

三次元挙動を考慮した矩形立坑の 二次元解析モデルに関する研究

Study on The Two-Dimensional Analysis Model of A Rectangular Shaft
That Takes into Account The Three-Dimensional Effects

新井 泰¹・大石敬司²・小西真治³

Yasushi ARAI, Keiji OISHI and Shinji KONISHI

¹正会員 工修(財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

E-mail : araton@rtri.or.jp

²正会員 工修 東京地下鉄株式会社 建設部 計画課 (〒110-0015 東京都台東区東上野 3-19-6)

³正会員 工博(財)鉄道総合技術研究所 鉄道技術推進センター (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

This paper describes a method of reflecting the three-dimensional effects in a two-dimensional structural analysis for the design of a rectangular shaft for railway tunnels based on the result of three-dimensional structural analysis for different values of its depth to width ratio. We conclude that in the design of rectangular shaft using two-dimensional structural analysis, the model is divided into the lateral section and longitudinal sections. The two-dimensional frame analysis requires the use of the contributing load based on the Grashof-Rankine equation for the mode in the lateral direction, and the use of the contributing load based on the new equation proposed in this paper for the longitudinal direction.

Key Words : Rectangular shaft; Two-dimensional analysis model; Two-direction slab; Contributing load

1. はじめに

一般に立坑とは、平面寸法に比べ鉛直方向の寸法が比較的大きく、独立した細長い構造体のことであり、地下鉄道においては、中間換気室やシールド工法等による駅間トンネルの作業基地となる地下駅の始末端部の多くが矩形の立坑構造を採用している。

これら矩形立坑(以下、立坑と称す)の構造解析にあたっては、上記の構造特性を考慮して、本来、三次元の立体構造として解析することが望ましい。

しかし、実務的には二次元の平面構造として解析することが多く、所要となる立体の不静定構造物を二次元解析モデルに置換する際の仮定は、既往の指針¹⁾や示方書²⁾の手法に準じている。

当該手法の特徴は、一般の線状構造物と異なる立坑特有の形状寸法を考慮して、床版や側壁、妻壁といった構造物構成部材を単純梁に置換して行う「二次元構成部材梁置換解析」(以下、構成部材梁置換解析)について解説している点にある。その反面、実務でよく用いられる構造物全体をラーメンとみなした「二次元全体系フレーム解析」(以下、全体系フレーム解析)に関しては具体的な記述がなく、立坑の幅・奥行き・高さと密接な関係にある躯体の三次元的な挙動(以下、三次元挙動)を設計に反映させるための手法についても示されていない。

このため、多くの場合、立坑特有の構造特性を考慮しないまま、一般の線状構造物同様、床版、側壁

の設計を横断方向の全体系フレーム解析で、駅間トンネル開口部周辺部材の設計を構成部材梁置換解析で各々行い、所要となる具体的なモデル化手法については、担当技術者の経験と判断に委ねられてきた。

しかし、このような状況では、立坑特有の三次元挙動を考慮した合理的な設計諸元を導くことは難しく、その形状寸法によっては、危険側の設計諸元を導く可能性も否めず、三次元挙動を二次元解析に反映させる手法の確立は非常に重要であると考えた。

そこで筆者は、「鉄道構造物等設計標準(開削トンネル)」(以下、開削標準)の「立坑」の条文策定において、立坑特有の構造特性を考慮できる二次元解析モデルの必要性とその一案を示したが、この提案を地下鉄道構造物に限らない全ての構造物に適用するためには、提案の妥当性を、①地盤条件、②三次元解析モデルの設定荷重、③床版の辺長比に関するパラメータスタディ結果とその見解、④側壁の辺長比に関するパラメータスタディ結果とその見解、⑤二次元解析モデルに適用する設定荷重の定式化、によって明らかにする必要があると考えた。

本論文では、実存する地下鉄道の中間換気室³⁾を検討対象とした三次元解析結果に基づき、開削標準で示した③の事項と、シールド開口を有する妻壁の面内挙動に関する知見以外の各事項について、同標準策定後の研究、および当該換気室の現地調査等により得られた成果を総括し、立坑の三次元挙動を考慮した合理的な二次元解析モデルを提案する。

2. 検討方針

本来、三次元挙動を示す立坑構造を二次元解析モデルに置換するためには、当該解析に適用する荷重および境界条件が三次元挙動を包含できる内容にする必要がある。具体的には、二次元解析から得られる断面力が三次元解析から得られる断面力と同程度かそれ以上であることが望ましい。

そこで本研究では、解析から得られる断面力のうち、①せん断力は曲げモーメントと微分の関係にあること、②軸力は主として躯体自重や上載荷重に支配されること、等を踏まえ、横断・縦断各方向の曲げモーメント（以下、横断・縦断モーメントと称す）に着目し、以下の各項目について検討を行った。

(1) 三次元解析による基準値の設定

鉄道トンネルにおける立坑の形状は、鉛直方向には細長いものの、平面寸法としては小さく、概ね正方形に近い形状を有するものが多い。

一方、「鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）」⁴⁾によると、スラブの短スパンが長スパンの0.4倍以上、すなわち、床版の縦断（軌道平行）方向スパン L と横断（軌道直角）方向スパン B の比（以下、 L/B と称す）が0.4～2.5の範囲（ $0.4 < L/B < 2.5$ ）では、その挙動が二方向スラブに近似できるとされている。

即ち、立坑をラーメンとみなして構造解析を行う場合には、通常の開削トンネルのような線状構造物とは異なり、スラブの短スパン、長スパンを考慮した適切な解析モデルを、横断・縦断各方向に設定しモデル化することが合理的であると考えられる。

そこで本研究では、立坑の平面寸法の相違が躯体全体の挙動に及ぼす影響に着目することとし、偏圧の影響検討を主目的とした円形立坑の三次元構造解析等で多くの実績がある躯体をシェル要素、地盤をばね要素とした三次元解析モデル⁵⁾（図-1）に関して L/B を変化させたパラメータスタディを行い、それらから得られるモーメントを、各 L/B における基準値と定義した。

