

円形立坑開孔部周辺の応力分布状態

STRESS DISTRIBUTION SURROUNDING THE CIRCULAR SHAFT'S CUT-OUT

中野雅弘*・梶尾雄吾**・滝口正洋***・西岡尚夫****

By Masahiro NAKANO, Yugo KAJIO, Masahiro TAKIGUCHI and Hisao NISHIOKA

The joint section connecting the circular shaft and cable tunnel, that is, the cut-out section of the circular shaft, has been conventionally designed and constructed using several reinforcement methods. This is because the reinforcing bars in the circular shaft's cut-out section are cut off and the stress distribution surrounding the cut-out section hasn't been clear.

This paper aims to establish the more rational method of reinforcing the circular shaft's cut-out section. This work attempts to theoretically clarify the stress distribution surrounding the circular shaft's cut-out section, using the Finite Element Method. Result of a model experiment using resin concrete test pieces are also presented.

1. ま え が き

近年、道路交通事情の悪化、あるいは地域住民の権利意識の高揚に伴い、土木工事を取り巻く施工環境は一段と厳しさを増している。このため、多条数の通信ケーブルを収容するためのトンネル(以下、「とう道」という)は、道路を掘削せず築造可能なシールド式とう道築造工法によりその大部分が施工されている。

このシールド式とう道築造工法は、シールドマシンの据付け、発進、掘削土砂の搬出、セグメント等各種資機材の搬出入等工事中の作業に必要な発進立坑、工事中シールドマシンを方向転換させるために必要な中間立坑、シールドマシンの解体・撤去のために必要な到達立坑に分類され、現在、とう道平均長さ約700mに1か所の割合で建設されている。

これら各種の目的のために建設される立坑の断面形状は主に矩形と円形に分類されるが、円形立坑は、特に同

一立坑から複数方向へとう道を築造する必要がある場合、あるいはシールドマシンの方向転換を行わなければならない場合等に採用される。

しかし、この円形立坑ととう道の接合部である開孔部は、従来種々の補強方法で設計・施工されてきたが、開孔部周辺の応力分布状態が明らかでないため、その補強方法は必ずしも最適なものとはいえない現状にある。このため、円形立坑開孔部周辺の応力分布状態を明らかにし、開孔部周辺の合理的な補強方法を確立する必要がある。また、開孔部周辺の補強方法に関する設計基準としては、コンクリート標準示方書¹⁾があるが、スラブ、壁等の開孔部周辺の補強に関して規定しており、円筒構造物に円形の開孔部を有する補強方法は明確になっていない。

一方これに類似した研究は、下水道工事において、下水道本管に枝管をマンホールを設けずに直接取り付けするため、地中で本管に取付け孔を開ける場合の開孔部周辺の応力分布状態に関するものがある²⁾。その中で、開孔による応力集中は、「遠心力鉄筋コンクリート管のような円筒構造物に円孔を設ける場合でも、開孔部周辺の応力分布状態がほぼ一様とみなせば、平板での解析により応力集中の度合いがほぼ推定できる。」とあることから、本報告における応力解析およびモデル実験での開孔によ

* 正会員 工修 日本電信電話公社建設技術開発室土木技術部専門調査役(〒305 茨城県筑波郡大穂町花畑1-7-1)

** 正会員 日本電信電話公社建設技術開発室土木技術部調査員(同上)

*** 日本電信電話公社建設技術開発室総括担当(同上)

**** 正会員 日本電信電話公社建設技術開発室土木技術部(同上)

る応力集中についても有孔平板に関する理論³⁾とも対比することとした。

また、一般に円筒構造物が円形開孔部を有する場合の開孔部周辺の応力集中は円筒の半径、壁厚および開孔部の半径に関係するといわれている^{4),5)}。

したがって、本研究では円形立坑の施工実績を調査するとともに、とう道同士の地中接合事例を考慮して、肉厚比(立坑直径/立坑壁厚)については8~18、開孔率(開孔部直径/立坑直径)については30~100%の範囲として解析および実験を行った。

以上より、本研究では円筒構造物が円形開孔部を有する場合の開孔部周辺の応力分布状態を、理論解析およびモデル実験によって明らかにすることを試みた。すなわち、肉厚比と開孔率を変化させ、開孔部周辺の応力分布状態を理論解析およびモデル実験によって明らかにした。

