大規模大深度地下工法の計画手法に関する研究

—標準モデル工事による地下工事計画手法の一考察—

A STUDY OF HOW TO PLAN DEEP AND
WIDE EXCAVATION WORKS

間瀬 惇平*, 南林 和**, 寺林 肇***, 桂 純二****, 佐藤 龍生*****

*Junpei MASE, Kazu NANBAYASHI, Hajime TERABAYASHI,**Junji KATSURA and Tatsuo SATO*

This paper presents a study on construction planning approaches for building projects with deep and large-scale underground work. Based on a variety of data extracted from seventy recent underground construction examples in Japan, a shoring method for a virtual model project is specified. A comparison in construction schedule and cost of the model is made between the cases with ordinary/conventional concreting procedure combined H-sections strut ("Kumitate shuuchuu kiribari" Method) and with top down construction procedure ("Sakauchi" Method). Rough estimate diagrams derived from a technical calculation program for shoring method will assist easy and quick selection of the most optimum construction method.

Keywords :Excavation works, Retaining walls, Statistical Analysis,
Standard Design Model, Retaining suport, Sakauchi Method

掘削工事、山留壁、統計分析、標準デザインモデル、山留支保工、逆打工法

1. はじめに

建築工事における地下工事は、コストや工程的に、その占めるウェートは大きい。特に、都市においては、地下の高利用や近隣環境への影響などから、地下工事の適正な計画・実施の重要性は増大している。

筆者らは「建築工事における大規模・大深度掘削の設計と施工」¹⁾ に関しては長年の間、業務としてその適正化に努力して来ている。

山留工法の適・不適は安全性、経済性、工期などに大きな影響を与える。^{2) 6)}

建築の適正工期は、建物の規模、地上階数、地下階数、構造種別、建物用途、仕上げの種類とグレード、設備の程度、立地条件、気象条件、労務資材の供給状況などにより変化する。

特に根切山留工事、基礎杭工事をともなう建物の新築工事の場合は、地盤・地下水・地中障害物等と言った不特定・不明確な要因のもとに工事の計画・施工することになるので、工程計画上は不特定のバラツキの多いものとなりやすい傾向になる。^{2) 7)}

一般に発注者が工事請負契約を結ぶ場合には、建物全体工期のみが設定され、請負者は指定された全体工期を制約条件として各部分

工事に当てられる工程を逆算し、その工程で可能な技術的検討を種々行い、適切な工法選定を行い、場合によって設計変更をも加味して、予定工期内に完成させている。

適性工期が新築建物の企画設計段階で検討されれば、よりよい品質の建物が、経済的なコストで、適切なる工期で発注が出来、請負側もより少ないリスクで工事を推進することが出来る。

小規模工事の場合は、その工法の選定は割合に簡明であるが、大規模大深度の地下工事をともなう場合は、その工法選定とその施工計画の適正化のためには、充分なる調査研究が必要となる。

そこで本論文は、最近の大規模大深度の掘削工事を約70件の事例の中からその平均的な標準モデル工事を想定し、その標準モデル工事の技術計画・工程計画・コスト計画手法を明らかにして、安全性、工程、コスト比較を解明し、企画計画段階におけるその地下工法計画の適正化をはかるものである。

具体的には、順打工法(組立集中切梁)と逆打工法の比較を論じて、企画計画段階における地下工法計画の適正化について考察を加える。

* 大成建設㈱建築本部建築部

** 大成建設㈱経営本部情報企画部

*** 大成建設㈱建築本部建築技術部

**** 大成建設㈱東京支店

***** 大成建設㈱設計本部工事監理部

Building Construction Dept. Building Construction Div., Taisei Corporation
Information Planning Dept. Business Planning and Administration Div., Taisei Corporation
Technology Promotion Dept. Building Construction Div., Taisei Corporation
Tokyo Branch, Taisei Corporation
Quality Control Dept. Design & Proposal Div., Taisei Corporation

2. 標準モデル工事による地下工法の計画

2. 1 工法選定・概算ロジックの考え方

企画計画段階における、大規模大深度地下工法の計画手法について考える時、図1の如く、多種要因（条件）に対して各地下工法の技術面・工程面・コスト面において各々のその可能性を調査研究し検討する必要がある。

