

アンダーピニング工事における最終受替荷重の 重回帰式を用いた算定法に関する考察

市野道明¹・清水幸範¹・小泉淳²

¹正会員 工修 佐藤工業株式会社 東京支店土木部門 (〒160-0023 東京都新宿区西新宿 6-24-1)

E-mail: lchino@satokogyo.co.jp

E-mail: Yukinori.Shimizu@satokogyo.co.jp

²正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

E-mail: koizumi@mn.waseda.ac.jp

一般に、建物などの構造物をアンダーピニングする場合、その一部分を多点で受替えるケースが多い。このため建物の変位挙動は複雑になり、それらは多くの労力を伴って制御されている。しかしながら建物のレベリング時には、受替荷重を除荷した箇所の変位が沈下を示さないなど技術者の意図と反する挙動が見られ、このような場合には現場合わせで建物の変位を調整するものの、不等変位を残さざるを得ない実状にある。本研究は、建物のレベリング時の受替荷重を、計測データに基づいた重回帰式により逐次算出し、最終受替荷重を精度よく推定する方法を提案するとともに、現場計測結果との比較から本手法の妥当性を明らかにするものである。

Key Words : *underpinning, underpinning load, multiple regression analysis, multivariate analysis*

1. はじめに

近年、アンダーピニングは都市部における特殊な施工条件の増加から、その件数が飛躍的に増加するとともに大規模化してきている¹⁾。このため、建物などの構造物は、その全体ではなく一部分を多点で支持されるケースが多い。このような場合のアンダーピニングの形式^{2), 3)}は下受け形式が採用される例が多く、本研究で対象にするアンダーピニング工事も同様の形式である。一部分を受替えるアンダーピニングの場合、建物の変位挙動は地中梁、基礎フーチング、柱、壁、上部梁など、構造物本体の剛性の影響、および非受替部の基礎杭の周面摩擦や先端支持力、建物底面下の地盤反力の影響などを受けるため相当に複雑になる。

建物の健全性は油圧ジャッキを用いた受替荷重の制御により確保される。受替荷重は建物の設計荷重を保持するように制御されることが多いが、設計荷重は真の建物荷重と異なることが多く、結果として建物の各点に不等変位を生じるケースが見られ

る⁴⁾。この不等変位が、既設杭の鉛直変位や既設杭間の相対変位などで定める管理値⁵⁾を超えない範囲であっても、供用者の心情や一層の品質向上などを勘案すれば、建物各点の不等変位を取り除き施工前の状態に復元するのが最良である。以降、アンダーピニング工事の最終段階において、建物の各点に生じた不等変位を取り除く工程を建物のレベリングと呼ぶ。

建物のレベリングにおいて、すべてのジャッキ荷重を同時に除荷することは、想定外の建物の変状などが懸念される。このため、建物のレベリングは1本あるいは数本程度のジャッキ荷重の除荷により行われるのが通例である。しかしながら、建物は前述したように多点で支持されているため、除荷した荷重は他の箇所へ分散する。他のジャッキが分担する、非受替部の地盤が分担するなどが想定されるがそのメカニズムは明確でなく、技術者の意図する挙動を示さないケースが多く見られる。

一方、アンダーピニング工事における既設構造物の挙動予測に関する研究は数例見られる。それらの

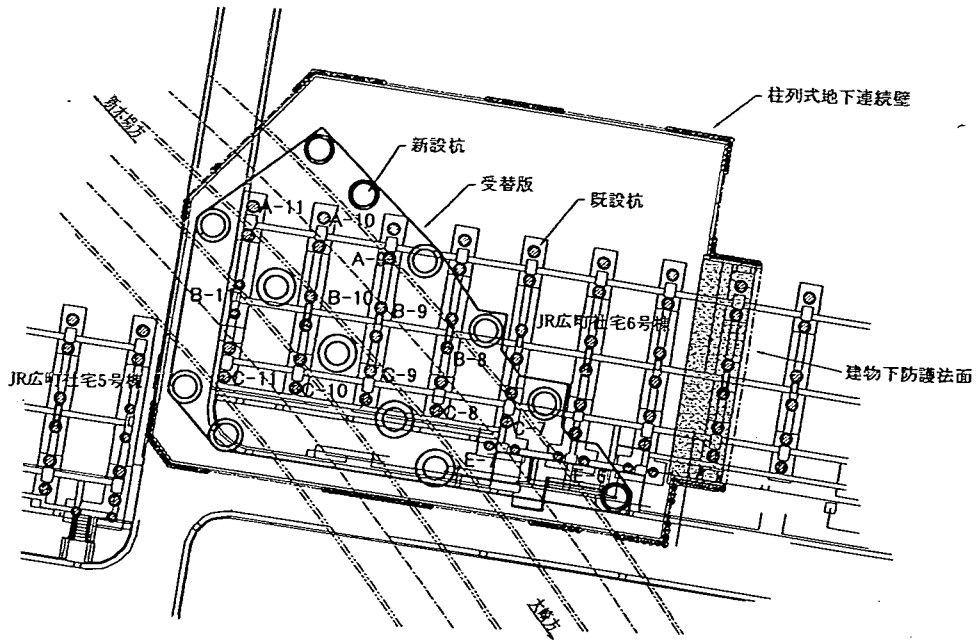


図-1 JR社宅6号棟の受替状況(平面図)

予測手法は、既設杭の杭頭の鉛直変位を算出するもの、既設構造物をばね支承の骨組構造でモデル化し任意点の変位を算出するもの、下受け構造物の沈下量から既設構造物の挙動を予測するものの3つに大別できる。猪瀬ら⁹⁾は既設杭と新設杭との相互作用を考慮した変位伝達関数を用いて、杭頭の鉛直変位を算出する方法を提案している。筆者ら⁷⁾は既設杭と新設杭との相互作用を考慮したはり-ばね系の構造モデルを用いて、杭頭の鉛直変位を算出する方法を提案している。これらの方法は既設杭が撤去されるまでの期間については、周辺地盤を介する杭と杭との相互作用が考慮されていることから、他の方法と比較して実測値とよい符合を示すが、既設杭が撤去された後の建物のレベリング時点では適用することができない。林ら⁸⁾や加藤ら⁹⁾は、既設構造物を骨組構造で杭や地盤をばねでモデル化する方法を報告している。この方法は、老朽化した構造物の剛性、剛性を考慮すべき構造物の部材の選定、および非受替部の地盤特性(受替部の地盤特性は、応力導入時の下受け構造物の沈下特性からある程度推定することができる)などの不明確な要因が多く、特に受替構造が非対称形の場合にはこれらの影響が顕著になり、既設構造物の適正なモデル化が困難であることが多い。このため西林・矢萩¹⁰⁾や、山田ら¹¹⁾、高橋ら¹²⁾などが示すように、最終状態の下受け構造物の沈下量を算出し、これと既設杭の撤去

が完了した時点での既設構造物の隆起量との和から、最終的な既設構造物の状態を予測する方法が実際によく用いられている。しかしこの方法では、建物の健全性を照査し、建物各点の変位を管理値以内に収めることはできるが、建物のレベリングは現場合わせの制御に頼らざるを得ない。