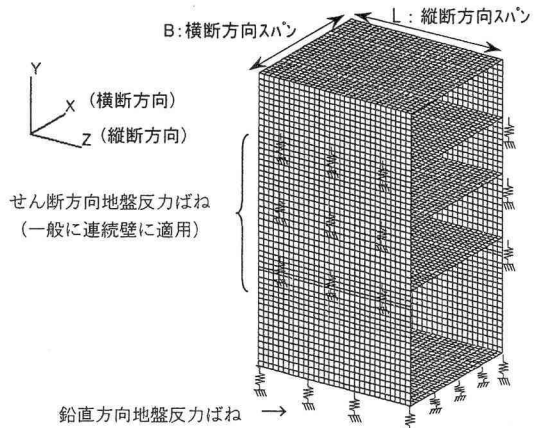
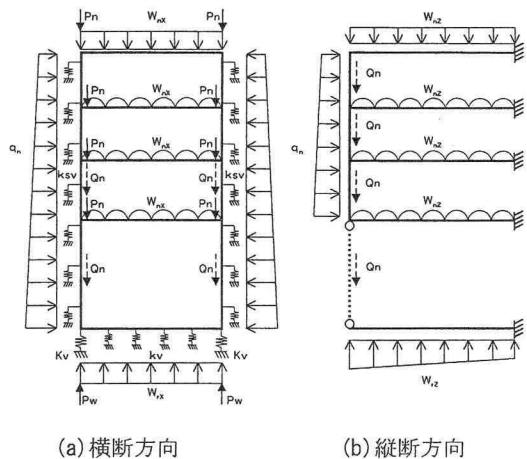


図-1 三次元解析モデルの例



(凡例) Q_n : 側壁(または妻壁)自重 q_n : 側圧 P_n , P_w : 連続壁軸力
 W_{xz} : 床版荷重(横断方向) W_{nz} : 床版荷重(縦断方向)
 W_{xz} : 掘圧力(横断方向) W_{nz} : 掘圧力+地盤反力(縦断方向)
 k_v : 鉛直地盤反力係数 k_{sv} : せん断地盤反力係数
 K_v : 鉛直地盤ばね定数

図-2 全体系フレーム解析モデルの例

(2) 全体系フレーム解析における荷重分担率の見極め

一般に、二方向スラブに近似できる床版に分布荷重が作用する場合、床版は横断、縦断の各方向で荷重を分担して受け持つと仮定できる⁴⁾。したがって、全体系フレーム解析に適用する作用荷重についても、この考え方を踏まえて、図-2に示すような解析モデルで横断・縦断各方向に分担させて解析することが望ましいと考えた。

そこで、三次元解析より得られたモーメントを基準値として、横断・縦断各方向に展開した全体系フレーム解析から得られるモーメントの妥当性について検討した。

なお、この場合に適用する荷重分担率については、基本的に「鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）」⁴⁾等にある Grashof-Rankine の算定

式を用いることとした。

(3) 構成部材梁置換解析が有する安全余裕の見極め

鉄道トンネルの立坑では、妻壁に駅間トンネルの開口が存在する。面外変形を伴う開口周辺の挙動は複雑で、本来三次元挙動を適切に考慮した設計が行われるべきである。しかし実務では、既往の指針¹⁾および示方書類²⁾にある構成部材梁置換解析モデル、即ち、妻壁については図-3に示す片持ち梁解析モデル、開口部下床桁については図-4に示す両端固定梁解析モデルを用いている。なお、当該結果が有する安全余裕については経験的に過大と評価されているものの、それらを定量的に検討した事例がないことに加え、それら安全余裕の中に、三次元挙動による影響がどの程度含まれているかについても明らかにされていない。

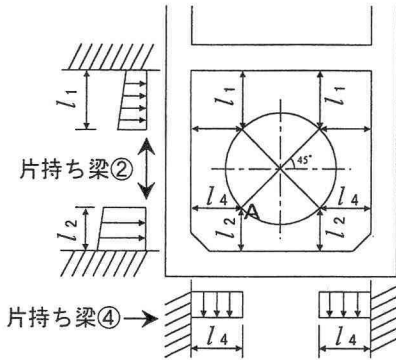


図-3 開口を有する妻壁の片持ち梁解析モデルの例

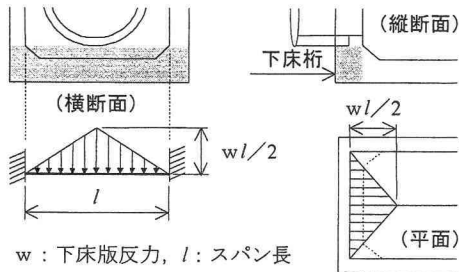


図-4 開口部下床桁の両端固定梁解析モデルの例

そこで本研究では、三次元解析結果から、図-3に示す妻壁の片持ち梁、図-4に示す下床桁の両端固定梁に該当するシェル要素のモーメントを各々抽出して基準値とし、各部位の構成部材梁置換解析から得られるモーメントと比較した。また、図-3に示す片持ち梁②と④の自由端は、図-3のA部において同じ変形挙動を示すため、ねじりが作用することになる。この影響についても、片持ち梁解析から得られるモーメントとの比較により併せて検討した。

3. 解析条件

(1) 検討対象とした立坑の概要

検討対象立坑の選定にあたっては、検討結果の普遍性を考慮し、図-5、表-1に示すような、都内の鉄道用立坑の実績として最も一般的な条件（硬質地盤で掘削深度が30m程度）を有する立坑³⁾を抽出した。

当該立坑は、土被り4.5mの地下4層の換気室で、幅（横断方向）B=14.89m、奥行き（縦断方向）L=17.00m、高さH=27.45mとなっている。平面的には正方形に近い形状（L/B=1.1）を有し、複線シールドトンネルの発進基地としても利用される。