図1 山留計画概算ロジック（企画計画段階）

手順として、まず、技術面・工程面・コスト面で、その可能性のある工法の中から、土留壁工法あるいは支保工の適切なものを過去の経験や統計手法により、推定する。

その場合、①工事概要に関する項目（所在地・工期・工事規模など）、②地下工事の概要に関する項目（採用される地下工事の各工法・地下工事規模など）、③工事地盤に関する項目の中から、（土質条件・柱状図・N値・地下水位など）の各項目が判明すれば、約80%の確率にて工法推定が可能になって来ている。^{3) 4)}

しかし、近隣環境、地域性、施主・設計事務所・建設会社の意図、工事責任者（所長）の嗜好等により影響される部分も多い。大規模大深度建築は一般に一品生産としての特殊要因を多分に含むこともあり、その都度具体的に可能性のある多くの工法が検討され、工法比較の中から最終案が決定されて行くケースが多い。

次節以下に最近の大規模大深度工事例約70件の中から標準的なモデル工事を想定し、採用される可能性のある数種の工法を選定し、その地下工法内容を概略決定し、全体工期内に施工可能であるかどうか、概略予算が全体予算の中におさまるかどうか、概算ロジックによる計画手法を提案するものである。

工法選定にあたっては「山留壁の工法推定モデルとその推定程度の比較」³⁾と「判別分析による山留支保工の推定」⁴⁾がある。

山留壁として「親杭横矢板工法」「シートパイル」「場所打ち壁（ソイルモルタル壁及RC連壁）」の中から工法推定をする。

山留支保工については、切梁工法（井型切梁及び組立集中切梁）、地盤アンカー工法、逆打工法などが考えられる。特に大深度大規模工事の場合は、1F床先行工法のように各工法を併用（複合使用）するものも多い。

又、洪積層の良質土で、地下水が低く、ピアを必要としない直接基礎の大規模工事の場合で、地盤アンカー工法採用が可能な近隣条件がととのえば、地盤アンカー採用によるオープン掘削が、短工期で最も経済的に施工出来ることが簡単な分析で理解出来るので、今

回の調査研究からは省略する。

又、1F床先行による複合支保工形式による地下掘削工法が採用されるケースも多くあるが、順打工法と完全逆打工法による地下掘削工法の中に位置するもので、その都度の要因により、比較出来るので標準モデル化からは省略する。

その結果、組立集中切梁工法を主たる仮設工法とする地下掘削工法と、完全逆打工法による地下躯体利用工法とを、工法比較の主たる対象とする。

2. 2 モデル工事の適用範囲

1) 対象物件

地下2階から地下4階程度の地下室を持つ事務所・ホテル・住宅等の一般建物とする。

2) 掘削深度：GL-10mから20m程度の地下工事とする。

3) 掘削平面積：45m×45m(約2,000㎡)から70m×70m(約5,000㎡)程度とする。

4) 対象地盤：日本国内の沖積層地盤を対象とし、ピアなどの支持層はGL-25m程度とする。止水壁採用時の地下水位はGL-3.0m程度とする。

5) 山留壁工法の種類：親杭横矢板工法、シートパイル工法・止水壁（ソイルモルタル壁及RC連壁）。

6) 山留支保工の種類：組立集中切梁工法を主たる仮設工法とする地下掘削工法と、完全逆打工法による地下躯体利用掘削工法とする。

2. 3 大深度大規模工事のデータ内容

1988年から現在工事中の大規模大深度領域（Bゾーン）の集中組立切梁工法と逆打工法を約70件データとして取り上げる。

図2 支保工選定ゾーン

東京地区（44件）を中心に大阪、名古屋、横浜、東北、広島、北信越等の各地のデータである。このデータの山留支保工件数、工期、掘削深さ、山留平面積についてのデータを図3、4、5、6に示す。

図3 山留支保工件数

図4 工期

図5 掘削深さ

図6 山留平面積

2. 4 標準モデル建物の工事概要

(大規模大深度掘削工事)約70件の概要の平均値は表-1の如くである。

表1 大規模大深度掘削工事概要(平均値)