2. FEM による応力解析

(1) 荷重条件

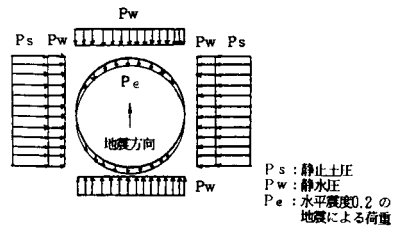
円形立坑は、常時および地震時において構造物が安全であるように設計される。設計荷重のとり方については、道路橋下部構造設計指針、ケーソン基礎の設計篇⁶⁾にも述べられているように、常時においては静止土圧+静水圧のみを対象とし、4方向より側壁に対して直角に作用させるため、円形構造物の場合いずれの点にも曲げモーメント、せん断力は発生せず、圧縮軸力のみ発生することになる。

一方地震時においては図一に示すように地震方向の静止土圧は考慮していないため偏荷重状態となり、曲げモーメントが発生するようになるため、円形構造物の場合、一般に地震時の荷重状態において断面が決定されている。このため、今回の解析では地震時の荷重状態を想定したものを採用した。ただし、水圧は地震時においても4方向より側壁に対して直角に作用するため、構造物に対して最も危険な状態となるよう水圧を考慮しない状態を想定した。

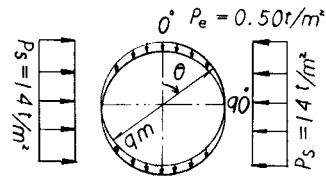
一方、水平震度0.2の地震による荷重の断面力への影響割合は、表一に示すように静止土圧による曲げモーメントの約6%であり、これを無視しても問題はないと考えられる。なお、表一の荷重状態を図二に示す。

以上より、今回の解析は図三に示すように、静止土圧のみが2方向から作用する状態で行った。

なお、開孔部周辺の応力分布状態は、静止土圧の載荷方向と開孔部の方向によって異なるものと考えられるため図三に示すように〔LOAD:A〕の場合と〔LOAD:B〕の場合について解析を行うこととした。なお、静止土圧はGL-15m以深は一定とみなしてよいといわ



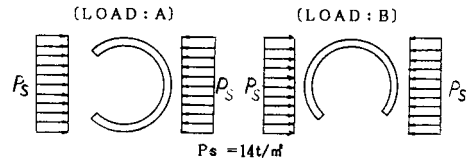
図一 地震時設計荷重



図二 静水圧を除いた地震時荷重

表一 Peによる断面力の影響割合

	$\theta=0$ 度	$\theta=90$ 度
Mpe	+ 3.491t m	- 3.976t m
Mps	-70.875t m	+70.875t m
Mpe + Mps	-67.384t m	+66.899t m
Mpe / Mps	4.9 %	5.6 %



図三 FEM 解析で採用した荷重状態

れていることから、このときの静止土圧をとり、 $P_s=14 \text{ t/m}^2$ (0.137 MPa) とした。

一方、開孔部では荷重が欠損するため、そのままでは円筒の両側から作用する荷重が不均衡になる。ここでは開孔によって生じる欠損荷重は、開孔端と交わる軸線上の荷重強度を軸線長の減少分だけ増加させた。すなわち、式(1)により荷重配分を行うこととした。

$$P = P_s \cdot \frac{L_s}{L_i} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、P: 開孔端と交わる軸線上の荷重強度

P_s : 一般部軸線上の静止土圧

L_i : 開孔端と交わる軸線の長さ(図四参照)

L_s : 一般部軸線の長さ(図四参照)

(2) 解析ケース

応力解析を行うケースは表二に示す15通りとした。なお、肉厚の相違による応力分布状態の理論解析は開孔率を50%とし、固体要素モデルで行った。

(3) モデルの形状および固定条件

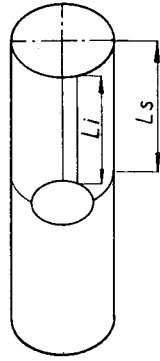


図-4 立坑の軸線長

解析対象の構造は、中央に種々の円形開孔部を有する円筒構造物である。

実際には、この円筒構造物の対称性により、図-5に示すように全体の1/4の部分をモデル化し解析を行った。この解析モデルは、円形立坑を四角形の薄肉シェル要素によりモデル化したものである。

薄肉シェル要素は、膜応力および曲げ応力を受ける薄板やシェル構造の中立面をモデル化するのに用いられる要素で、曲げ要素と膜要素を重ね合わせたものである。したがって、この要素では板厚は一定とされ、板厚方向での変形および応力は取り扱えない。各要素は変位および回転それぞれ3方向の6自由度をもつ4節点で構成される。なお、薄肉シェル要素モデルによる解析モデルの拘束条件を図-5に示す。また、解析モデルの要素分割および代表断面要素列の位置の展開図を図-6に示す。