構造的には、側壁が本体利用のRC連続壁となっているほか、妻壁にはシールドトンネルの開口があり、当該立坑後方に4層の機械室が続いている。

また、開口上部の妻壁はシールド機発進後、B3F床版と後打ち壁の築造により塞がれる形式となっている。

地盤条件は、地表からGL-15.1m付近までが洪積

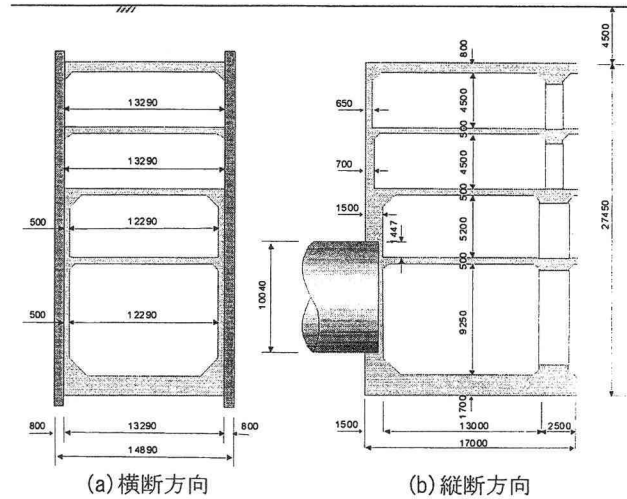


図-5 検討対象立坑の形状寸法（単位：mm）

表-1 地盤条件から定まる諸数値

地盤種別	粘性土層 To-c	砂質土層 To-s	上総層 Ka-c
対象部位	B1F側壁 B2F側壁	B3F側壁 B4F側壁	B4F側壁 B4F床版 側壁根入部
位置(GL-m)	～15.1	～25.5	25.5～
単位体積重量(kN/m ³)	17	22	20
側圧係数	0.31	0.20	0.13
地盤反力 係数(MN/m ³)	鉛直kv	—	11.3
	せん断 ksv	3.1	7.0
地盤ばね 定数(MN/m)	鉛直Kv	—	36.7

表-2 地盤条件以外の条件から定まる諸数値

項目	設定値
路面交通荷重	11kN/m ²
中床版の 機械荷重	B1F・B2F床版 30kN/m ² B3F床版 20kN/m ²
躯体の単位体積重量	25kN/m ³

粘性土層（To-c：N=4～10程度）、それ以深が洪積砂質土層および上総層（To-s, Ka-c：N=50以上）となっている。

(2) 解析に用いる諸数値と設計荷重

a) 躯体材料の諸数値

立坑本体のヤング係数は $2.7 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$ 、ポアソン比は0.2とした。

b) 設計荷重の算定に用いる諸数値

設計荷重の算定に用いる諸数値のうち、地盤条件から定まる主な諸数値⁶⁾⁷⁾を表-1に、それ以外の条件から定まる主な諸数値⁶⁾⁸⁾を表-2に各々示す。

表-3 設計荷重（横断方向）

荷重設定位置	設計荷重 (kN/m/m)
上床版	112.7
B1F・B2F 床版	49.6
B3F 床版	34.9
B4F 床版（下床版）	197.5
側 壁	29.8～280.1

c) 設計荷重

表-1 および表-2 の諸数値を用いて算定した奥行き 1m あたりの横断方向設計荷重を表-3 に示す。なお、これらの数値は、以下に説明する各解析モデルの適用荷重の根拠となるものである。

4. 基準値を設定するための三次元解析

(1) 解析モデルの概要

三次元解析モデルの鳥瞰図を図-6 に示す。躯体はシェル要素で構成し、各要素のアスペクト比や分割数については、既往の研究成果⁹⁾を参考にして設定した。

基本的な形状寸法は図-5 から定まる図心軸に基づいて決定し、全体系フレーム解析結果との比較を行う断面は図-6 に太線で示した断面 A（横断方向）と断面 B（縦断方向）とした。

(2) 変位境界条件

躯体と地盤の相互作用を考慮するために、下床版下面と側壁根入部には鉛直方向地盤ばねを配し、側壁一般部（以下、側壁）には鉛直方向せん断地盤ばねを配した。なお、下床版と側壁の地盤反力係数 (k_v , k_{sv}) および側壁根入部の地盤ばね定数 (K_v) は、地盤条件を考慮して表-1 のように設定した。

(3) 荷重条件

各床版荷重については、表-3 に示す奥行き 1m あたりの設計荷重を縦断方向に拡張し入力した。

妻壁・側壁荷重については、土留め壁完成後から床付け掘削完了にいたるまでの土留め壁に作用する土圧変化と躯体の三次元挙動を把握する必要がある。そこで、立坑の幅・奥行き・掘削深度および地盤剛性をパラメータとした三次元逐次掘削解析によって側壁荷重を評価した研究内容¹⁰⁾¹¹⁾について検討した。

それによると、掘削深度が大きく、奥行き・幅比 (L/B) も大きい場合、隅角部側壁に作用する土圧と奥行き方向中央部側壁（図-6 の断面 A）に作用する土圧との乖離が大きくなるという知見が得られている。

同時に、鉄道用立坑での実績として最も一般的であり、本研究でも対象としたような地盤条件で 30m 程度の掘削深度であれば、 L/B が 1.0 と 2.5 における隅角部側壁と奥行き方向中央部側壁との土圧の差異は、掘削時の側壁変位が最大となる床付け付近に限っても、高々 1 割程度であるという知見も得られている。

したがって、本研究では後者の知見を参考にして、

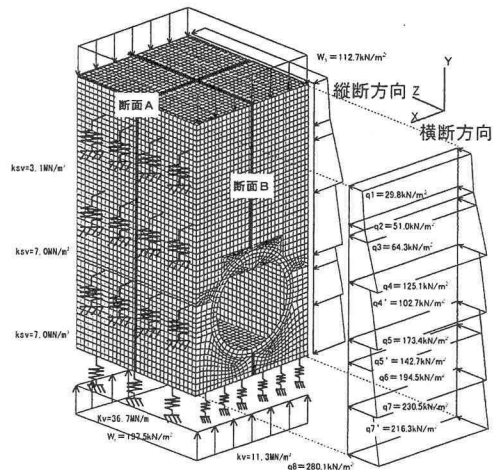


図-6 三次元解析モデル

側壁・妻壁荷重についても各床版荷重同様、表-3 に示す奥行き 1m あたりの設計荷重を縦断方向に拡張し入力した。

5. 全体系フレーム解析による検討

(1) 横断・縦断方向フレーム解析モデル

a) モデルの概要

横断方向フレーム解析モデルを図-7 (a) に、縦断方向フレーム解析モデルを図-7 (b) に示す。なお、前者は図-6 の断面 A に相当し、後者は断面 B に相当する。