掘削深 m	山留面 m	平面 形状	水位 差	平均 N値	砂割 合	砂の N値	粘土 N値	工期 月
15.7	4168.1	2.1	11.8	10.4	0.52	17.0	3.0	29.1

地下 階	根切 m	※ 平面形状
2.4	63574.4	1 : 長方形 2 : 一边は斜め(台形、三角形) 3 : 多角形 4 : 不整形

そこで同程度の建物の設計をするための方法論を確立するために、標準モデル工事を以下の如く仮定する。

- ① 建物の標準スパンは6,400として超高層(あるいは高層ビル)で多用されているものとする。平面形としては、9スパン×9スパンで、「約60m×60mの正方形」とする。(図7)
- ② 地下階数 B3階とし、掘削深度は「概算グラフ」図12でモデル化されている深度とし、GL14mと仮定する。
- ③ 地下構造は、超高層部直下柱のみ、すべて地下SRC造とする。低層部はB1のみSRC造とし、他はRC造とする。(図8)
- ④ 土質条件は、データ表1の平均値と仮定する。これは東京地区の下町低地の沖積層の地盤条件に近似している。
- ⑤ 基礎杭は、GL-25.00mを支持層と仮定し、ピアーク杭にて支持するものと仮定する。
- ⑥ その他、地上部はS造の20F建とし、これらの結果をふまえて表2、3に工事概要を示し、図7に工事概要図を示す。
- ⑦ 尚、工期の計算には稼働率65%を用いている。

表2 工事概要

物件名称	標準モデルビル(地上S)(地下SRC)
主構造名称	S造
主用途名称	事務所
工期	29ヶ月~34ヶ月(稼働率65%とする。)
敷地面積	4,000.00㎡
掘削面積	3,620.00㎡「60m×60mの正方形」とする。 建物の標準スパンは6,400とする。
延床面積	51,248.00㎡
地下階数	3階
地上階数	20階
塔屋階数	2階

表3 階別情報

階名称	躯体構造	床面積	階高	用途
B3	RC造	3,600.00㎡	4.00m	機械室
B2	RC造	3,600.00㎡	4.00m	車庫・倉庫
B1	SRC造	3,600.00㎡	4.00m	店舗
1	S造	3,600.00㎡	4.60m	ロビー
2	S造	3,600.00㎡	3.60m	事務所
3	S造	3,600.00㎡	3.60m	事務所
4	S造	1,720.00㎡	3.60m	事務所
5~20	S造	1,720.00㎡	3.60m	事務所
P1~P2	S造	204.80㎡	3.60m	機械室・塔屋

図8 地下構造モデル断面

図7 建物概要

3. 標準モデル工事の山留工法の推定

「山留壁及支保工の選定に関する統計的分析」の研究論文^{3) 4)}に詳述した判別関数式により判別する。

3. 1 土留壁の推定

判別分析による工法推定モデルの判別式に標準モデルの数値を代入する。

$$x = 1.65 \times 10^{-1} a + 8.09 \times 10^{-5} b + 4.97 \times 10^{-2} c + 2.59 \times 10^{-1} d - 9.54 \times 10^{-2} e - 2.34 \times 10^{-2} f - 1.10 \times 10^{-1} g - 5.53 \times 10^{-1} h - 2.29 \times 10^{-1} i - 1.95 \quad \text{式(1)}$$

$$y = 2.94 \times 10^{-1} a + 1.03 \times 10^{-4} b - 2.56 \times 10^{-1} c + 5.22 \times 10^{-2} d - 6.78 \times 10^{-2} e + 7.21 \times 10^{-2} f - 4.43 \times 10^{-1} g + 3.28 \times 10^{-1} h - 2.79 \times 10^{-1} i - 2.52 \quad \text{式(2)}$$

a : 掘削深度(m) 14 f : 平均N値 10.4
b : 掘削面積(㎡) 3,620 g : 砂割合 0.52
c : 地下水水位差 (m) 11 h : 粘土割合 0.48
d : 粗粒土厚(m) 9 i : 硬層厚 (m) 0
e : 細粒土厚(m) 5 定数 : -1.95

以上を代入すると、 $x = 2.811558$ $y = -0.03942$

◎印(座標 $x = 2.811558$, $y = -0.03942$)