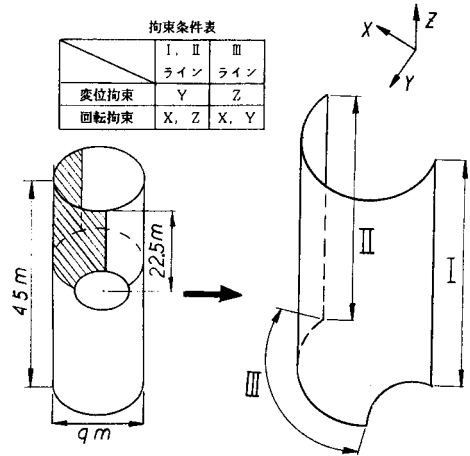


図-5 解析モデルの拘束条件

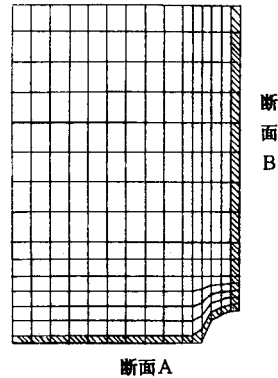


図-6 要素分割および代表断面要素列の位置(展開図)

表-2 解析ケース一覧表

ケース名	モデル名	開孔率	肉厚	要素	荷重
PL03A	PL03	30%	0.8m	薄肉シェル	LOAD A
PL05A	PL05	50%			
PL07A	PL07	70%			
PL10A	PL10	100%			
PLWA	PLW	50%×2			
PL03B	PL03	30%			LOAD B
PL05B	PL05	50%			
PL07B	PL07	70%			
PL10B	PL10	100%			
PLWB	PLW	50%×2			
PL05BN	PL05	50%	0.5	薄肉固体	LOAD B
PL05BK	PL05	50%	1.2		
HL05BM	HL05M	50%	0.5		
HL05BN	HL05N	50%	0.8		
HL05BK	HL05K	50%	1.2		

一方、肉厚の影響を検討するために用いた固体要素モデルでは8個の節点で構成される6面体要素となる。各節点の自由度は変位のための3自由度で回転は拘束されているため、要素全体では自由度が24となっている。

なお、弾性係数は $2.7 \times 10^8 \text{ kg/cm}^2$ 、ポアソン比は0.167、壁厚は0.8mとし、解析は線形弾性構造体として行った。

(4) 計算結果および考察

a) 肉厚の影響の検討

i) 三次元固体要素モデルによる解析 要素分割、拘束条件および荷重条件は(PL05B)と同様とした。ただし、相対する分布荷重の総量を合わせるために薄肉シェル要素モデルの中立軸と固体要素モデルの外周とを一致させた。

固体要素モデルを用いた計算結果のうち、代表断面Aにおける外面の面内主応力値を薄肉シェル要素モデルで解析した結果の主応力(σ_{PL})と固体要素モデルで解析した結果の主応力(σ_{HL})との比を図-7に示す。

ii) 肉厚の影響 肉厚の相違による応力の影響を

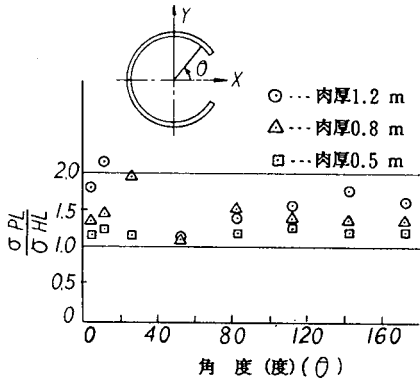


図-7 A断面における主応力比

検討するため i) において固体要素モデルを用いて解析を行ったわけであるが、今回の検討対象とする肉厚の範囲では応力にはほとんど影響がみられなかった。

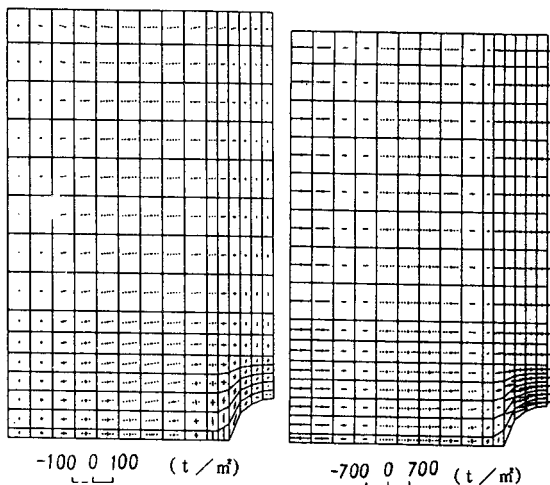
今回の解析は、固体要素モデルを肉厚方向に一層しか分割していないことはあるものの、肉厚の相違による応力への影響は小さいことおよび薄肉シェル要素モデルによる主応力値が固体要素モデルより少し大きいことより、薄肉シェル要素モデルによる解析が少しではあるものの安全側であるといえる。