本研究では、三次元挙動を考慮するために、 $1.0 < L/B < 2.5$ の各解析ケースについて各床版を二方向スラブとみなし、表-3 の各設計荷重に、Grashof-Rankine の算定式による荷重分担率を乗じた。

b) 境界条件

横断方向については、一般の線状構造物と同様の境界条件（地盤反力ばねを考慮）とした。

縦断方向については、一般的なモデル化手法が確立されていないため、既往の設計実績を参考にして、以下の仮定を採り入れることとした。

- ① 開口を有する妻壁は、2(3) で示したように構成部材梁置換解析によって別途、設計を行う。したがって、縦断方向フレーム解析では、妻壁を介して下床版に作用する軸力のみを表現するために、中床版と下床版の接点をヒンジ支承とした仮想梁を配す。
- ② 当該立坑と後続の機械室とは、構造形式の違いからその挙動が明らかに異なるため、両構造の境界における鉛直方向の相対変位は無いものと仮定する。
- ③ ②の仮定により、各床版の機械室側の境界条件は全て固定支承にするとともに、下床版下面には地盤反力ばねを用いず、各床版および側壁の作用荷重（含自重）とつりあう擬似的な反力荷重を採用し、地盤反力ばねを用いる場合よりも下床版に対して厳しい荷重条件を設定する。

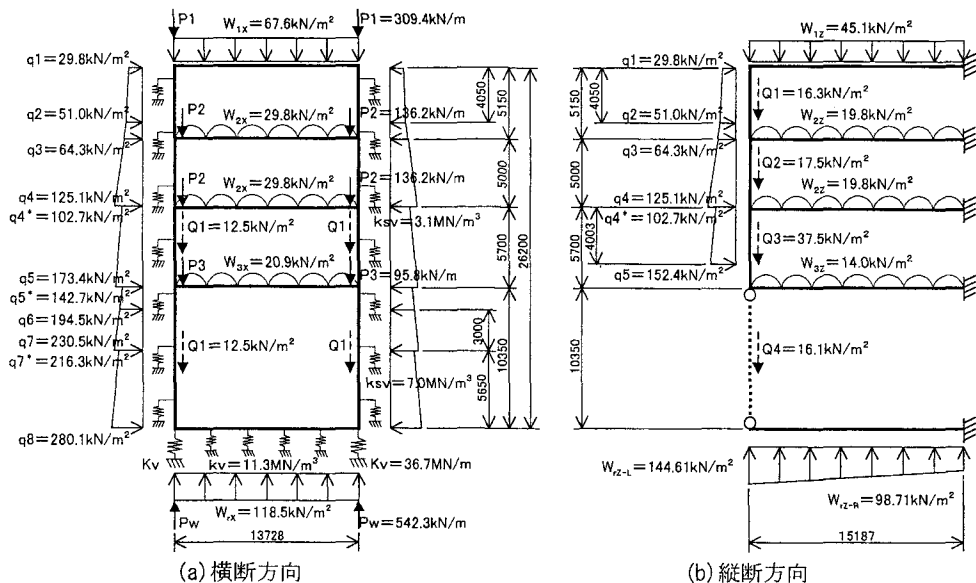


図-7 全体系フレーム解析モデル (L/B=1.1, Grashof-Rankine の算定式による荷重分担率を適用)

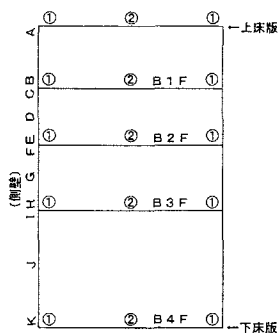


図-8 横断方向フレーム解析結果抽出位置

c) パラメータ

横断方向フレーム解析モデルは二次元なので、奥行きを直接変化させることは不可能であるが、二方向スラブとみなされる床版については L/B 毎に荷重分担率が一意に定まるので、当該分担率を表-3 に示す設計荷重に乗じて作用荷重を変化させることにより、奥行き・幅比 (L/B) の影響度を調べた。

(2) 横断方向フレーム解析結果

a) 検討概要

まず、基本ケースである L/B=1.1 について図-8 に示す各比較位置で三次元解析結果とモーメントの比較を行い、次に L/B をパラメータとした L/B=2.0 および L/B=2.5 について同様の検討を行った。

b) 検討結果と考察

まず、L/B=1.1 の結果を表-4 に示す。これにより以下の内容を把握できる。

- ① 各比較位置で、概ね横断方向フレーム解析結果が三次元解析結果を上回ることから、横断方向フレーム解析モデルには Grashof-Rankine の

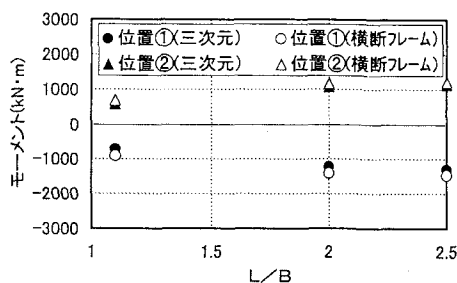
表-4 横断方向解析結果比較表 (L/B=1.1)

単位 (kN・m)						
比較部位		位置	三次元(a)	二次元(b)	(b)/(a)	備考
床版	上床版	①	-704	-907	1.3	
		②	576	694	1.2	
	B1F	①	-485	-523	1.1	
		②	245	272	1.1	
	B2F	①	-447	-460	1.0	
		②	223	242	1.1	
	B3F	①	-352	-341	1.0	
		②	162	152	0.9	
	B4F (下床版)	①	1858	2265	1.2	
		②	-1101	-965	0.9	
側壁	B1F	A	745	907	1.2	
		B	-213	-279	1.3	
	B2F	C	236	243	1.0	
		D	-114	-169	1.5	
		E	45	39	0.9	
	B3F	F	498	501	1.0	
		G	-13	207	-	※注1
		H	476	1088	2.3	
	B4F	I	812	1430	1.8	
		J	-872	-1185	1.4	
		K	1841	2269	1.2	