図9 正準判別空間内の各工事の位置(標準モデルビル ◎印)

3. 2 山留支保工の推定

判別分析による支保工推定モデルの判別式に標準モデルの数値を代入する。

$$x = -3.95698g - 1.06886e - 0.01516c - 0.03358f - 0.00013b + 0.157228a - 0.03424d + 0.007622h + 3.567565 \quad \text{式(3)}$$

$$y = 3.910225g - 0.09166e + 0.098696c - 0.07553f - 0.00028b + 0.126627a - 0.01514d + 0.06897h + 0.009001 \quad \text{式(4)}$$

a : 掘削深度	14	e : 敷地平面形状	1
b : 掘削面積	3,620	f : 平均N値	10.4
c : 地下水位差	11	g : 砂の割合	0.52
d : 砂のN値	17.0	h : 全体工期	29.11
定数 :			+3.567565

以上を代入すると、 $x = 1.295396$ $y = 4.970019$

◎印 (座標: $x = 1.295396$ $y = 4.970019$)

図10 Bグループの判別結果散布図 (標準モデル ◎印)

以上の結果、標準モデル工事としては、山留壁は場所打ち壁を選定する。山留支保工については、集中切梁領域と逆打領域の境界に近い所に位置していることがわかるので、両工法の計画内容の仮定と工程計画・コスト計画及其比較を以下に行う。

4. 順打工法 (組立集中切梁) の場合のモデル計画

地下3階の標準モデル工事については、山留壁としては、ソイルモルタル壁(SMW)を採用し、支保工は組立集中切梁3段とする。

4. 1 側圧の仮定

(1) 土質の条件は、軟かい粘土地盤を想定し、主働土圧係数 $K_A = 0.5$ と仮定し、主働土圧 $P_a = 0.5 \gamma H$ とする。

これは、地下外壁に作用する静止土圧係数とほぼ同様と考える。

(2) 地下水の常水位を $GL - 3.0m$ と仮定する。

4. 2 山留壁モデルの仮定

山留計算結果 最大モーメント $M_{max} \approx 73 t \cdot m/m$

最大剪断力 $S_{max} \approx 49 t/m$ となり、

その結果

SMW工法 主材 $H - 500 \times 200 \times 10 \times 16$ @450 と仮定する。

4. 3 切梁支保工モデルの仮定

地下3階、軟かい粘土地盤の場合 (概算グラフ) より求める。

集中切梁 (ロ) タイプ 図14、図15参照

集中切梁スパン (13,400の場合)

1 段目: 約180t / 1 組集中切梁 2 H 300×300×10×15

2 段目: 約560t / 1 組集中切梁 3 H 350×350×12×19

3 段目: 約780t / 1 組集中切梁 3 H 350×350×12×19

とモデル支保工を仮定する。

図11 組立集中切梁工法モデル断面図及山留材料リスト

4. 4 山留工事技術計算プログラムによる概算グラフの作製

「山留計画システム」⁵⁾に記載の「山留工事技術計算プログラム」を利用して作成した「概算グラフ」の内容を以下に記述する。

1) 切梁腹起しグラフ作成の条件

組立集中切梁の概算グラフは、以下の条件で作成している。

① 根切り深さと軀体レベル、切梁レベル

地下1階から地下4階まで、標準的な建物の地下を下のような深さに仮定する。

図12 地下各階標準深さ

② 土圧

土圧は各根切り深さ毎に以下の6種類の地層を想定し、建築基礎構造設計規準に示されている土圧を採用した。上載荷重は $1.0 t/m^2$ の等分布荷重とし、水位は、 GL から床付まで、段階的に変化させる。砂地盤については $\gamma = 1.8 t/m^3$ 、粘土地盤については、 $\gamma = 1.7 t/m^3$ とする。

図13 各土質条件別の側圧の仮定 (◎印 標準モデル工事)

以下に地下3階軟かい粘土地盤 (標準モデル工事) の山留設計概算図表の例を図15に示す。又、今回の標準モデル工事の組立

図14 集中切梁工法 (平面割付図)