以上より、本解析の条件程度の肉厚であれば、開孔部の補強を考える場合、特に肉厚の影響は考慮する必要はないと考えられることから、以下の解析は薄肉シェル要素モデルにより行ったものについて述べることにする。

b) 1円孔の応力分布状態

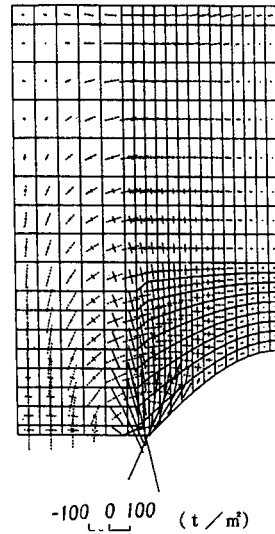
i) 開孔による応力分布状態の概要

肉厚を一定にし、開孔率を変化させた場合の応力分布状態のうち、開孔による影響が少ない場合 (PL 05 A,



(A) PL 05 A (軸応力) (B) PL 05 B (曲げ応力)

図-8 主応力線図 (展開図)



PL 10 A (軸応力)

図-9 主応力線図 (展開図)

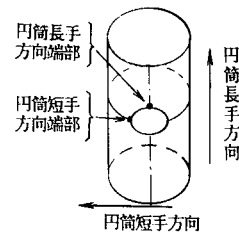


図-10 着目点の位置

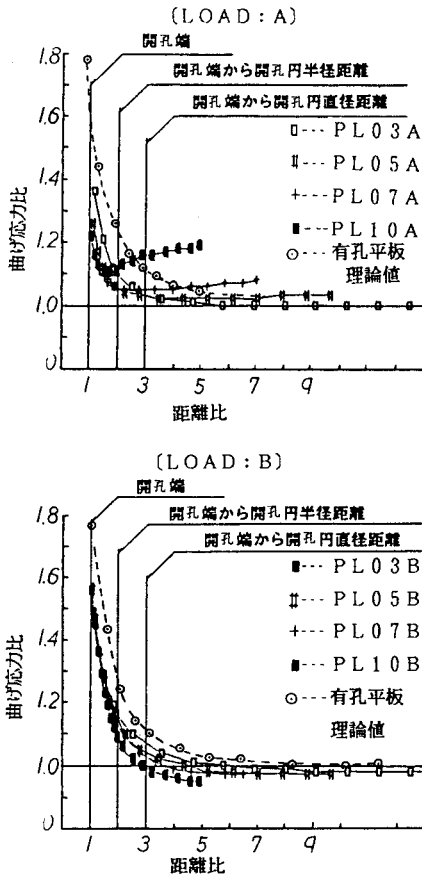
PL 05 B) を図-8 に、影響が著しい場合 (PL 10 A) の主応力線図を図-9 に示す。なお、本文中の着目点の概要を図-10 に示す。

これらの図より以下のことが明らかとなった。

① [LOAD : A] の場合 開孔部周辺では、開孔形状に沿った方向に引張軸応力が生じる。引張軸応力の最大値は、内筒短手方向端部で生じており、その方向は内筒長手方向となっている。

② [LOAD : B] の場合 開孔部周辺では、開孔形状に沿った方向に曲げ応力が生じる。曲げ応力の最大値は円筒長手方向端部で生じており、その方向は円筒短手方向となっている。また、長手方向の曲げ応力は円周方向の約 1/6 となっている。これはコンクリートのポアソン比に近く、円周方向の曲げがこれの影響で、その直角方向に現われたものと考えられる。

ii) 開孔による円周方向曲げ応力の変化 前記 2. (1) の荷重条件で述べたような設計荷重においては、主鉄筋は円周方向に配置される。したがって、この方向での曲げ応力は設計上最も影響が大きい。ここでは、円周方向曲げ応力に最も大きな変化がみられる開孔円の中心



図—11 曲げ応力比と距離比の関係 (断面B)