以上のことを踏まえ、本研究はアンダーピニング工事の最終受替荷重を合理的に算定し、建物のレベリングを可能にする方法を提案するものである。最終受替荷重の算定には、レベリングを行うまでの期間に実測された建物各点の変位、受替荷重、および雰囲気温度から求めた重回帰式を適用している。また、現場計測結果との比較から本手法の妥当性を検証している。

2. 計測データに基づく重回帰式の誘導

(1) 工事概要と解析概要

本研究の対象とした工事は、臨海副都心線二期工事の第1広町トンネル工区におけるアンダーピニング^{13), 14), 15)}である。大井町駅と大崎駅との間に位置する第1広町トンネルは、シールド工法により建設される外径7,100mmの鉄道単線断面トンネルである。この路線上には、鉄筋コンクリート造12階建てのJR広町社宅2棟と、鉄筋コンクリート造

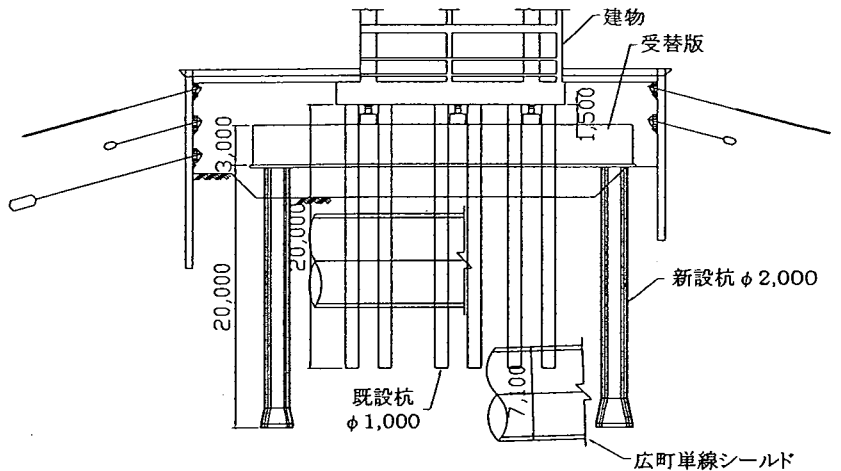
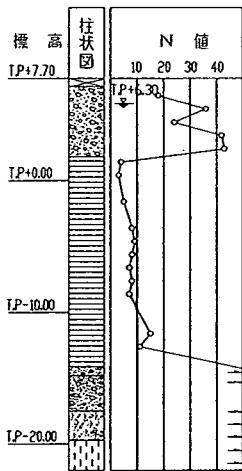


図-2 JR 社宅 6 号棟の受替状況 (断面図)

8階建ての品川区防災センターの計3棟の建物が位置し、それらの建物の基礎杭の一部がトンネル掘削の支障となるため下受け形式によるアンダーピニングを実施した。解析の対象は、アンダーピニングされる3棟の建物の中で最も多い点数で支持されたJR社宅6号棟とした(図-1、図-2)。JR社宅6号棟は建物総重量167MNで、このうち62.3MNを、受替版を介した13本の新設杭により受替える工事である。

受替荷重の算定には、実測された建物の変位、受替荷重、および雰囲気温度の3種類の変数から求めた重回帰式を用いた。受替制御は応力導入から既設杭の撤去が完了するまでの比較的長期にわたる。このことから、建物各点の変位挙動は周辺部の温度変化の影響を受けると考え、説明変数に雰囲気温度を選定することにした。この重回帰式は、建物本体の変形特性や周辺地盤の変形特性などの不確かな要因の影響をすでに含んでいるため、それらのメカニズムは明らかにできないが、受替荷重の算定において高い合理性と利便性を有するものと考えた。図-3は重回帰式の算定に用いた受替荷重、雰囲気温度、および建物の変位の実測値を示したものである。これらの計測データは、応力導入直後から既設杭の杭頭の切断が完了するまでの期間に計測したものであり、その総数は約5,000である。これらの図からも同一箇所の受替荷重と建物の変位とが、単純な相関関係にないことが読みとれる。

(2) 重回帰式の誘導

目的変数 y_i を建物各点の変位、説明変数 x_i 、 T をそれぞれ建物各点の受替荷重と雰囲気温度とすれば、建物各点の変位は次式により表される。

$$y_i = b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots + b_i \cdot x_i + b_t \cdot T + b_0 \quad (1)$$

ここに、

y_i : 建物 i 点の変位の実測値

x_i : 建物 i 点の受替荷重の実測値

$b_1, b_2, \dots, b_i, b_t$: 重回帰式の偏回帰係数 (ここでは $i=14$ とした)

T : 雰囲気温度の実測値

b_0 : 重回帰式の定数項

である。

式(1)を満たす偏回帰係数と定数項を付録1に示す式(8)、式(9)により決定すれば、目標とする建物各点の変位を代入し x_i について解くことで受替荷重を求めることができる。

また、重回帰式はそれが示す意味の明確化などの観点から、極力少ない変数で誤差の小さい目的変数を与えるのがよく、精度の高い重回帰式が得られても、むやみに変数が多くなると計算が繁雑になり実用的でない。このため重回帰式の算定においては、次に述べる方法によりその説明変数を選定することにした。