図15 山留設計概算図表（地下3階、軟かい粘土地盤の例）

5. 逆打工法（地下躯体利用工法）の場合のモデル計画

実際の地下空間の設計は、多様化して来ており逆打軀体利用の是非の判断が困難な場合もあるが、本論文の場合は標準モデルとして6,400スパン割の地下室とする。

土留壁は順打工法の場合と同様ソイルモルタル壁(SMW)とする。

構真柱については、図16の如く、高層直下と低層の中柱及外柱とを区けて計画している。以下に主たる逆打計画の内容を記す。

5. 1 構真柱工法のモデル計画

地下柱に関して大別すると、下記柱プランの通り 4 タイプに区分される。

図16 逆打時概算
支持力一覧

○印：高層直下のコア部柱（12P）

本設鉄骨柱が、B 3 F L まであり、逆打時概算支持力は、約 1,300t/本となる。

〔本設鉄骨柱＝構真柱〕

B 1 階柱頭は

B 1 階柱脚～B 3 F L
〔仮直柱〕

B 3 F L ~ 杭中根入 2 m

$$\square \quad 800 \times 45$$

$$2 \text{ H s} - 900 \times 300 \times 16 \times 28$$

$$2 \text{ H s} - 900 \times 300 \times 16 \times 28$$

〔本設鉄骨柱＝構真柱〕

B 1 階柱頭は

B 1 階柱脚～B 3 F L

〔飯具柱〕
R 2 F

B 3 F L ~ 机中根入 2 m

△印：低層部中柱及び高層直下中柱（28P）

本設鉄骨柱が、B 1 F L まであり、逆打時概算支持力は、約 450t/本となる。

〔本設鉄骨柱〕

B 1 階柱頭

B 1 階柱脚

B I F
〔仮直杖〕

R1F1~杭

◇印：低層部外周柱

本設鉄骨柱が、B 1 F L まであり、逆打時概算支持力は、約 320t/本となる。

この鉛直荷重を、1階梁を通して山留壁芯材に負担させる事とすると、柱裏の山留壁の芯材を2本のみ支持層に根入れしておけばよい。

〔本設鉄骨柱〕

B 1 階柱頭

B 1 階柱脚

$$\square \quad 600 \times 28$$

$$2 \text{ H} - 600 \times 200 \times 10 \times 15$$

5. 2 床梁計画に関するコメント

構真柱建込精度の問題で、地下階梁は構造上許されれば鉄骨無し
のRCとした方が鉄骨取り合ひが無くなり施工がしやすい。また鉄
骨が入る梁については、建込誤差を吸収出来る接合方法を充分に検
討しておく必要がある。

又逆打工法において、掘削用開口から長尺鉄骨を投入し、取り付ける作業は、極力避けたいものである。

梁断面については、梁成を統一し、又水平ハンチ、垂直ハンチを避けるのも、逆打工法採用時の重要な検討項目である。

更に、逆打工法では掘削に先立って打設される本設躯体のＲＣ床が架設時に切梁として作用するため、周辺土圧や、プレロードによる応力のスムーズな流れを妨げないような開口部配置を計画する必要がある。特に外周部に近い部分の床は注意が必要である。

順打工法の場合は、地下階数及び地下掘削面積の大小が、そのままクリティカルパスの中に入ってくるが、逆打工法の場合は、特別な場合を除いて地下4階程度までの地下階数はクリティカルにならないと言える。又地下掘削面積の大小についても、1F先行床築造迄の各工事数量のみが、クリティカルパスの中にカウントされ、それ以下の躯体数量はカウントされない為、順打工法に較べて工程の延伸は少ない。

建築工事は与えられた工期の中で、どの工法を採用したらベストかという検討が必要となるが、特に地下躯体工事は躯体業者の労務状況に左右される事が多いので、その辺りの状況で採用工法が異なる事も念頭においておく必要がある。又、順打工法の場合は、山留工事と根切工事の交互作業となる為、労務山積に山谷が生じ、これが工程管理上の管理要素となる。

逆打工法を採用した場合は、地下躯体工事の中で、先行床梁躯体工事のみがクリティカルとなる。その他躯体工事工期は余裕があるので、平準化された労務で工事を進める事ができ、品質管理上、安全管理上も好ましい条件を確保できる。

