角部付近に発生していたものと考えられる。

図-9にTSC、RC両床版のスパン中央点における荷重-たわみ曲線を、コンクリートの引張抵抗無視の換算断面による計算結果とともに示す。これより、TSC床版に比べてRC床版の方がひびわれ発生以後の剛性低下がやや大きく、またTSC床版のたわみは最小幅断面による弾性計算値とほぼ一致することが明らかである。

(2) ひびわれと終局耐力

図-10に、RC、TSC両床版の破壊後のひびわれ状況を示す。ひびわれの発生は、いずれも右孔の内壁隅角部から始まり、側面に比べて孔内壁へのひびわれ進展が先行的に認められた。特に、TSC床版に比べてRC床版にその傾向が顕著に現れ、またひびわれ幅およびその分散状態においても同様であった。また、供試体の最終破壊は載荷点付近（全幅断面）のコンクリートの圧壊に伴う曲げ破壊であった。もちろん、破壊時には引張鋼材は降伏していた。終局耐力の比較を表-3に示す。ここに、耐力の計算値とは、表-2の材料強度を用いて通常のRC断面に対する曲げ破壊モーメントから求めたものである。最終破壊位置が全幅断面であったことから、実験値は、最小幅断面の計算値に比べて45~70%程度大きく、実幅断面の計算値とはほぼ等しくなる。ただし、両者の比がRC床版の場合若干低い値を示すが、これは前述したように、孔内壁へのひびわれ集中による影響と思われる。

5. 孔周辺の応力状態

(1) 3次元有限要素解析

TSC合成版の実設計に対しては、基本的にはRC構造と同様の慣用計算で、はり理論や版理論、格子理論による全体解析を行うことが妥当と考えられる。しかし、本構造のように開口部を有し、断面形状の急変するような構造に対しては前述の解析で

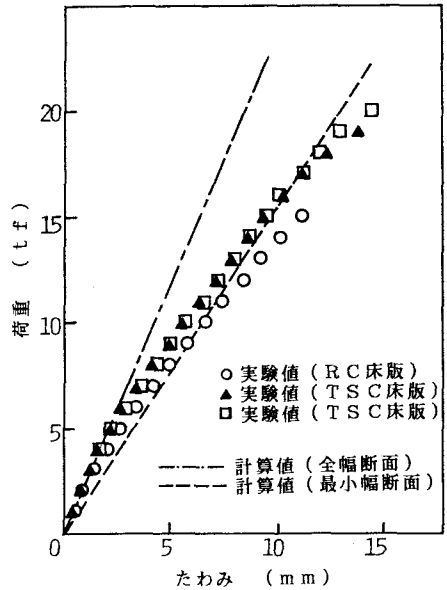


図-9 スパン中央のたわみ

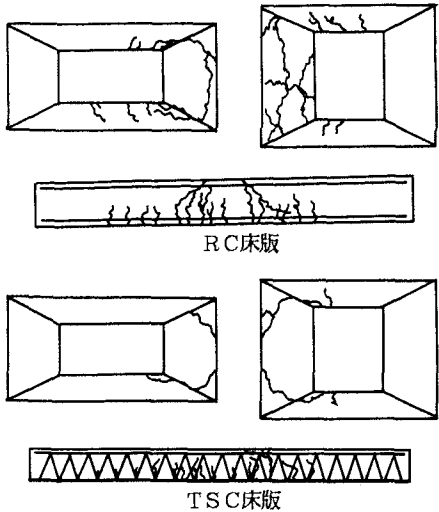


図-10 ひびわれ状況

表-3 終局耐力

供試体	実験値 (tf) ①	計算値(tf)		実験値/計算値	
		(最小幅断面) ②	(全幅断面) ③	①/②	①/③
RC床版	16.4	11.3	17.0	1.45	0.96
TSC床版	21.6	13.7	20.5	1.58	1.05
	23.5			1.72	1.15

はその影響を十分に把握することができず、有限要素法などによる数値解析に依らねばならない。ここでは、本構造がコンクリート中に複雑な形状の補強材が多数配置されていることを考慮し、図-1 1 に示すように、20節点アイソパラメトリック要素内に任意の方向に複数の補強部材を挿入できる3次元分割要素を用いた有限要素解析⁵⁾により、孔周辺の応力状態を明らかにし、実験結果との比較検討を試みる。なお、解析法の詳細については文献5)を参照されたい。