一般に、説明変数が互いに高い相関を有するとき、偏回帰係数が求められず、偏回帰係数の符号と説明変数と目的変数との単相関係数の符号が一致

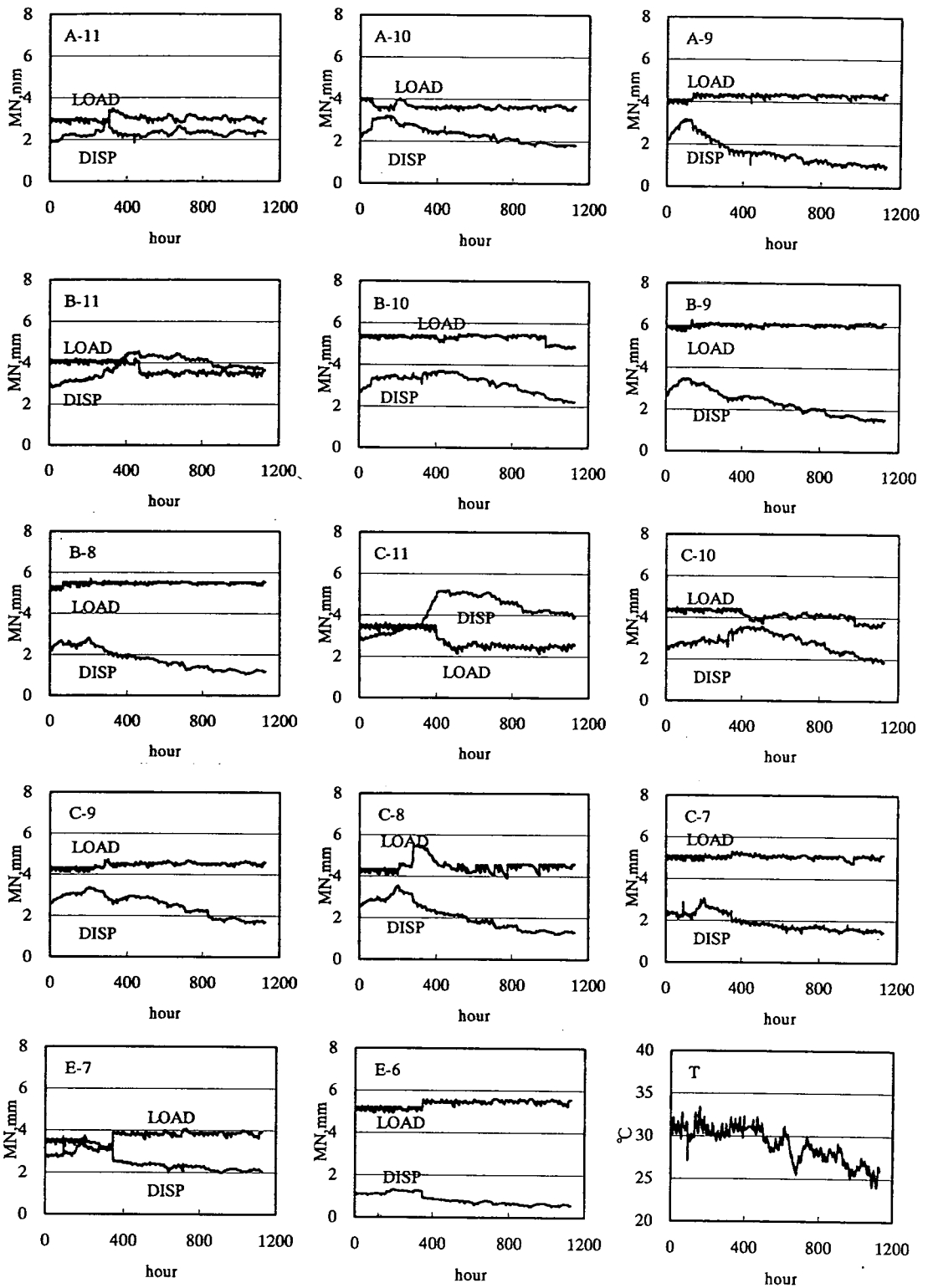


図-3 建物各点の受替荷重と変位および雰囲気温度の経時変化

しないなどの多重共線性が生じることが知られている。このため次式により説明変数間の相関性を判定し、相関が認められる時は一方の変数を除外して重回帰式を作成することにした。本論文ではその判定の基準を 0.9 以上とした。

$$R_{xx} = \frac{S_{x_i x_j}}{S_{x_i} S_{x_j}} \quad (2)$$

ここに、

R_{xx} : 説明変数間の単相関係数

$S_{x_i x_j}$: 変数 x_i と変数 x_j の共分散

S_{x_i} : 変数 x_i の標準偏差

S_{x_j} : 変数 x_j の標準偏差

である。

次に目的変数と説明変数との相関性を判定し、目的変数に与える影響が極端に小さいものを除外する。本論文では判定の基準を 0.1 未満とした。

$$R_{xy} = \frac{S_{x_i y_i}}{S_{x_i} S_{y_i}} \quad (3)$$

ここに、

R_{xy} : 説明変数と目的変数の単相関係数

$S_{x_i y_i}$: 説明変数 x_i と目的変数 y_i の共分散

S_{x_i} : 変数 x_i の標準偏差

S_{y_i} : 変数 y_i の標準偏差

である。なお、多重共線性や変数の選択については多くの専門書^{16), 17), 18)}があり、それらが参考になる。

これらの手順から、本研究の場合は受替荷重に関する 14 元の連立方程式が得られる。連立方程式を行列で表せば次のように書ける。

$$\begin{bmatrix} y_{A11} \\ \vdots \\ y_{E6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1^{A11} & \dots & b_{14}^{A11} & b_t^{A11} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ b_1^{E6} & \dots & b_{14}^{E6} & b_t^{E6} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{A11} \\ \vdots \\ X_{E6} \\ T_p \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$+ \begin{bmatrix} b_0^{A11} \\ \vdots \\ b_0^{E6} \end{bmatrix}$$

ここに、

l_{ij} : 受替位置

$y_{l_{ij}}$: 目標とする建物各点の変位

$b_i^{l_{ij}}$: 重回帰式の偏回帰係数

$X_{l_{ij}}$: 建物各点の受替荷重の予測値

表-1 重回帰式の検定結果

重回帰式	決定係数 R^2	分散比 F
A-11	0.765	1927
A-10	0.860	3634
A-9	0.916	4469
B-11	0.827	2328
B-10	0.735	1343
B-9	0.918	5396
B-8	0.936	7101
C-11	0.840	2533
C-10	0.728	1423
C-9	0.816	2367
C-8	0.924	5876
C-7	0.914	5145
E-7	0.920	6109
E-6	0.952	9685

T_p : 雰囲気温度の予測値

$b_0^{l_{ij}}$: 重回帰式の定数項

である。

式(4)において、右辺第 1 項の偏回帰係数を表す行列は 14 行 15 列である。雰囲気温度 T は受替荷重から独立した変数であるため、偏回帰係数を表す行列は 14 行 14 列の正方行列に変換することができる。したがって、式(4)を次式のように変換すれば、目標とする建物各点の変位を代入することで受替荷重が算定できる。

$$\begin{bmatrix} X_{A11} \\ \vdots \\ X_{E6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1^{A11} & \dots & b_{14}^{A11} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_1^{E6} & \dots & b_{14}^{E6} \end{bmatrix}^{-1} \times \left\{ \begin{bmatrix} y_{A11} \\ \vdots \\ y_{E6} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} b_t^{A11} \cdot T_p + b_0^{A11} \\ \vdots \\ b_t^{E6} \cdot T_p + b_0^{E6} \end{bmatrix} \right\} \quad (5)$$

3. 現場計測に基づく統計的手法の評価

(1) 重回帰式の検定

表-1 は上で述べた方法により求めた重回帰式の自由度を調整した決定係数と、予測値と残差との分散比を示したものである。なお、検定は付録 2 に示すように予測値と残差との分散比が自由度 q およ

$$|B^*| = 0.01 \times$$

	x_{A11}	x_{A10}	x_{A9}	x_{B11}	x_{B10}	x_{B9}	x_{B8}	x_{C11}	x_{C10}	x_{C9}	x_{C8}	x_{C7}	x_{E7}	x_{E6}	T
Y_{A11}	0	-6.2	-1.5	0	0	1.1	3.8	0	0	10.4	1.1	0	-14.5	0	-6.2
Y_{A10}	0	-8.2	-0.8	0	12.5	8.0	0	16.4	-13.0	-10.8	0	0	0	-12.2	17.1
Y_{A9}	-4.3	-0.3	-21.5	0	14.6	4.3	13.6	39.4	-18.8	-5.4	-15.0	1.3	0	-13.8	14.9
Y_{B11}	-4.9	-15.6	6.1	0	0	-2.8	-1.2	-38.0	6.7	13.9	0	17.0	0	-4.6	12.4
Y_{B10}	-8.3	0	4.9	-9.3	17.1	-4.8	0	0	-15.4	-2.2	5.0	8.8	-7.8	0	37.0
Y_{B9}	-12.9	1.2	-14.0	0	10.0	2.2	15.2	15.5	-11.1	-10.3	0	0	0	-7.0	35.0
Y_{B8}	-9.3	6.1	-4.0	0	8.1	-0.3	8.2	18.8	-10.2	-8.6	0	0	0	-11.8	21.2
Y_{C11}	-8.6	-18.1	7.7	0	0	-3.4	-2.7	-70.4	9.3	13.2	0	27.3	0	-3.3	21.5
Y_{C10}	0	-7.5	0	-16.9	34.9	0	0	0	-18.9	0	-8.8	31.9	0	-11.8	0.2
Y_{C9}	0	-2.1	-3.0	0	16.1	12.0	0	0	-14.1	-9.5	0	24.9	0	-25.5	1.5
Y_{C8}	0	6.5	3.0	0	13.1	0	12.9	26.6	-19.5	-11.2	-4.4	0	0	-30.4	22.2
Y_{C7}	0	6.4	5.0	0	3.6	-2.6	4.9	11.6	-4.8	-8.3	-1.3	0	-19.6	0	7.3
Y_{E7}	0	3.9	12.9	0	5.0	-1.2	0	17.1	-4.8	-5.8	-3.7	0	-27.9	0	4.1
Y_{E6}	0	1.0	-0.6	0	4.7	0.5	2.4	11.9	-6.7	-3.5	0.9	0	-12.0	0	4.3