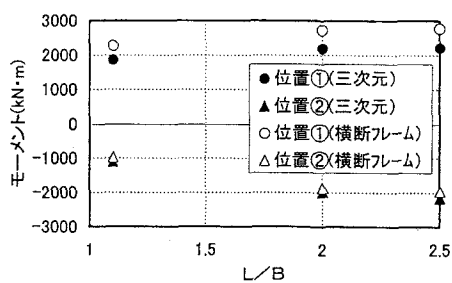
※注1: 正・負逆転により評価せず

算定式による荷重分担率を用いることにより、安全側の設計が可能であると考えられる。

- ② 比較位置 G (B3F 側壁) で、モーメントの正・負の入替えが横断方向フレーム解析結果には無く、三次元解析結果には有るが、複鉄筋を基本とし、当該立坑と同様の形状寸法を有する地下構造物であれば、その値は 13kN・m 程度であり、必ずしも危険側の設計とはならないと考えられる。



(a) 上床版



(b) 下床版

図-9 上・下床版の横断方向モーメント

- ③ 比較位置 H(B3F 側壁) と I(B4F 側壁) 付近 (表-4 網掛け部) で三次元解析結果との乖離が顕著になっており、作用荷重を再考する必要があることを示唆している。

次に、 $L/B=2.0$ および $L/B=2.5$ の結果を図-9 に示す。ここでは、応力的に厳しくなる上床版と下床版のモーメントに着目する。これらのうち、図-9(b) の位置② (下床版スパン中央) のみ、 L/B に関わらず横断方向フレーム解析結果 (△印) が三次元解析結果 (▲印) を下回り、かつ両方で $100\text{kN}\cdot\text{m}$ 程度の乖離がみられる。しかし、当該モーメントの値は、いずれも $-1000\text{kN}\cdot\text{m} \sim -2000\text{kN}\cdot\text{m}$ であり、配筋検討時における鉄筋量への影響は少なく、全体的に三次元挙動を考慮した安全側の設計が可能であることがわかる。

(3) 縦断方向フレーム解析結果

a) 検討概要

図-10 に示す各比較位置で 5(2) と同様の検討を行った。なお、隣接する機械室は立坑と構造形式が著

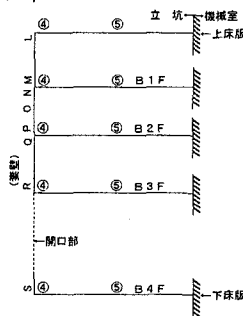


図-10 縦断方向フレーム解析結果抽出位置

しく異なるため、設計は分離して行われ、両構造境界位置の断面力から直接設計諸元が決定されることは無い。したがって、同位置の解析結果は省略する。

b) 検討結果と考察

まず、基本ケースである $L/B=1.1$ の結果を表-5(A) 欄に示す。各比較位置とも二次元解析結果と三次元解析結果は、概ね等しくなっているが、B2F 妻壁の

表-5 縦断方向解析結果比較表 ($L/B=2.5$ では網掛け部相互を比較する) 単位 ($\text{kN}\cdot\text{m}$)

奥行き・幅比		L/B=1.1			L/B=2.5						備考	
分担荷重の考え方		(A)Grashof-Rankine			(B)Grashof-Rankine			(C)図-11に基づく新提案式				
比較部位		位置	三次元(a)	二次元(b)	(b)/(a)	三次元(a)	二次元(b)	(b)/(a)	三次元(a)	二次元(b)	(b)/(a)	
床版	上床版	④	-523	-573	1.1	-494	-234	0.5	-494	-711	1.4	
		⑤	566	516	0.9	410	148	0.4	410	488	1.2	
	B1F	④	-441	-375	0.9	-398	-118	0.3	-398	-392	1.0	
		⑤	218	192	0.9	153	59	0.4	153	197	1.3	
	B2F	④	-416	-387	0.9	-389	-121	0.3	-389	-396	1.0	
		⑤	200	189	0.9	146	58	0.4	146	196	1.3	
	B3F	④	-187	-221	1.2	-133	-74	0.6	-133	-252	1.9	
		⑤	132	147	1.1	86	48	0.6	86	143	1.7	
	(下床版)	④	680	0.0*	-	565	0.0*	-	565	0.0*	-	*ヒンジ
		⑤	-1031	-2043	2.0	-844	-1511	1.8	-844	-2641	3.1	
妻壁	B1F	L	579	573	1.0	675	234	0.4	675	711	1.1	
		M	-176	-167	1.0	-204	33	※	-204	-218	1.1	※注1
	B2F	N	260	224	0.9	260	151	0.6	260	174	0.7	
		O	-103	-73	0.7	-112	-85	0.8	-112	-81	0.7	
		P	52	239	4.6	36	272	7.6	36	257	7.2	
	B3F	Q	464	625	1.4	493	393	0.8	493	653	1.3	
		R	-224	-221	1.0	-204	-74	0.4	-204	-252	1.2	
	B4F	S	741	0.0*	-	839	0.0*	-	839	0.0*	-	*ヒンジ

※注1: 正・負逆転により評価せず

一部では、奥行き・幅比 (L/B) によらず、 $(b)/(a)$ が 0.9~0.7 となっている。これは、構造体全てがモデル化される三次元解析では、解析上発生する応力の全てを評価できるが、縦断方向フレーム解析では二次元であるため、全ての応力の伝達過程までは表現できず、乖離が生じるものと考えられる。

次に、 L/B をパラメータとした $L/B=2.5$ の結果を表-5(B)欄に示す。これによると、表-5(A)欄と比較して、多くの比較位置で三次元解析結果との乖離が著しくなっており、二方向スラブとしての適用限界付近においては、Grashof-Rankine の算定式による荷重分担率のみで、三次元挙動を含めた実構造物の挙動を適切に再現できないことがわかる。

一般に、Grashof-Rankine の算定式は、対象とする二方向スラブの各固定辺に変形が生じないという前提のもとで導かれる。しかし、立坑のような構造物においては、形状寸法的に二方向スラブの体裁を有していても、実際は各辺に変形が生じるために、完全な固定状態とはならない。