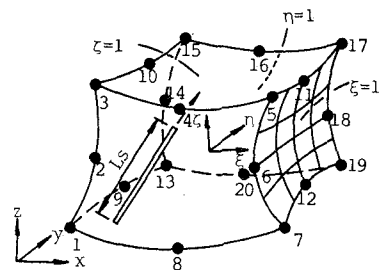


図-1 1 3次元有限要素

解析モデルは、図-1 2 に示すように、構造の対称性を考慮し、床版の1/2部分を11分割した。1要素あたりの節点数は20で、各節点にはx, y, z方向の各変位u, v, wの3自由度を有し、また内挿補強材は軸力部材として軸方向変位のみを考慮した。一例として、要素3の詳細を図-1 3 に示す。全節点数は140、ガウスの数値積分点は1要素あたり27である。なお、解析はコンクリートおよび鋼板を等方性材料と仮定した弾性解析であり、鋼とコンクリートの相対すべりは無視した。また、以下に示す結果はすべて荷重4tに対するものである。

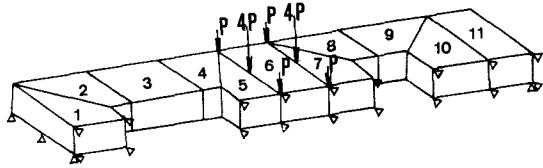


図-1 2 解析モデル

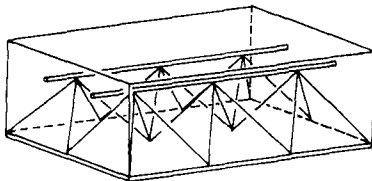


図-1 3 要素3の詳細

(2) 実験および解析結果の検討

図-1 4 にTSC合成版の底鋼板に接したコンクリートの最大主応力分布の解析値を示す。底鋼板の応力状態もこれに類似していると推定されるが、RC構造の配筋状態と異なり、底鋼板が等方性であることから、全体的にスムーズな応力の流れ、そして孔隅角部付近での応力集中の様子がよく表現できている。ただし、両側の孔にはさまれた中央部、特に孔縁付近では、鋼板とコンクリートとの相対すべりに伴う応力の低下が実際には起こっているものと推測される。

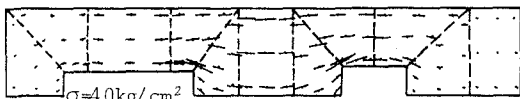


図-1 4 引張縁コンクリートの最大主応力分布

図-1 5、1 6 はそれぞれ孔縁および幅員中央からの距離に対する底鋼板のスパン方向ひずみ分布について、実験値と解析値の比較を示したものである。ここで、破線は通常のコンクリート全断面有効のRCはりとしての計算値である。図より、隅角部より遠く26cm離れたA-Aラインでは幅方向にほぼ様な応力分布となっており、FEM解析値やはり理論値とも特に差はない。これに対して、孔隅角部より3.5cm離れたB-Bラインでは孔縁付近の応力集中が実験値、FEM解析値ともに顕著に認められる。孔縁から1.0cmの位置のひずみは孔縁より遠く離れた位置のひずみに対して実験値で30%増、FEM解析値で55%増である。また、孔隅角部より中央側にそれぞれ1.0、7.5cm離れたC-C、