心を通る円筒長手方向の代表断面B (図—6 参照) に着目して開孔による円周方向曲げ応力の変化について検討した。曲げ応力比は、開孔部がない場合の曲げ応力値の最大値に対する比で表わした。曲げ応力比の基準値は本解析の条件においてリング計算で得られる最大曲げ応力値 664 t/m^2 (6.51 MPa) とした。また、距離比は開孔円の中心からの着目点までの距離と開孔円の半径との比で表わした。図—11 に代表断面Bにおける各開孔率ごとの曲げ応力比の変化状態を示す。なお、図中に一樣な曲げを受ける有孔平板の曲げ応力比の理論値を記入した⁸⁾。

これらの図より以下のことが明らかとなった。

① [LOAD : A] では開孔端での最大値は [LOAD : B] ほど大きくない一方、開孔円から離れた位置での収束値がやや大きくなっている。

これは、[LOAD : A] では開孔断面での荷重欠損が大きいことおよびその欠損した荷重を他の位置に配分しているためと思われる。ここで、[LOAD : A] における荷重の増加率をみると、1.06 (開孔率 30%)、1.11 (開孔率 50%)、1.16 (開孔率 70%) および 1.25 (開孔率

100%) となっており、開孔部から離れた位置で収束している曲げ応力比とほぼ等しい。

② [LOAD : B] では、曲げ応力比が開孔端で最大となり、開孔部から離れるに従ってほぼ 1.0 に収束している。また、曲げ応力比の増加が著しいのは開孔端から開孔円半径距離 (距離比 2) の範囲であり、開孔円直径距離 (距離比 3) 程度離れると開孔による影響はほとんど認められない。

また、曲げ応力比が最大となる円筒長手方向端部における曲げ応力比と開孔率の関係についてみると、開孔率が変化しても最大曲げ応力比には著しい変化がみられず、最大で約 1.6 であることがわかる。これらの値がある大きさをもつ要素での平均値であることを考慮して、開孔端での値を外挿により推定すると 1.7 程度になる。

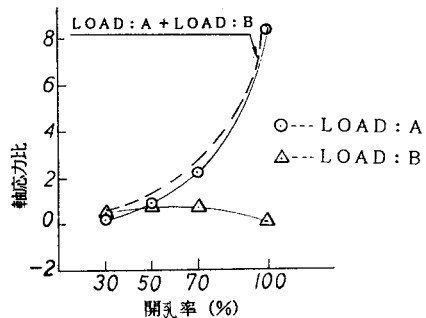
これは、一樣な曲げを受ける有孔平板での曲げ応力集中率 $1.78^8)$ とほぼ一致している。

iii) 開孔部周辺に生じる引張軸応力 開孔部周辺では開孔形状に沿った方向に引張軸応力が発生しており、円筒短手方向端部で最大となっている。また、その位置での方向は円筒の長手方向である。

図—12 は開孔率と軸応力比 (円筒短手方向端部の円筒長手方向の軸応力と開孔部がない場合のリング計算で得られる最大軸応力の絶対値との比) の関係を示したものである。なお、リング計算で得られる最大軸応力は圧縮であるが、絶対値を用いたため、軸応力比は負を圧縮、正を引張としている。この結果、[LOAD : B] では開孔率による変化は少ないが、[LOAD : A] では開孔率の増加に伴って軸応力比も著しく増加している。特に開孔率 100% の場合には、非常に大きな値となっており、補強を考える場合にも特別の配慮が必要と考えられる。

しかし、ここで注意しなければならないことは、本解析における荷重条件が曲げに対しては最も厳しい条件と

開孔率 (%)	30%	50%	70%	100%
LOAD (A)	0.18	0.81	2.19	8.27
LOAD (B)	0.46	0.63	0.67	0.04
LOAD (A+B)	0.64	1.44	2.86	8.31



図—12 開孔率と最大軸応力の関係

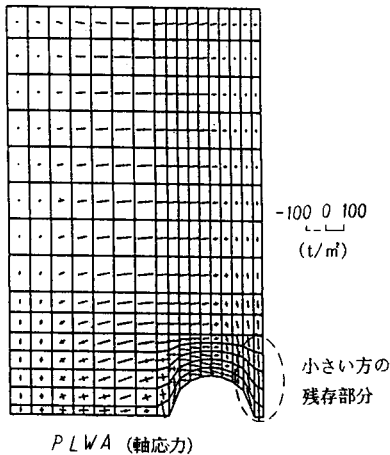
はなっているものの、軸力に対しては必ずしもそうではないことである。すなわち、本解析では相対する一方の荷重しか考えていないが、常時設計荷重の土圧や、水圧の荷重のように、円筒全周に様な荷重が作用するときには、[LOAD : A] と [LOAD : B] の両方を同時に受けるような荷重状態が最も厳しくなる。したがって、その場合には軸応力比も [LOAD : A] と [LOAD : B] によるものを重ね合わせたものと考えることができる。