つまり、表-5(B)欄の結果は、 $L/B=2.5$ という二方向スラブの適用限界付近においては、三次元挙動が卓越し、結果的に縦断方向の分担荷重を過小評価していることを示唆している。

6. 全体系フレーム解析に適用する合理的な分担荷重算定式の提案

(1) 横断方向フレーム解析への適用荷重

5(2)b)③で示したように、B4F 側壁の高さ ($H=10.35\text{m}$) と奥行き ($L=15.19\text{m}$) の比 ($L/H=1.5$) が二方向スラブの適用範囲にもかかわらず、側壁に100%の荷重を作用させると、三次元解析結果との乖離が大きくなる。

この結果を踏まえ、本研究では、基本ケース ($L/B=1.1$) の当該側壁に作用させる荷重についても床版同様、Grashof-Rankine の算定式による荷重分担率を考慮することとした。

その結果を表-6に示す。表-4の結果のうち、三次元解析結果との乖離が大きかった比較位置 H, I (表-4, 6 網掛け部) における乖離が非常に小さくなり、三次元挙動を適切に表現できることがわかる。

以上の検討結果および考察より、荷重強度 w における横断方向フレーム解析モデルに適用する横断方向分担荷重 w_x の算定式として次の(1)(2)を用いる。

・床版に適用する分担荷重の算定式

$$w_x = wL^4 / (L^4 + B^4) \cdots (1) \text{ Grashof-Rankine 準拠}$$

・側壁に適用する分担荷重の算定式

$$w_x = wL^4 / (L^4 + H^4) \cdots (2) \text{ Grashof-Rankine 準拠}$$

(2) 縦断方向フレーム解析への適用荷重

表-5(B)欄で示したように、Grashof-Rankine の算定式のみを用いた場合、二方向スラブの適用限界 ($L/B=2.5$) 付近での三次元解析結果と縦断方向フレーム解析結果との乖離は非常に大きくなる。

表-6 横断方向解析結果比較表 ($L/B=1.1$)
(床版とB4F側壁にGrashof-Rankineの算定式を考慮した場合)

比較部位		位置	L/H=1.5		単位 (kN・m)	表-4再掲
			三次元(a)	二次元(b)	(b)/(a)	(b)/(a)
床版	上床版	①	-704	-908	1.3	1.3
		②	576	693	1.2	1.2
	B1F	①	-485	-522	1.1	1.1
		②	245	272	1.1	1.1
	B2F	①	-447	-464	1.0	1.0
		②	223	241	1.1	1.1
	B3F	①	-352	-338	1.0	1.0
		②	162	151.5	0.9	0.9
	B4F (下床版)	①	1858	2030	1.1	1.2
		②	-1101	-1137	1.0	0.9
側壁	B1F	A	745	908	1.2	1.2
		B	-213	-287	1.4	1.3
	B2F	C	236	235	1.0	1.0
		D	-114	-154	1.4	1.5
		E	45	89	2.0	0.9
	B3F	F	498	533	1.1	1.0
		G	-13	116	—	—
		H	476	821	1.7	2.3
	B4F	I	812	1159	1.4	1.8
		J	-872	-913	1.1	1.4
		K	1841	2030	1.1	1.2

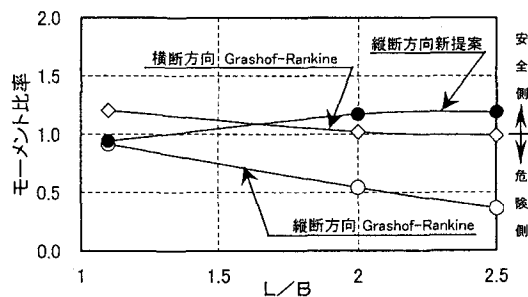


図-11 L/B と上床版のモーメント比率との関係

この結果を踏まえ、本研究では、Grashof-Rankine の算定式の適用限界とその代替案について検討することとし、応力状態が比較的単純な上床版スパン中央 (横断方向: 位置②・縦断方向: 位置⑤) におけるモーメントについて、 L/B を横軸に、二次元フレーム解析結果を三次元解析結果で除した値 (以下、モーメント比率) を縦軸に各々とした図-11 を作成し、当該個所の挙動について再整理した。

これによると、横断方向のモーメント比率 (◇印) は L/B が大きくなる (一般的な線状構造形式に近づく) につれて 1.0 に漸近している。また、二方向スラブの適用限界 ($L/B=2.5$) で当該比率は 1.0 となっており、いずれの L/B においても安全側の設計となっている。それに対して、縦断方向のモーメント比率 (○印) は L/B が大きくなるにつれて 1.0 より小さくなっているほか、二方向スラブの適用限界 ($L/B=2.5$) で当該比率は 0.4 となっており、ほとん

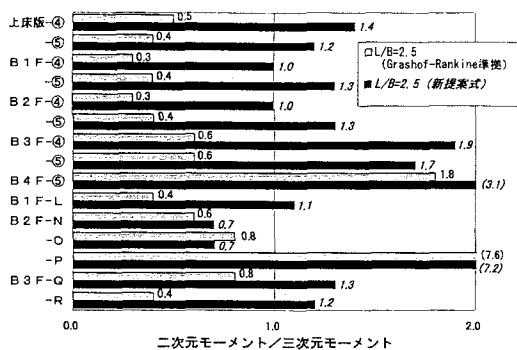


図-12 縦断方向モーメントの比較結果(L/B=2.5)

どのL/Bにおいて危険側の設計となっている。

そこで、本研究では縦断方向モーメントについて、基準値としている三次元解析結果のL/B=1.1における値とL/B=2.5における値の差がわずか150kN・m程度であることに着目し、縦断方向フレーム解析に適用する分担荷重を以下の考えに基づいて再設定した。

- ① 三次元解析結果における縦断方向モーメントは、L/Bが大きくなってその変化は小さいという現象を縦断方向フレーム解析結果に反映させるため、いかなるLに対しても当該モーメントが一定となるような荷重分担率を設定する。
- ② Grashof-Rankineの算定式では、縦断方向モーメントと横断方向モーメントは、L/B=1.0(荷重分担率50%)において等しくかつ最大になることに着目し、①で考慮する荷重分担率は50%とする。
- ③ Grashof-Rankineの算定式では、縦断方向モーメントは L^2 に、横断方向モーメントは B^2 に各々比例することに着目し、縦断方向フレーム解析に適用する分担荷重は、②で定義した荷重分担率50%における荷重強度 $0.5w$ を $(L/B)^2$ で除して算定する。