(6)

b_{n-q-1} の F 分布に従うものとして行った (ここに, n : 標本数, q : 説明変数の数である)。

表-1 をみると, 建物各点の変位の実測値は, 重回帰式から求めたその予測値との相関が高く, また分散比は $F_{q,n-q-1}$ (5%) 値¹⁹⁾ (本事例の場合は最大で 1.940) と比較して大きいことがわかる。したがって, これらの重回帰式は信頼性を有するものと判断され, 目標とする建物各点の変位を与えれば, それを満たす建物各点の受替荷重を十分な精度で求めることができる。

(2) 偏回帰係数による荷重制御と建物挙動の特性

式(6)は付録3に示す式(13)によりデータを標準化した場合の偏回帰係数行列 B^* を示したものである。本来, 偏回帰係数は近似値²⁰⁾であるため, 建物各点の受替荷重がそれらの変位に与える影響を厳密に判断するのは困難である。しかしながら本事例の場合, 説明変数間の相関係数が最大でも 0.5 程度であることから, 説明変数はほぼ独立しているものと見なして, 偏回帰係数の観点から荷重制御と建物の挙動特性に関する考察を試みる。

図-5 はこの標準偏回帰係数の絶対値の平均 $|\bar{b}|$, 平均 \bar{b} , および分散 S_b^2 を各々の受替位置について示したものである。この図をみると, B-10 点, C-10 点, C-9 点, C-7 点, E-6 点, および T の各変数は, 標準偏回帰係数の絶対値の平均 $|\bar{b}|$ が比較的大きく,

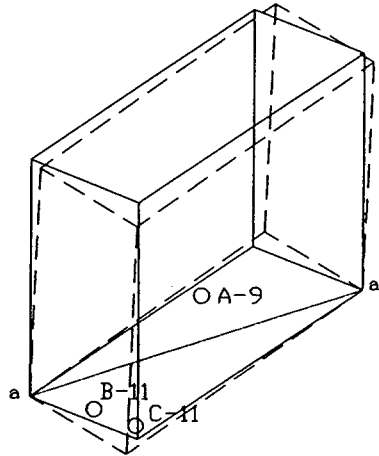
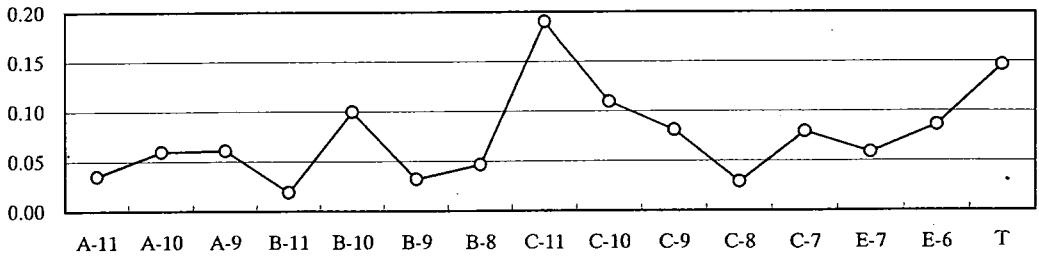
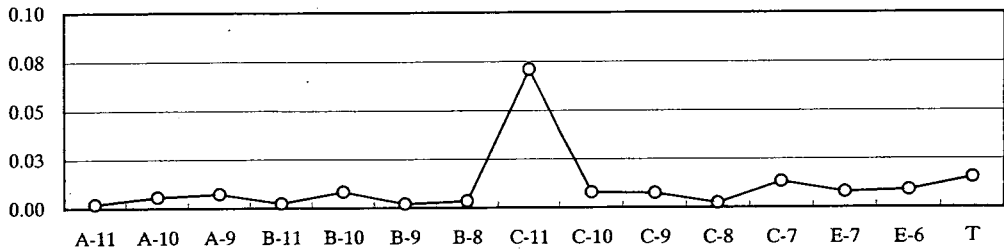


図-4 建物のねじれる挙動

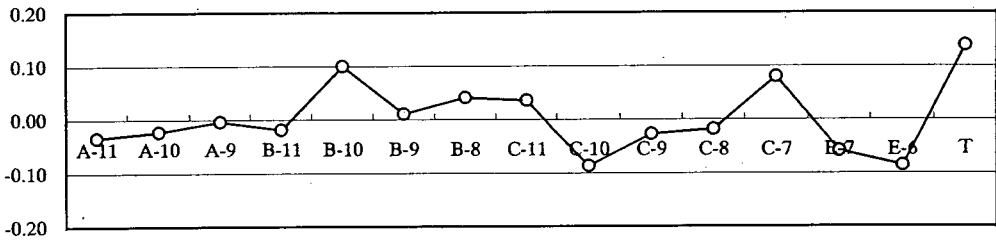
一方, その分散 S_b^2 が比較的小さいことがわかる。このことから, これらの各変数は建物全体の変位に与える影響が大きいと推察され, 本工事における受替荷重の制御では, これらの受替荷重を先行して決定するのがよいと思われる。また C-11 点の標準偏回帰係数は絶対値の平均 $|\bar{b}|$, 分散 S_b^2 がともに比較的大きい。このことは, C-11 点の受替荷重がある特定の箇所の建物変位に大きく影響を与えることを示している。式(6)からそれらが A-9 点, B-11 点,



a) 標準偏回帰係数の絶対値の平均の分布



b) 標準偏回帰係数の分散の分布



c) 標準偏回帰係数の平均の分布

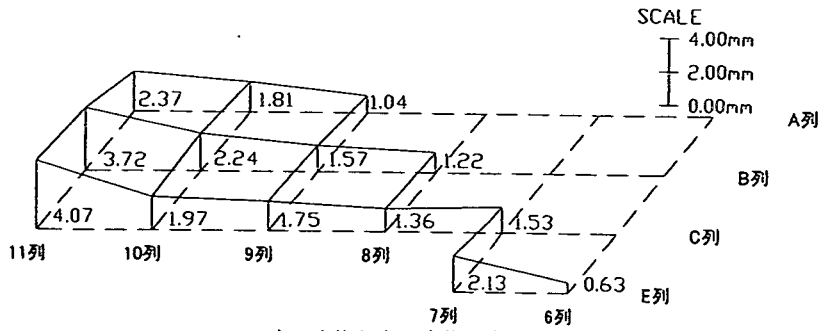
図-5 標準偏回帰係数の特性

C-11 点の建物の変位であると考えられる。また、A-9 点と B-11 点および C-11 点は建物の対角に位置すること、それらの偏回帰係数は異符号であることから、建物は C-11 点のジャッキ操作により図-4 に示すように対角線 a-a を軸としてねじれるように挙動すると推察できる。