図-12では破線でこの値を示した。

c) 2円孔の応力分布状態

同一水平断面に2つの開孔部を有する場合(開孔率50%, 中心角75度)の応力解析を行った結果のうち、(PLWA)について、その軸応力に関する主応力線図を図-13に示す。

この図から、開孔部周辺では1円孔の場合と同じ傾向の応力集中が生じているが、小さい方の残存部分では、長手方向に著しい引張軸応力が生じている。したがって、この部分はリングの一部としてではなく、長手方向のはりとしての挙動をすることが明らかとなった。



PLWA (軸応力)
図-13 主応力線図(展開図)

3. モデル実験

本実験は、円筒構造物開孔部の合理的な補強方法の検討に際し、FEMによる応力解析結果の妥当性を検証することを目的に実施したものであり、レジンコンクリート製の有孔円筒を供試体として荷重実験を行ったものである。

(1) 実験材料および材料特性

実際の円形立坑はコンクリートを主材料とした構造物であるが、コンクリートは完全弾性体でないこと、引張強度が小さく繰返し実験が困難なこと、成形が困難なことより、コンクリートより弾性挙動をし、引張強度が大

表-3 レジンコンクリートの配合

材料	品名	規格	配合
樹脂	不飽和ポリエステル	JIS K 6919	14%
触媒	メチルエチル・パーオキシド	—	2 phr
促進剤	6%ナフテン酸コバルト	—	1 phr
充填剤	重炭酸カルシウム	JIS K 6223	24%
骨材	細砂	2mm以下	29%
	砂利	2~5mm	33%

(注1) phr は per hundred resin の略で、樹脂100(重量)にたいする添加量をいう。
(注2) 触媒、促進剤の添加量はレジンコンクリートの硬化時間を2時間以内となるよう決定した。

表-4 強度特性および物理特性

	単位	数値
引張強度 (σ_t)	kg/cm ²	105
圧縮強度 (σ_c)	kg/cm ²	1160
曲げ強度 (σ_b)	kg/cm ²	280
弾性係数 (E_r)	kg/cm ²	2.6×10
ポアソン比 (ν)	—	0.26

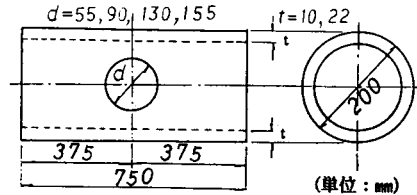


図-14 供試体の形状

きく、成形が容易なレジンコンクリートを材料として使用した。表-3にレジンコンクリートの配合を、表-4に強度特性および物理特性を示す。また、供試体の形状と寸法を図-14に示す。

(2) 実験方法

実験で荷重を載荷する場合、理論解析で使用した2方向からの等分布荷重を再現することは困難である。このため、開孔部のない円筒に等分布荷重を載荷した場合の曲げモーメントと図-15に示す線荷重を載荷した場合の曲げモーメントを比較した結果、図-16に示すように、載荷点の中心離隔角度(2φ)が60度の場合、両者は比較的合うことが判明した。このため、モデル実験では図-15に示す載荷方式を採用することとした。

載荷実験は、100トンアムスラー試験機によって行い、ひずみはレジンコンクリート供試体の内外面に貼り付け

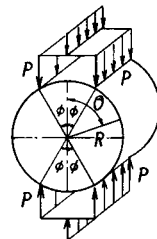


図-15 荷重の載荷方式

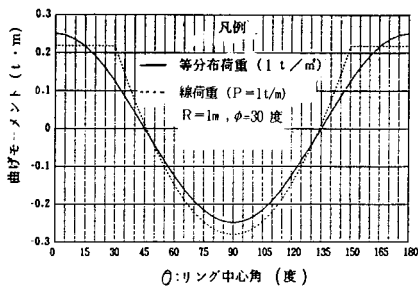


図-16 曲げモーメント比較図

たひずみゲージにより測定した。

また、理論解析は構造物を線形弾性体として行ったことからモデル実験においても弾性領域内で行う必要がある。このため、実験は、弾性領域内で行われるよう最大荷重を5 t (49 kN) とした。したがって、供試体内に発生している断面力は式(2)により求めることとした。

$$M = (\epsilon_i - \epsilon_o) \cdot E_r \cdot Z / 2 \dots\dots\dots (2)$$

ここに、M：曲げモーメント (kg·cm)