7. 標準モデル工事のコスト計画

以下に順打工法で施工した場合と逆打工法で施工した場合のコスト比較をする。

工法選定時のコストスタディについては、下表による比較を行う。

	順 打 工 法	逆 打 工 法
構真柱関連工事費		C
関連架設工事費		D
栈橋工事費	A	
支保工費	B	
先行床関連工事費		E
逆打関連工事費		F
	A + B	C + D + E + F

即ち、順打工法における栈橋工事費(A)+支保工費(B)と、逆打工法における構真柱関連工事費(C)+関連架設工事費(D)+先行床関連工事費(E)+逆打関連工事費(F)とを比較する事により、概略計画時点でのコスト比較を行う事ができる。

7. 1 順打工法の場合のコスト計算

栈橋工事費A(栈橋架払、垂直水平継ぎ架払、栈橋杭打抜、栈橋杭開口処理等)

$$A = 1,260 \text{ m}^2 \times @60,000 \sim @70,000/\text{m}^2 \\ = 75,600,000 \sim 88,200,000$$

支保工費B(腹起切梁架払、棚杭打抜及び開口処理、裏込め等)

$$B = 3,620 \text{ m}^2 \times 3 \text{ 段} \times @15,000 \sim @20,000/\text{m}^2 \\ = 162,900,000 \sim 217,200,000 \\ A + B = 238,500,000 \sim 305,400,000$$

順打工法採用の場合、地下階数が増える事により、栈橋工事費は杭長が長くなり、垂直水平継ぎの段数が増えるので、栈橋架面積当りの単価は上がる事となる。支保工費についても、背面土圧が大きくなる事により、鋼材メンバーも大きくなり、従って施工面積当りの単価が上がる事となる。

ちなみに、この標準モデル工事が、B2と浅くなった場合、あるいは、B4と深くなった場合、平面的に、XY共2スパン広がった場合、あるいは、XY共2スパン狭くなった場合の各々のケースの順打工法のコスト比較をすると表6の如くなる。

表6 山留栈橋工事費各ケースのコスト比較

	(-2スパンの場合)	(標準モデル工事)	(+2スパンの場合)
地下階数	47.2m×47.2m	60.0m×60.0m	72.8m×72.8m
山留平面積	約2,000m ²	約3,500m ²	約5,000m ²
B2階(10m掘削)	0.48	0.70	1.07
B3階(14m掘削)	0.67	1.00	1.50
B4階(18m掘削)	0.96	1.43	2.14

(標準モデル工事を1とする)

次に、根切m²当りの山留栈橋工事費のコスト比較をすると、表7の如くに、B2階、B3階の場合はほぼ等しく、B4階の場合は1割～2割程度のコストアップになっている。これは、栈橋支柱及4段切梁材のサイズアップによるものと考えられる。

表7 山留栈橋工事費の根切m²当り各ケースの単価比較

	(-2スパンの場合)	(標準モデル工事)	(+2スパンの場合)
地下階数	47.2m×47.2m	60.0m×60.0m	72.8m×72.8m
山留平面積	約2,000m ²	約3,500m ²	約5,000m ²
B2階(10m掘削)	1.09	0.98	1.01
B3階(14m掘削)	1.08	1.00	1.02
B4階(18m掘削)	1.20	1.11	1.13

(標準モデル工事を1とする)

7. 2 逆打工法の場合のコスト計算

構真柱関連工事費C(構真柱建込費、養生ケレン費、スcaffolding仮支柱費等)

$$C = \text{構真柱建込費他} \quad 64 \text{本} \times 14 \text{m} \times @20,000 \sim @25,000/\text{m} \\ = 17,920,000 \sim 22,400,000$$

+仮支柱費(高層コア部)

$$12 \text{本} \times 2 \text{m} \times 0.5 \text{t/m} \times @130,000/\text{t} \\ = 1,560,000$$

+仮支柱費(高層外周部)

$$24 \text{本} \times 2 \text{m} \times 0.4 \text{t/m} \times @130,000/\text{t} \\ = 2,496,000$$

+仮支柱費(低層高層中柱)

$$28 \text{本} \times 10 \text{m} \times 0.2 \text{t/m} \times @130,000/\text{t} \\ = 7,280,000$$