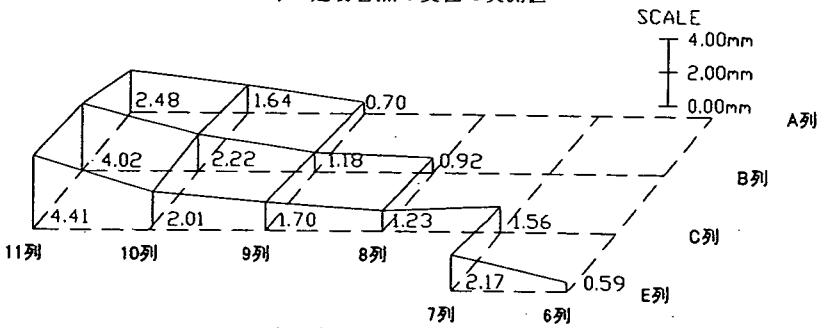
また標準偏回帰係数の平均 \bar{b} の分布を見ると、建物の外側に位置する A 列、C 列および E 列のそれは全体的にマイナスの傾向を、建物の中央部に位置する B 列のそれは全体的にプラスの傾向を示していることがわかる。これは、建物外側のジャッキが建物を相対的に沈下させる方向へ働くこと、建物

中央部のジャッキが建物全体を相対的に隆起させる方向へ働くことを示していると考えられる。すなわち、A 列をジャッキアップした場合には、B 列が支点となりそれと反対側の C 列や E 列が沈下する。この時、C 列や E 列のジャッキ荷重は増加を示しそれらは設計荷重値以上であることから、ジャッキ荷重を再調整する必要はなく、C 列や E 列の沈下が保持されたためと思われる。

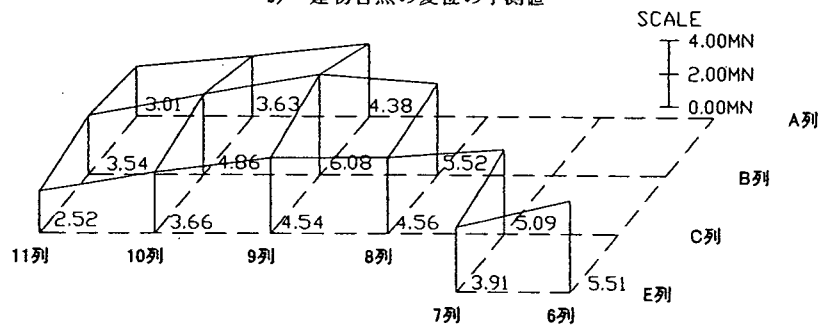
一方、建物中央部の B 列をジャッキアップした場合には、外側に位置する A 列や C 列も若干の隆起を示す、あるいは隆起を示さない場合でもそれらのジャッキ荷重は減少するため、技術者はジャッキ



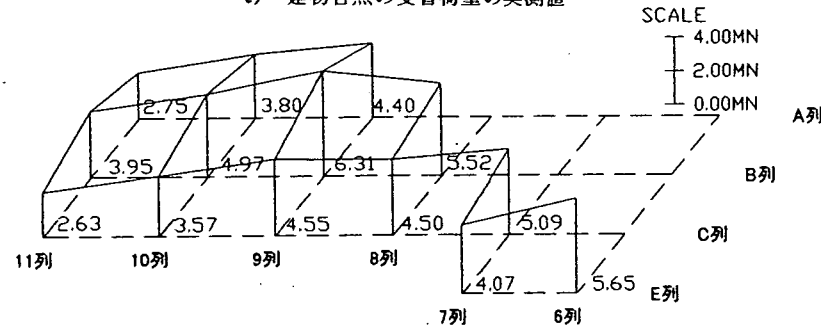
a) 建物各点の変位の実測値



b) 建物各点の変位の予測値



c) 建物各点の受替荷重の実測値



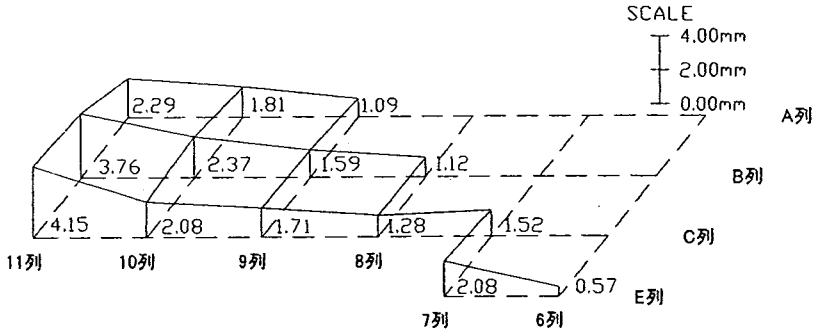
d) 建物各点の受替荷重の予測値

図-6 建物各点の変位と受替荷重の分布 (CASE1)

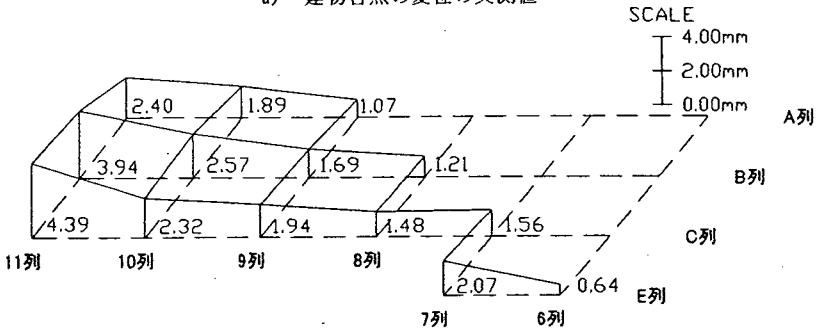
荷重を増加させ設計荷重の保持に努める。この結果として A 列や C 列の建物変位は相対的に隆起を示すものと考えられる。

(3) 実測値と予測値との比較およびその考察

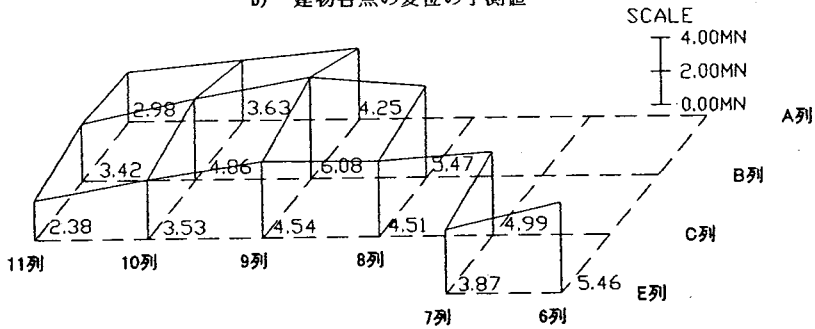
図-6、図-7 は、建物各点の変位と受替荷重の実測値、および重回帰式により算定したそれらの予測値を示したものである。CASE1 は建物の変位と受