上記①～③の考え方により算定したL/B=2.5における縦断方向モーメントを表-5(C)欄に示し、表-5(B)(C)欄の(b)/(a)の比較結果を図-12に示す。また、 $1.0 < L/B < 2.5$ の範囲における上床版位置⑤の縦断方向のモーメント比率を図-11中の●印に示す。

この考え方を適用することにより、縦断方向フレーム解析結果と三次元解析結果の乖離が二方向スラブの適用限界(L/B=2.5)付近においても、基本ケース(L/B=1.1)と同様な安全余裕を確保できる。

また、 $1.0 < L/B < 2.5$ の範囲において、縦断方向フレーム解析に適用する荷重分担率は一律50%となり、荷重の取り扱いが簡便になることに加え、三次元挙動を考慮した安全側の設計が行える。

例えば、実構造物においても変状が多く見られる図-10の位置Rに関して、図-12の「B3F-R」の行を見ると、新提案式の採用により、縦断方向フレーム解析結果と三次元解析結果の乖離が0.4から1.2に改善しているが、これは、同種の解析において、新提案式を採用することが望ましいことを示している。

なお、二方向スラブの適用範囲である縦断方向の

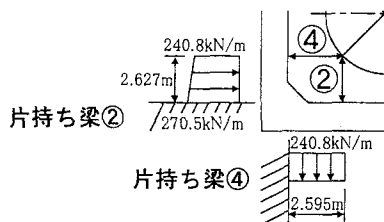


図-13 妻壁の片持ち梁解析モデル

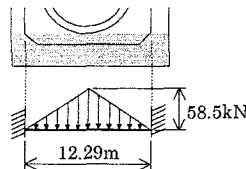


図-14 開口部下床桁の両端固定梁解析モデル

側壁(妻壁)については、6(1)で示した側壁の算定式がそのまま適用できる。

以上の検討結果および考察より、荷重強度 w における縦断方向フレーム解析モデルに適用する縦断方向分担荷重 w_z の算定式として次の(3)(4)を用いる。

- ・床版に適用する分担荷重の算定式
 $w_z = 0.5w / (L/B)^2 \dots (3)$ 本研究による新提案式
- ・側壁に適用する分担荷重の算定式
 $w_z = wH^4 / (L^4 + H^4) \dots (4)$ Grashof-Rankine 準拠

7. 構成部材梁置換解析による検討

(1) 構成部材梁置換解析モデル

a) モデルの概要

構成部材梁置換解析モデルのうち、妻壁の片持ち梁解析モデルを図-13に、開口部下床桁の両端固定梁解析モデルを図-14に各々示す。なお、開口上部の片持ち梁については、当該箇所がB3F床版と後打ち壁によって塞がれるので検討から除外した。

b) 境界条件

片持ち梁、両端固定梁の各解析モデルとも、既往の手法^{1) 2)}に準じて、下床版側および側壁側を固定支承とした。

c) 荷重条件

開口を有する妻壁の作用荷重については、既往の手法^{1) 2)}に準じて、表-3に示す側壁荷重をそのまま用いることとした。また、下床桁の作用荷重については、框桁等の設計で一般的に用いられている荷重分布¹²⁾を用いることとした。

(2) 妻壁の片持ち梁解析結果

a) 検討概要

図-13の片持ち梁解析結果と基本ケース(L/B=1.1)の三次元解析結果におけるモーメントを比較した。

b) 検討結果と考察

検討結果を表-7に示す。これより、いずれの位置

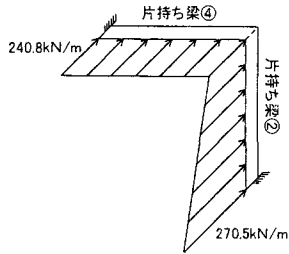


図-15 妻壁の立体フレーム解析モデル

表-7 三次元解析結果と片持ち梁解析結果の比較

比較位置	三次元解析 (a)	片持ち梁解析 (b)	(b)/(a)
片持ち梁②	720kN・m	810kN・m	1.1
片持ち梁④	660kN・m	860kN・m	1.3

表-8 立体フレーム解析結果

比較位置	三次元解析	立体フレーム 解析	片持ち梁 解析
片持ち梁②	720kN・m	750kN・m	810kN・m
片持ち梁④	660kN・m	760kN・m	860kN・m

においても片持ち梁解析で得られたモーメントが三次元解析結果を上回り、安全側となっていることがわかった。

また、三次元解析結果と片持ち梁解析結果が大きく乖離していないことから、既往の解析モデルの妥当性が確認できた。

(3) 妻壁の片持ち梁解析結果とねじりの影響に関する考察

a) 検討概要

表-7の結果から、片持ち梁解析結果には、ねじりに対する安全余裕も含まれるものと考えられた。

そこで本研究では、片持ち梁解析モデル同様の梁モデルでねじりの影響を表現できる立体フレーム解析モデルを作成し、その結果と片持ち梁解析結果あるいは三次元解析結果との関係について検討した。

図-3の片持ち梁②、④に対応する立体フレーム解析モデルの概要を図-15に示す。同解析モデルに用いた曲げ剛性については、片持ち梁解析モデルの諸元を準用したが、断面の純ねじり定数Kについては、既往の基準¹³⁾に基づいて、 0.293m^4 に設定した。

b) 検討結果と考察

検討結果を表-8に示す。これによると、立体フレーム解析結果は三次元解析結果と片持ち梁解析結果の中間値を示しており、既往の片持ち梁解析結果には、ねじりに対する安全余裕も含まれている。