+外周柱取合

$$36 \text{本} \times @100,000/\text{本} \\ = 3,600,000$$

+施工床整備費

$$3,620 \text{ m}^2 \times @2,000/\text{m}^2 \\ = 7,240,000$$

$$= 40,096,000 \sim 44,576,000$$

関連仮設工事費D(開口部諸掛、水平運搬施設、換気設備等)

$$D = 3,620 \text{ m}^2 \times 3 \text{ F} \times @3,000 \sim @4,000/\text{m}^2 \\ = 32,580,000 \sim 43,440,000$$

先行床関連工事費E(躯体補強費、養生費等)

$$E = 3,620 \text{ m}^2 \times @3,500 \sim @4,500/\text{m}^2 \\ = 12,670,000 \sim 14,480,000$$

逆打関連工事費F(各工事施工費割増、グラウト、鉄筋ジョイント等)

$$F = 46,000 \text{ m}^2 \times @200 + 3,620 \text{ m}^2 \times 3 \text{ F} \times @12,000 \sim @15,000/\text{m}^2 \\ = 139,520,000 \sim 172,100,000$$

$$C + D + E + F = 224,866,000 \sim 274,596,000$$

逆打工法採用の場合、地下階数が増える事により、構真柱関連工事費は上がるが、先行床関連工事費は変わらない。又順打工法の場合と違って、関連仮設工事費と逆打関連工事費の施工床面積当りの単価は変わらない。

ちなみに、逆打工法の場合も同様に、地下2階・地下4階、-2スパン・+2スパンの各ケースでのコスト比較を行った結果が表8、表9である。

表8 逆打工事費各ケースのコスト比較

	(-2スパンの場合)	(標準モデル工事)	(+2スパンの場合)
地下階数	47.2m×47.2m	60.0m×60.0m	72.8m×72.8m
山留平面積	約2,000m ²	約3,500m ²	約5,000m ²
B2階(10m掘削)	0.47	0.75	1.11
B3階(14m掘削)	0.63	1.00	1.47
B4階(18m掘削)	0.78	1.25	1.83

(標準モデル工事を1とする)

表9 逆打工事費の根切㎡当り各ケースの単価比較

地下階数 山留平面図	(-2スパンの場合)	(標準モデル工事)	(+2スパンの場合)
	47.2m×47.2m	60.0m×60.0m	72.8m×72.8m
地下階数	約2,000㎡	約3,500㎡	約5,000㎡
B2階(10m掘削)	1.06	1.05	1.06
B3階(14m掘削)	1.02	1.00	1.00
B4階(18m掘削)	0.98	0.97	0.97

(標準モデル工事を1とする)

上表より、逆打工事の場合地下階数が多い方が、コストメリットが大きい事が解かる。

又、掘削㎡当りの単価は、順打工法と逆で、地下階数が多い程、単価が下る傾向にある。

7. 3 両工法の比較と考察

結果として、標準モデル工事の場合、逆打工法の方が、2～3千万、割安という結果になった。工期短縮による総合仮設的なメリットを考えれば、逆打工法の方が更にコストメリットがあると考えられる。

ここで注目しておきたいのが、逆打工法における構真柱関連工事費が低い事である。仮にベタ基礎(杭無し)の建物の場合であれば、逆打工法採用のコストメリットはほとんど発生しない。又仮に、本体設計の地下柱に鉄骨が入っていなかったとしたら(仮に高層直下もB1FLまでと仮定すると)、そして外周部が、山留壁に鉛直荷重を負担させる事ができないとしたら、下記の金額が増分となり、逆打工法採用のコストメリットは極端に低減する結果となる。

$$\text{ex } (12\text{本} \times 8\text{m} \times 0.5\text{t/m} + 24\text{本} \times 8\text{m} \times 0.4\text{t/m} + 36\text{本} \times 10\text{m} \times 0.3\text{t/m}) \times @130,000 = 30,264,000$$