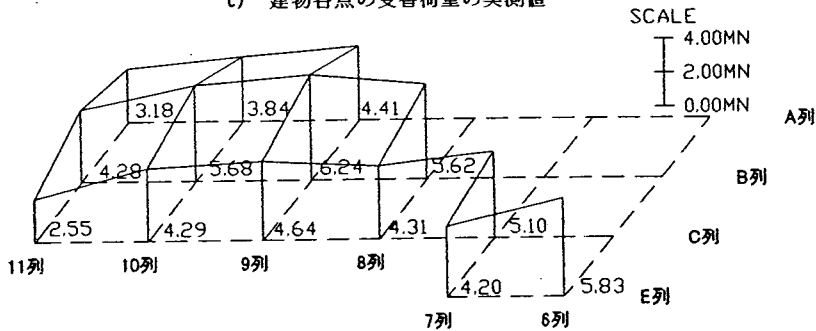
a) 建物各点の変位の実測値



b) 建物各点の変位の予測値



c) 建物各点の受替荷重の実測値



d) 建物各点の受替荷重の予測値

図-7 建物各点の変位と受替荷重の分布 (CASE2)

替荷重の実測値が重回帰式の算定に用いた計測データの最大値と最小値との間に位置する場合である。ここでは、便宜上このようなデータを標本の範囲 R 内のデータと呼ぶ。CASE2 は建物の変位と受

替荷重の実測値の一部が、重回帰式の算定に用いた計測データの最大値と最小値との間以外に位置する場合である。ここでは、便宜上このようなデータを標本の範囲 R 外のデータと呼ぶ。建物の変位の

予測値は式(4)に受替荷重の実測値を代入して求めたものであり、受替荷重の予測値は式(5)に同時期の建物の変位の実測値を代入して求めたものである。なお、これらの実測値は重回帰式の算定に用いた標本以外の計測データ、すなわち、既設杭の切断が終了した時点から深礎工が終了した時点までの期間のデータから任意に抽出したものである。これらの図から、重回帰式による建物の変位と受替荷重の予測値は、それらの実測値と全体的によい一致を示していることがわかる。式(7)に示すように誤差率 e を設定すれば、図-6 に示す CASE1 は建物の変位で 6.0%、受替荷重で 1.6% であり、図-7 に示す CASE2 は建物の変位で 6.9%、受替荷重で 7.7% である。このことから、本手法による建物の変位および受替荷重の予測値はそれらの実測値とよい適合を示していると判断できる。このことは、建物のレベリングに重回帰式による統計的手法を用いれば、その工程の労力が大きく低減できることを示している。

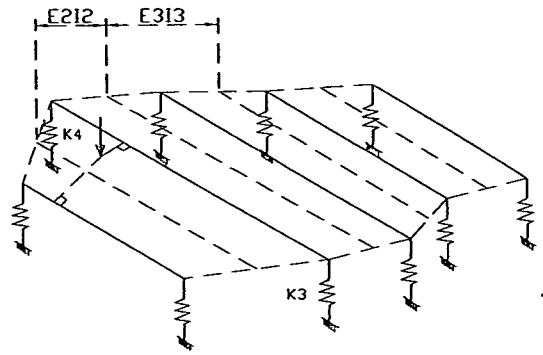
$$e = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - X_i}{x_i} \right| \times 100}{n} \quad (7)$$

ここに、

- x_i : 建物各点の受替荷重の実測値
- X_i : 建物各点の受替荷重の予測値
- n : 受替箇所の数

である。

次に、CASE2 の誤差率が CASE1 のそれと比較して若干大きい原因について考察を加える。CASE2 では受替荷重の実測値が重回帰式の標本の範囲 R を越えている箇所があるため、その予想精度が低下したものと考えられる。一般に、重回帰式を用いて予測を行う場合は、標本の範囲 R 内で説明変数を設定するのが望ましく、それが標本の範囲 R を大きく越える場合は誤差が大きくなる傾向がある。このような場合は、式(5)に理想的な変位の条件（目標とする建物各点の変位）を与えて受替荷重の目安を算定し、ある程度の荷重調整を行う。その後、この間の計測データから新たに重回帰式を求めて建物のレベリングを行う必要がある。逆に、受替荷重を少ない制約で精度よく算定するためには、建物のレベリングまでの工程中に許容される範囲内（この場合は建物の健全性を確保できる管理値以内）でジャッキ荷重を意図的に増減させるなどの手段を講じ、重回帰式の算定に用いる標本がより多くの情報を含むようにすることが重要である。



$E_i I_i$: はり要素の曲げ剛性
 k_i : 新設杭の杭頭ばね

図-8 受替版の沈下量を求める構造モデルのイメージ

4. 建物のレベリングについて

下受け形式のアンダーピニングでは、図-2 に示すように建物の直下を掘削してそれを受替える。このため、受替が終了した後は、その部分を流動化処理土などにより埋戻して復旧する必要がある。埋戻しに先立ち、油圧ジャッキの機械的なロック、あるいはサポートジャッキへの盛替えを行うとともに、沈下計などの計測器を撤去するのが通例である。したがって、工事の最終時点における受替位置の建物変位の計測は不可能であり、建物外周部の計測結果などからその健全性を判断せざるを得ない。このように、工事の最終時点における建物各点の変位の実測値と予測値との対比やその結果に基づく補正も不可能なことから、埋戻し前に最適な受替荷重を算定し建物の各点に不等変位を残さないことが重要になる。これらのことから、ここでは CASE1 を建物のレベリング前の状態とした場合の最適な受替荷重の試算を行い、その過程における注意点をまとめることとする。

建物の最終変位に影響を与える要因は、①流動化処理土の埋戻しによる荷重増分、②埋戻しにより生じる受替版下および建物下の地盤反力、③シールドの掘進による周辺地山のゆるみなどがあげられる。施工条件によっては上載荷重の影響や近い将来に想定される建設物の影響などについても考慮する方がよいと思われる。②の地盤反力については、荷重増分により生じる受替版や建物の沈下（数 mm 程度）は流動化処理土の表面に生じるブリージングの領域である可能性が高いこと、③のシールド掘進