ϵ_i ：供試体内面のひずみ

ϵ_o ：供試体外面のひずみ

E_r ：レジンコンクリートの弾性係数 (kg/cm²)

Z：供試体の断面係数 (cm³)

一方、曲げ応力比を実験によって算出するためには、基準値のとり方が問題となる。このため、今回の実験においては開孔部のない供試体において単位荷重に対する曲げひずみを測定した。この結果、測定結果がリング計算値とよく一致することが判明したため、開孔部のない場合の曲げモーメント分布がリング理論と一致すると考え、開孔による影響を検討する場合の基準値をリング計算値とした。

(3) 実験結果および考察

a) 肉厚の影響

肉厚の相違が開孔部周辺の応力分布状態に及ぼす影響を検討するため、開孔率を一定とし、肉厚比(供試体直径/供試体肉厚)8の供試体(MH05)と肉厚比19の供試体(ML05)により載荷実験を行った。この載荷実験により得られた開孔部中心を通る円筒長手方向軸線上の円周方向の曲げ応力比を図-17に示す。なお、図中のPL05A, PL05BはFEM解析の値であり、肉厚比は11である。

この結果、次のことが明らかとなった。

① [LOAD:A]の場合、PL05A(FEM解析)が若干小さい値を示しており、[LOAD:B]ほど一致していないが、これは欠損荷重を軸線上の比で配分しているためであると考えられる。

② [LOAD:B]の場合、理論解析結果および有孔平板理論値とよく一致しており、今回の条件程度の肉

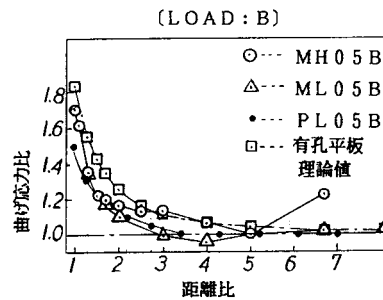
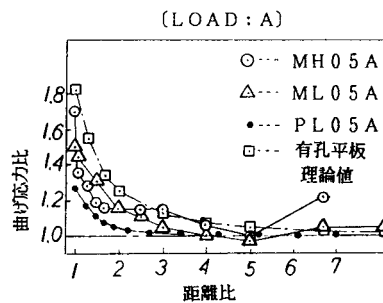


図-17 曲げ応力比と距離比の関係

厚比(8~19)の範囲であれば、肉厚の相違により開孔部周辺の応力分布状態には影響を及ぼさないことが明らかとなった。

b) 1円孔の応力分布状態

上記a)の結果より、肉厚の相違による開孔部周辺の応力分布状態への影響はあまりないことから、肉厚比を一定(肉厚比:8)とし、開孔率を30%、50%、70%および100%とした場合の載荷実験を行った。この載荷実験より得られた開孔部中心を通る円筒長手軸線上の曲げ応力比を図-18に示す。

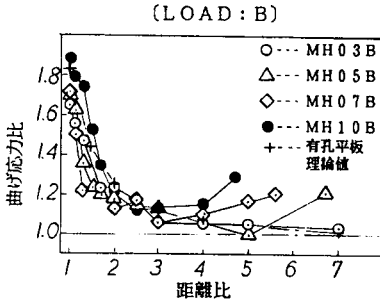
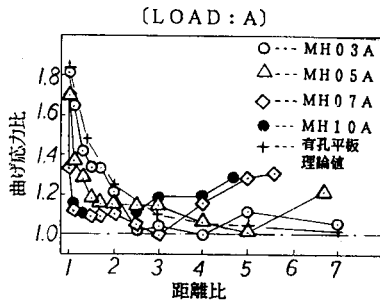
この結果、次のことが明らかとなった。

① 曲げ応力比は、FEMの解析結果と同様、開孔縁で最大となり、この傾向は開孔率および載荷方式によって異なることが明らかとなった。[LOAD:A]の場合、開孔率が小さいほど応力集中度は高く、[LOAD:B]では、開孔率が大きいほど曲げ応力比は高くなる。