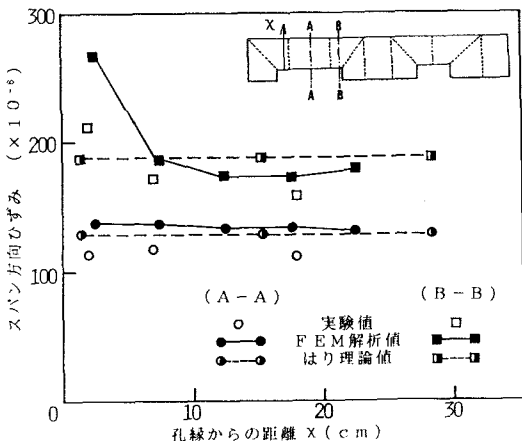


図-1 5 孔周辺の底鋼板ひずみ

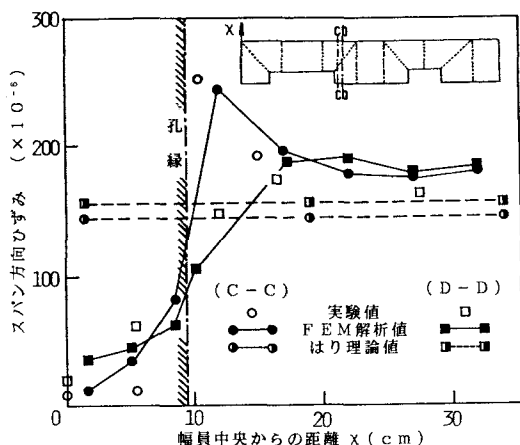


図-16 孔隅角部の底鋼板ひずみ

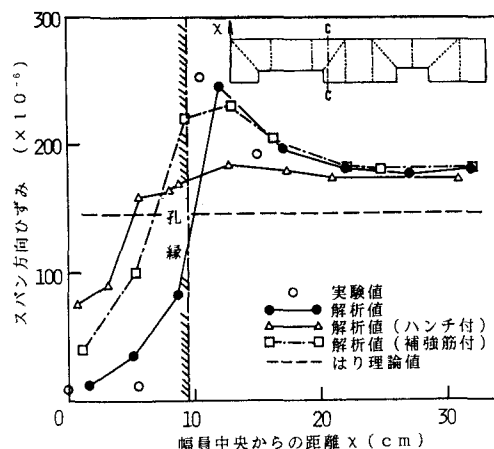


図-17 隅角部の応力集中の緩和

D-Dラインでは、隅角部付近で応力分布が不連続となっており、特に孔縁に近接したC-Cラインほどその変化は急激である。そして、いずれも孔縁から幅方向外側に離れた位置では、実験値、FEM解析値ともにはり理論値に近似してくるのがわかる。角に丸みのある正方形孔を有する平板が一様引張（圧縮）応力を受けるとき、隅角部縁応力の平均応力に対する比が3にも及ぶとの報告⁶⁾から推測しても、本実験の場合、より孔縁に近い位置では実測よりはるかに過大な応力集中が起こっているものと思われる。

次に、この隅角部付近の応力集中の緩和対策について考察する。図-17は、図-16に示すC-Cラインについて、4隅の孔隅角部に、コンクリート標準示方書⁷⁾に規定するように斜めの補強筋 D16を上下2段配置した場合と、同じく隅角部に孔幅の1/4のハンチを設けた場合の応力状態をFEM解析によって比較したものである。図より、隅角部にハンチを設けることによる応力集中の低減効果はきわめて顕著に認められ、孔縁付近の応力が孔から十分離れた位置の応力と大差ない程度までに平均化されているのがわかる。また、ハンチを設けず、補強鉄筋を配置した場合にはさほど効果のないことも明らかにされた。

以上より、さらに孔縁付近の応力集中を把握するには、特に隅角部周辺での要素分割をさらに増加する必要があるが、本合成床版の曲げ挙動を把握し、また孔隅角部周辺での応力状態をかなりの程度まで解明するうえで、ここに用いた有限要素解析はほぼ満足しうる結果を与えたものと考えられる。

6. まとめ

本研究は、TSC合成版構造の地中大型縦坑の床版への適用を目的として、長方形の孔を有するTSC合成床版の架設系、完成系での曲げ挙動を検討するとともに、孔周辺部での応力状態について3次元有限要素解析の結果と合わせて検討したものである。本研究により得られた成果を要約すれば、以下のとおりである。

- (1) 孔隅角部周辺の応力状態を除けば、床版の設計は、慣用のRC理論を用いて、有孔部を除く両外側の断面（最小幅断面）のみ有効としておこなうのが、安全かつ実用的である。
- (2) 孔隅角部周辺では慣用計算値よりも大きい応力が実測され、測定位置よりさらに隅角部付近では、通常のRC理論で評価できない応力集中が予想される。
- (3) 完成系においては、TSC床版の方がRC床版より孔周辺でのひびわれ分散性が優れており、終局耐力もRCはりに準じた算定法の適用が可能である。
- (4) 本研究で用いた任意に複数の補強材を内挿できる3次元有限要素解析法は、少ない要素分割にも関わらず、孔周辺の応力状態を比較的精度よく把握できる。
- (5) その解析結果によれば、孔隅角部の応力集中を緩和する上で、ハンチの設置はきわめて効果的である。

が、補強鉄筋のみ配置してもさほど効果は期待できない。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、宮崎大学 今井富士夫助教授には貴重な助言を頂いた。また、実験に際し、東京電力（株）送変電建設本部 日向泰山前副部長ならびに奥山一夫前副長には多大のご支援、御協力を賜った。ここに記して深く謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 前田幸雄：土木における合成構造、コンクリート工学、Vol. 21、No. 12、pp. 13-22、1983. 12.
- 2) 土木学会：鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン、pp. 153-157、1989. 3.
- 3) 太田俊昭、日野伸一、浜田純夫、今金真一、今井富士夫：トラス型ジベルの押し抜きせん断挙動、合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集、pp. 119-124、1986. 10.
- 4) 太田俊昭、日野伸一、奥石正巳、日向泰山：立体トラス型ジベルを有する合成版構造の力学特性と設計法に関する研究、構造工学論文集、Vol. 34A、pp. 297-305、1988. 3.
- 5) 太田俊昭、奥石正巳、日野伸一、南英明、日向泰山、奥山一夫：3次元Aranea要素を用いた複合構造の有限要素解析、九州大学工学集報、Vol. 61、No. 5、pp. 589-595、1988. 10.
- 6) 西田正孝：応力集中、森北出版、pp. 409-410、1967.
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書（設計編）、pp. 114-115、1986. 10.

（1989年10月2日受付）