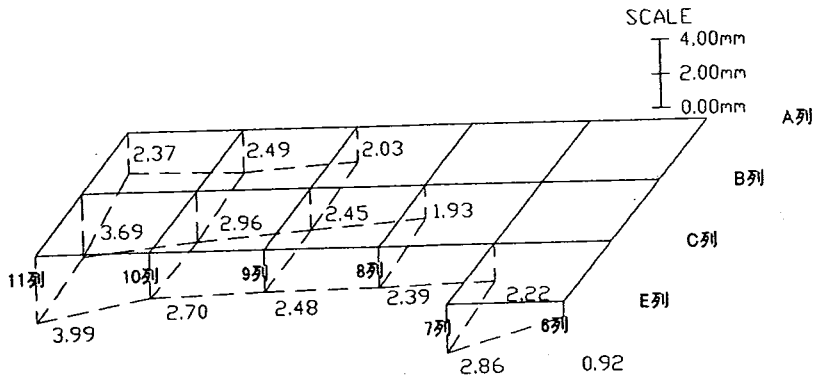
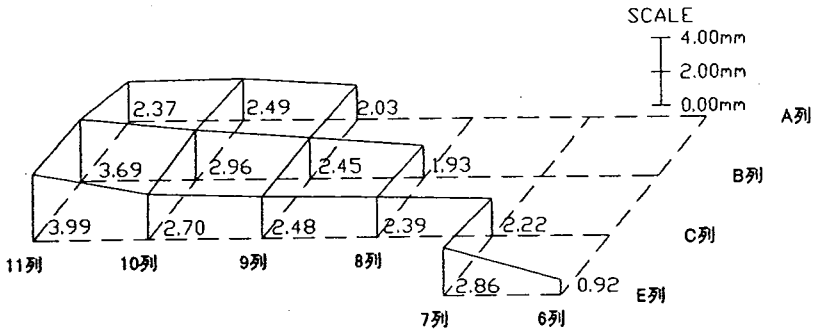
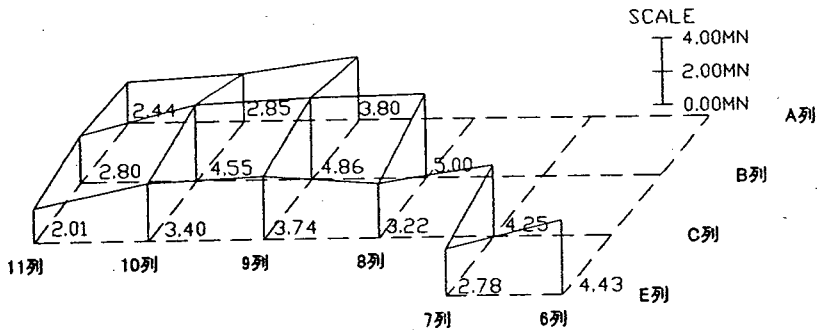


図-9 受替版各点の沈下量の予測値



a) 目標とする建物各点の変位の予測値



b) 目標とする建物各点の変位を与える受替荷重の予測値

図-10 建物のレベリング

の影響については、周辺地山が洪積粘性土層であること、応力導入時の新設杭の軸力計測結果から杭の周面摩擦力が相当に期待できることなどの理由から、ここでは考慮しないことにする。このため建物の最終変位量は、埋戻しの荷重増分による受替版の沈下量から判断することにした。

受替版の沈下量は、西林・矢萩¹⁰⁾が示すようにそれを平面あるいは立体の要素でモデル化し算定するのがよいと思われるが、ここでは計算の省力化の

観点から受替版を図-8に示すようなばねで支持されたはり要素でモデル化し、荷重は載荷点から各はりの軸線までの距離に応じた受替荷重を作用させることで受替版の沈下量を算定することにした。はりの剛性はその分担幅と等価なものとし、新設杭の杭頭のばね定数は受替版の沈下量の実測値と図-8に示す構造モデルによる解析値が適合するように逆解析を行った結果から決定している。

図-9はCASE1の荷重条件下における受替版各点

の沈下量の算出結果を示したものである。この結果から埋戻し前の建物各点の変位が図-10-a)に示すような状態であるならば、埋戻し後の建物各点の変位がすべて 0.00mm になり不等変位が残留しないと判断される。このときの建物各点の受替荷重は、本研究で示した統計的手法を用いて算出すれば図-10-b)に示すような分布となる。

ここで注意すべきことは、埋戻しによる荷重増分量と受替荷重の変動量との割合である。本工事の場合、前者が 97.62MN、後者が 11.63MN であるため、埋戻しによる荷重増分量の方が受替荷重の変動量よりも十分に大きく、受替版の沈下量はほぼ埋戻しによる荷重増分により決定される。埋戻し量が比較的少ない施工条件の場合には、建物各点の受替荷重の変動により受替版各点の沈下量が変化する割合が大きくなるため、受替版各点の変位がある程度の範囲に収束するまで繰り返し計算を行う必要がある。このことを考えれば、受替版の沈下量を算定する構造モデルは本研究で示したような簡易なはり-ばね系の構造モデルを用い、異なる荷重系における繰り返し計算を容易にする方が合理的と思われる。

5. 結論

本研究では、アンダーピニング工事における最終的な受替荷重の算定に重回帰式を用いる統計的手法の適用を提案した。また、現場実測値と統計的手法による予測値とを比較することにより本手法の妥当性を検証した。本研究から得られた知見を列挙すれば次のとおりである。

- ①建物各点の変位、受替荷重、および雰囲気温度の実測値を変数として重回帰式を求めることにより、任意の建物の変位を与える受替荷重の条件を算定することができる。すなわち、従来は多くの労力を要した建物のレベリングが容易になり、また残さざるを得なかった建物の不等変位を小さくすることができるため、工費の縮減やより高い品質の施工が可能になる。
- ②重回帰式による予測値の精度を向上するためには、多くの情報を含む標本を抽出することが重要である。このためには建物のレベリング時点までの工程中に、建物の変状が許す範囲で受替荷重の増減を行うなどの手段を講じ、重回帰式の標本の範囲を広げることが望ましい。また、受替荷重は一様に増減させるのではなく、それぞれ独立した標本が得られるように配慮した操作をする必要がある。

③個々の説明変数がほぼ独立していると考えられる場合には、標準偏回帰係数から、建物の変位の制御に重要になるジャッキの位置が判断できる。また建物の挙動は周辺の温度変化の影響大きく受けることがわかった。

④受替荷重の算定に重回帰式を用いる手法の最大の利点は、この重回帰式がアンダーピニング工事中の計測データから誘導されることにある。すなわち、建物本体の変形特性や周辺地盤の変形特性など、アンダーピニングの挙動予測に際して不明確となる要因を重回帰式がすでに含んでいるため、高い精度で受替荷重を算定することが可能である。しかし、この方法ではこれらの要因が建物各点の受替荷重にどの程度の影響を与えるかは明確にできない。

6. おわりに

都市部における過密化や集中化などから、最近のアンダーピニング工事は受替構造物が多様化し、大規模化する傾向にある。また都市部の地下は例外なく既設構造物が輻輳しているため、狭隘な空間での施工が余儀なくされるとともに、受替構造物の老朽化が進んでいる場合などでは、より厳しい条件下での施工になることは明らかである。またアンダーピニングには様々な受替の形式があるが、このような状況を考えると、構造物の一部分を非対称な下受け形式で受替えるケースが増えることも想像に難くない。しかし、このようなアンダーピニングでは構造物本体の変形特性、周辺地盤の変形特性、構造物の真の荷重などの不明確な要因の影響が顕著であるため、その挙動を精度よく予測するのが困難である。

アンダーピニングの挙動予測は、すべての工程の中で特に2つの時点で重要になる。1つは応力導入までの時点である。ジャッキ能力の選定や応力導入後の受替荷重の制御が重要となる。いま1つは工程の最終時点である。完成時の建物の健全性の照査や本研究で述べた建物のレベリングが重要となる。建物のレベリングは従来見過ごされがちであり、その挙動が相当に複雑なことから建物の不等変位が残留せざるを得ないことが多かった。しかしながら、品質を確保する観点から不等変位を残留させないことが重要であり、本研究で提案したように、施工中の計測データを逐次有効に用いてそれを統計的に処理することにより、その目的を十分に達成できると考えている。