コストスタディをする上での結論として、逆打工法を採用する場合には、①本設杭がある事、②仮設構真柱を極力少なくする事の2点が重要項目であると言える。

地下階数が増えた場合、順打工法においては、栈橋架面積当りの単価、支保工架面積当りの単価が上がる事により、結果として地下施工床面積当りの単価が上がる方向になる。

逆打工法の場合は、構真柱関連工事費は上がるものの、先行床関連工事費は固定であり、又関連仮設工事費、逆打関連工事費単価は変らない為、地下施工床面積当りの単価は、逆に安くなる方向にある。従って特殊な場合を除いて、地下階数が多い方が、逆打工法採用のコストメリットは大きいと言える。

8. 結論

結論として、標準モデル工事の場合における順打工法及逆打工法については次のことが言える。

8. 1 順打工法(沖積層地盤、B2～B4の大規模工事の場合)

地下のある建物の順打工法は、考え方として全ての工程がクリティカルパスで継っている工法である。無理に工期を短縮しようとするれば、安全管理、品質管理を犠牲にしてかなり乱暴な施工計画を要求される結果となる。長所としては、長年の実績によりコストの把握が明解であり、工期促成の為の労務・機械の導入も通用する工法であると言える。

8. 2 逆打工法(沖積層地盤、B2～B4の大規模工事の場合)

手間の掛る地下躯体工事を、クリティカルパスからはずす工法である。最近では逆打工法の多くの実績から、コストもほぼ明解に把握できるようになったし、ディテールについても確立された技術であると言って良い。工程的には、構真柱建込杭工事及び先行床築造工事が、順打工法に較べて工期が長くなるものの、それ以降の地下躯体工事はクリティカルパスから除外される事となる。従って地下階数が多い程、工程短縮のメリットがあり、コストダウンをはかることが出来る。

8. 3 計画手法については以下の事柄が解明されたとと言える。

- ① 「標準モデル工事」を想定して地下計画を「モデル化」することにより、難解な地下工法の選定及順打工法と逆打工法の工程・コスト比較を可能にすることができた。
- ② 技術計算による計画内容については、1)地下階数(B1～B4)、2)地盤条件(砂質地盤3分類、粘土地盤3分類)別に層別して「概算グラフ図」を作ることにより、簡明にして早期の検討が可能である。
- ③ 土留壁及支保工の推定については統計的手法より10項目程度の要因で約80%の正確で立証することが、今回の標準モデル工事の場合でも証明することが出来た。

謝辞

本論文をまとめるにあたり、早稲田大学名誉教授 田村恭先生には、研究全般についてご指導を頂きました。又、早稲田大学理工学部建築学科の各教授の方々には各分野にわたり色々ご指導、ご鞭撻を賜り心より御礼申し上げます。

又、大成建設 澤田一郎氏・小林英雄氏・相馬大輔氏・酒田州亮氏 成和機工(株) 河野寧之助氏・岩永允宏氏 ヒロセ(株) 党宣夫氏にはデータ収集・解析に多大のご協力を頂きました。

大成建設株式会社 深海謙吉氏はじめ、各支店担当者及各工事関係者には資料収集、整理にあたりご協力を頂きました。

ここに心より感謝の意を表します。

参考文献

- ① 間瀬淳平：建築工事における大規模・大深度掘削の設計と施工 1990.7「基礎工」P86～P89
- ② 山下丞二、間瀬淳平：山留工事の設計施工 1996.7 初版 P4～P7、P34～P36 井上書院
- ③ 嘉納成男、間瀬淳平、金沢英紀、信田直裕、安富彩子：山留壁の工法推定モデルとその推定精度の比較 日本建築学会 計画系論文集510号、1998年8月号
- ④ 安富彩子、嘉納成男、金沢英紀、信田直裕、間瀬淳平：地下工事における実績資料の統計的分析(その3) 判別分析による山留支保工の推定 1996年 日本建築学会関東支部研究報告集 P345～P348
- ⑤ 間瀬淳平：「山留め計画システム」土質・基礎工学へのコンピュータ利用入門(共著) P69～土質工学会編(1979年2月発行)
- ⑥ 山留設計施工指針：1988.1第2版 P23～P27 日本建築学会
- ⑦ 榎並昭、内山和夫、笠井芳夫、毛見虎雄、間瀬淳平他：「鉄筋コンクリート地下構造物の解体工法(建築業協会編) P27～P114 鹿島出版会 1987年1月初版

(1998年6月9日原稿受理、1998年8月21日採用決定)