(4) 開口部下床桁の両端固定梁解析結果

a) 検討概要

両端固定梁解析結果と基本ケースである $L/B=1.1$ の三次元解析結果におけるモーメントを比較した。

b) 検討結果と考察

解析結果を表-9に示す。当該解析モデルにおいて、

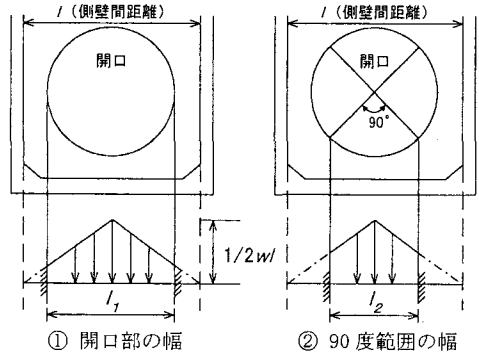


図-16 有効スパン長の評価手法

表-9 三次元解析結果と両端固定梁解析結果の比較

設計手法	有効スパン長 (図-16)	三次元 解析(a)	二次元 解析(b)	(b)/(a)
実務	l	280kN・m	2.76MN・m	9.8
①	l_1		1.96MN・m	7.0
②	l_2		1.05MN・m	3.8

有効スパン長を既往の設計実績（実務設計手法）に準じて側壁間距離（1）で評価した場合、得られた結果が三次元解析結果の約10倍程度と過大になることがわかった。この理由は、開口部の幅が側壁間より小さく、妻壁による拘束効果が影響しているためと考えられた。

そこで、スパン長の評価にあたっては三次元挙動を考慮する必要があると考え、図-16に示す二つの評価手法について同様の比較を行った。

その結果、表-9に示すように、いずれの手法を採用しても安全側の設計が可能である。

これにより、既往の有効スパン長の評価手法を見直すことにより、開口部下床桁の設計をより合理的にできる見通しを得た。

8. 結論

一般に、矩形立坑の側壁に作用する荷重等の計測実績は、施工過程が複雑である等の背景から皆無に近いという実情がある中で、現行の設計体系を踏まえて本研究で得られた主たる知見を以下に示す。

- ① 全体系フレーム解析モデルの一つである横断方向フレーム解析モデルにおいて、奥行きと幅の比 L/B 、あるいは奥行きと床版間の側壁高さの比 L/H が二方向スラブの適用範囲内にあるならば、横断方向の分担荷重は Grashof-Rankine の算定式を用いることにより三次元挙動を考慮できる。
- ② 全体系フレーム解析モデルの一つである縦断方向フレーム解析モデルにおいて、 $L/B=1.0$ の近傍では、縦断方向の分担荷重を Grashof-Rankine の算定式を用いて定めることにより三次元挙動を考慮できるが、 L/B の値が大きくなると、二方向スラブの理論解の境界条件と異なる。

る挙動が卓越してくるため、Grashof-Rankineの算定式に基づく分担荷重では適切に三次元挙動を考慮できない。

- ③ L/B が二方向スラブの適用限界付近であっても、縦断方向フレーム解析モデルで三次元挙動を適切に考慮するための手法として、縦断方向の分担荷重に、荷重分担率 50%における荷重強度 ($0.5w$) を $(L/B)^2$ で除した値を適用すると、 $L/B=1.1$ の場合とほぼ同等の安全余裕を確保できる。
- ④ 開口を有する妻壁の設計において、構成部材梁置換解析モデルの一つである片持ち梁解析は、ねじりに対する安全余裕も包含した結果を与える。
- ⑤ 開口部下床桁の設計において、構成部材梁置換解析モデルの一つである両端固定梁解析の有効スパン長を側壁間距離で評価すると過大設計となる。しかし、スパン長の評価を開口部の幅、または開口中心から下方 90 度範囲の幅とするならば、安全側でより合理的な結果を与える。

9. おわりに

本研究では、検討対象立坑に実存する地下鉄道の中間換気室を選定し、過去の研究成果等も踏まえて、立坑特有の構造特性を考慮できる二次元解析モデルの必要性和その手法の詳細を示した。

なお、当該手法の普遍性を十分に立証するためには、さらに①施工時～完成時の作用荷重の把握、②形状寸法が異なる複数の事例への本研究成果の適用、③所要となる入力パラメータの解析結果に対する感度の把握、等について検討する必要があると考える。

今後は、上記の各課題に関して検討を進め、結果がまとまった時点で、それらの成果を順次報告できればと考えている。

謝辞：本研究を遂行するにあたっては、(株)関東エンジニアリング 佐藤明正氏、メトロ開発(株) 秋山真次氏、元パシフィックコンサルタンツ(株) 大森社一郎氏、(株)熊谷組 岩波基氏、緒方明彦氏、(株)CRC ソリューションズ 野口利雄氏から貴重なデータやご意見を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本トンネル技術協会：地中送電用深部立坑、洞道の調査・設計・施工・計測指針，1982. 3.
- 2) 土木学会：トンネル標準示方書〔開削工法編〕・同解説，pp. 83-89, 1996. 7.
- 3) 帝都高速度交通営団：東京地下鉄道南北線建設史，pp. 441-446, 2002. 3.
- 4) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物），pp. 174-175, 1992. 10.
- 5) 岩波基：施工時偏側圧が作用する大深度円形立坑の設計法に関する研究，早稲田大学学位論文，pp. 79-80, 2003. 3.
- 6) 帝都高速度交通営団建設本部：土木構造物設計示方書，pp. 10-40, 1998. 10.
- 7) 帝都高速度交通営団建設本部：連壁の本体利用設計要領（案），pp. 1-3, 1998. 10.
- 8) 渡辺健：箱型ラーメンの設計，オーム社，pp. 13-17, 1984. 3.
- 9) 日本コンクリート工学協会：鉄筋コンクリート構造物の有限要素解析と設計法研究委員会：コンクリート構造物の設計に FEM 解析を適用するためのガイドライン，pp. 75-97, 1989. 3.
- 10) 石田雅博：立坑に作用する土圧・水圧，基礎工，Vol. 26, No. 4, pp. 17-18, 1998. 4.
- 11) 生山法裕，馬場良正：立坑の 3 次元的地盤挙動の研究，日本国土開発技術研究報告，No. 12, pp. 71-82, 1992. 12.
- 12) 例えば，日本建築学会：建築基礎構造設計指針，p. 171, 1988. 1.
- 13) 日本橋梁建設協会：デザインデータブック，p. 177, 1997. 9.