一般にアンダーピニング工事は計測工を伴い施工されるが、それらは建物の健全性の事後確認のためのみに用いられることが多く、積極的に挙動予測に活用する例は少ない。ここで示した統計的手法は、工事ごとに異なる建物の変形特性や周辺地盤の変形特性などの影響を受けないため、その適用性は高いものと思われる。多くの現場計測結果との照合を行うことによって、より精度の高い予測手法が確立されるものと考えている。

謝辞：本研究をまとめるにあたり、貴重な御意見をいただいた金沢工業大学環境系土木工学科木村定雄助教授、佐藤工業(株)首都圏業務部岡村直利氏、また施工当初から多くの御指導を賜った日本鉄道建設公団東京支社の皆様に深く御礼申し上げます次第です。

付録1. 重回帰式の偏回帰係数と定数項の算定

式(1)中の偏回帰係数は次式により算定する。

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{x_1}^2 & S_{x_1x_2} & \cdots & S_{x_1x_n} \\ S_{x_1x_2} & S_{x_2}^2 & & S_{x_2x_n} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ S_{x_1x_n} & S_{x_2x_n} & \cdots & S_{x_n}^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} S_{x_1y_i} \\ S_{x_2y_i} \\ \vdots \\ S_{x_ny_i} \end{bmatrix} \quad (8)$$

ここに、

$S_{x_i}^2$: 変数 x_i の分散

$S_{x_iy_i}$: 変数 x_i と変数 y_i の共分散

である。

また、式(1)中の定数項 b_0 は次式により算定する。

$$b_0 = \bar{y}_i - \left(b_1 \cdot \bar{x}_1 + b_2 \cdot \bar{x}_2 + \cdots + b_n \cdot \bar{x}_n \right) \quad (9)$$

ここに、

\bar{y}_i : 変数 y_i の平均

\bar{x}_i : 変数 x_i の平均

である。

付録2. 重回帰式の検定

求められた重回帰式は、次式により求めた分散比 F が自由度 q 、 $n-q-1$ の F 分布に従うものとして右片側検定を行い、その信頼性を確認した。

$$F = \frac{V_R}{V_E} \quad (10)$$

$$V_R = \frac{\sum \left(Y_i - \bar{y}_i \right)^2}{q} \quad (11)$$

$$V_E = \frac{\sum (y_i - Y_i)^2}{n - q - 1} \quad (12)$$

ここに、

F : 分散比

V_R : 予測値の不偏分散

V_E : 残差の不偏分散

q : 説明変数の数

n : サンプルの数

である。

すなわち、 F が有意水準より大きいならば、重回帰式が予測に役立たないという仮説が棄却され、重回帰式は予測に役立つとする考えである。

付録3. 変数の標準化

説明変数の受替荷重と雰囲気温度では単位が異なる。求められた重回帰式においてどの変数の影響がより大きいかを考察するために、偏回帰係数は標準化した場合としていない場合の2種類を算定する。計測データの標準化は次式より行う。

$$z_i = \frac{x_i - \bar{x}_i}{S_{x_i}} \quad (13)$$

ここに、

z_i : 変数 x_i の標準化されたデータ

\bar{x}_i : 変数 x_i の平均

S_{x_i} : 変数 x_i の標準偏差

である。

参考文献

- 1) 例えば、小西謙司：アンダーピニング最近の傾向、基礎工、総説、pp.11-18、1986.11.
- 2) 鉄道総合技術研究所：アンダーピニング設計・施工の手引き、1987.9.
- 3) 中村信義、川村努：アンダーピニングの諸形式とその選定、基礎工、総説、pp.2-5、2001.6.
- 4) 例えば、海野隆哉：アンダーピニングと情報化施工、

- 基礎工, 総説, pp.6-8, 2001.6.
- 5) 例えば, 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, pp.156-163, 1997.8.
 - 6) 猪瀬二郎, 小西譲司, 中村兵次: 杭基礎で支持された建物のアンダーピニング時の挙動について, 土木学会論文集, No.435/VI-15, pp.43-50, 1991.9.
 - 7) 市野道明, 清水幸範, 小泉淳: アンダーピニング工事における杭基礎構造物の変位予測手法について, 土木学会論文集, No.700/VI-54, pp.159-175, 2002.3.
 - 8) 林二郎, 西村尚武, 松尾節夫, 小山浩史: 片福連絡線南森町工事における地下鉄のアンダーピニング工事での設計と実際, 基礎工, pp.86-94, 1996.3.
 - 9) 加藤光, 高濱文義, 近藤正直, 古山章一, 瀧内義男: 新幹線駅舎高架橋アンダーピニングにおける影響予測と計測管理, トンネル工学研究論文・報告集, 第6巻, pp.309-314, 1996.11.
 - 10) 西林聖武, 矢萩秀一: 高層ビル群のアンダーピニング, トンネルと地下, 第21巻3号, pp.7-16, 1990.3.
 - 11) 山田昇, 清治均, 斎木公嗣良: アンダーピニング支持構造物の挙動について-予測とその結果-, 第55回土木学会年次学術講演会講演概要集, VI-259, 2000.9.
 - 12) 高橋利夫, 今田和宏, 高本彰: 地下鉄7号線建設工事に伴う首都高速道路アンダーピニングにおける計測管理, 基礎工, pp.44-49, 1996.3.
 - 13) 富田浩士, 東宗則, 松本直樹: アンダーピニングの施工計画, 第55回年次学術講演会講演概要集, VI-261, 2000.9.
 - 14) 内海稔郎, 阿部敏夫, 苫米地英俊, 富田浩士: 3棟の高層ビルのアンダーピニング, トンネルと地下, 第32巻4号, pp.31-38, 2001.4.
 - 15) 諏訪内幹男: りんかい線大井町付近シールド通過に伴う高層建物アンダーピニング, 基礎工, pp.60-66, 2001.6.
 - 16) 例えば, 有馬哲, 石村貞夫: 多変量解析のはなし, 東京図書, 1987.10.
 - 17) 例えば, 柳井晴夫ほか: 多変量解析ハンドブック, 現代数学社, 1986.4.
 - 18) 例えば, 堀啓造: 統計ソフト・統計学習用データ, 香川大学経済学部, <http://www.ec.kagawa-u.ac.jp/hori/>
 - 19) 例えば, 兵頭次郎: 統計の論理と方法, 成文堂, 1983.7.
 - 20) 例えば, 大勝孝司: 統計分析, 東京大学大学院総合文化研究科, <http://system.c.u-tokyo.ac.jp/>

(2001.10.10 受付)

CALCULATION OF UNDERPINNING LOADS BASED ON MULTIPLE REGRESSION ANALYSIS

Michiaki ICHINO, Yukinori SHIMIZU and Atsushi KOIZUMI

For underpinning a building, there may occur such a case as displacements of the building showing no settlement against expectations of engineers, when temporary underpinning loads are removed for leveling the building. When this situation takes place, we may have no choice but to accept some unequal settlement, while adjusting building displacements according to site conditions.

The object of this paper is to propose a calculation method for underpinning loads at the time of building-leveling by using multiple regression analysis on monitored data, and to investigate the suitability of the method by comparing with measurement results.