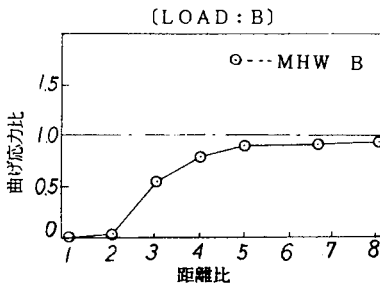
② [LOAD:A]および[LOAD:B]とも開孔部近傍では有孔平板の理論と同様の傾向を示しており、特に開孔率30%の場合はほぼ有孔平板の理論と等しい値を示している。なお、開孔中心から離れた円筒の円筒端近傍では開孔率30%以外のものについて曲げ応力比が増加する傾向にあるが、これは開孔による供試体の剛性低下および供試体の端部が開放されていることの影響が重なったためによるものと考えられる。

c) 2円孔の応力分布状態

同一水平断面に2円孔開孔部を有する場合(開孔率



図一18 曲げ応力比と距離比の関係



図一19 2円孔開孔部の曲げ応力比

50%，中心角75度)の載荷実験を行った結果のうち、曲げ応力比の結果を図一19に示す。この結果、小さい方の残存部分では曲げ応力が低下しており、円筒短手方向には応力が発生しない傾向にあることが明らかとなった。

以上、モデル実験でもFEMによる応力解析結果と同様の結果が得られたため、理論解析結果の妥当性が検証されたものと考えられる。

4. 結 論

本研究は、コンクリート製円筒構造物を円筒シェルに、また、構造物の安全性を考慮した作用荷重を円筒シェルの非開孔部に最も不利な曲げモーメントが発生するようにモデル化し、応力解析とモデル実験を行い、開孔部周辺の応力分布状態を明らかにし、より合理的な補強方法を確立することを試みた。

(1) 開孔部周辺の応力分布状態のまとめ

a) 開孔率が小さい場合は、開孔による応力変化が著しい範囲は開孔部周辺に限られており、その範囲は開孔端から開孔円の半径程度の距離である。

b) 開孔部の長手方向端部では、円周方向の曲げ応力が增加する。その最大値は、一般部(リング部分)の曲げ応力の1.7倍程度である。

c) 開孔形状に沿った方向に引張応力が発生し、その最大値は開孔部の円周方向端部で長手方向に生じ、開孔率の増加に従って大きくなる。

d) 開孔率が100%近くまで大きくなると、円筒全体が開孔部での剛性低下および荷重の不均衡により長手方向に曲げられるような挙動をする。このため、開孔部の残存断面は長手方向のはりとしての応力状態となり、長手方向に大きな引張り軸応力が発生する。

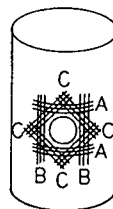
e) 2円孔開孔部を有する場合は、2円孔間の小さい方の残存部分が円周方向の力を受ける部材としてではなく、円筒長手方向のはりとしての挙動を示す。

これらから、円形立坑開孔部の基本的な補強方法は次のようにまとめることができる。

- ① 補強方法は開孔率の大小により分けて考える必要がある。
- ② 開孔率が小さい場合は、開孔部周辺のための補強を行うのが妥当である。
- ③ 開孔率が大きい場合は、円筒全体の挙動を考慮して補強を行う必要がある。

なお、補強方法としては、i)部材厚を厚くする、ii)鉄筋量を増やす、iii)形鋼などで補強する、などが考えられるが、壁厚が一定であれば抵抗モーメント等の断面性能は、ほぼ鉄筋量に比例すると考えられることおよび現場における施工性、経済性を考慮すると各部の応力に応じた鉄筋を配置することが基本になるものと考えられる。図一20は、開孔率が小さい場合の鉄筋を用いた開孔部周辺の一補強例を示す。

謝 辞：最後に、本研究に対して有益なご助言、ご協力をいただいた、日本建設機械化協会建設機械化研究所 上東所長、竹之内研究員ならびに早稲田大学理工学部土木工学科 宮原教授、関教授の関係諸氏に厚くお礼



A鉄筋：円周方向の曲げに対する補強鉄筋
B鉄筋：長手方向の引張りに対する補強鉄筋
C鉄筋：開孔形状に沿った方向の引張りに対する補強鉄筋

図一20 開孔部周辺の補強例

申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書解説，p. 53，1977.
- 2) 東京都下水道局：既設下水道リング構造物等の枝管直接取付けに関する実験的研究，p. 52，1983.
- 3) 西田：応力集中，森北出版，pp. 296～297，1973.
- 4) 戸田：円形開孔を持つ円筒シェルの軸圧縮座屈強度，日本機械学会論文集（A編），46巻403号，pp. 329～336，1980.
- 5) 三木・太田：圧力を受ける円筒殻の円形開孔部の応力集中について，日本航空学会誌，第8巻第80号，pp. 258～262，1960.
- 6) 日本道路協会：道路橋下部構造設計指針，ケーソン基礎の設計篇，pp. 53～54，1970.
- 7) 東・小森：平板構造，彰国社，pp. 25～27，1975.
- 8) 西田：応力集中，森北出版，pp. 298～300，1973.

(1984. 9. 22・受付)
