

多連接小断面シールド掘削による周辺地盤応答の力学モデル

A SIMPLIFIED MODEL FOR GROUND RESPONSE DUE TO SHIELD TUNNELLING OF MULTI-EXCAVATION STAGE

土門 剛¹⁾・マウリディヤ・インダ・ジュニカ²⁾・西村和夫³⁾

Tsuyoshi DOMON, Indah Junica MAULIDYA and Kazuo NISHIMURA

A construction of large close-sectional tunnels in densely areas should pay an attention to the tunnel stability and surface environment. Considering on the urban restrictions, the large tunnels should be constructed into some small-size tunnels by a single full-face method for each small-size tunnel. A new simplified model for predicting the ground response induced by the tunnelling of multi-excavation technique is introduced in this paper. The investigation of this research was conducted using a physical model test of multi-trap door. The ground response occurred in ground on each step of small-size tunnel excavation was carefully observed in order to verify the applicability of conventional prediction of earth pressure of Terzaghi's theory for the new model of tunnel excavation. The model which is widely used in practical fields for predicting earth pressure acting on a tunnel of a single excavation.

Keywords: simplified model, trap door test, multi-excavation, ground response, earth pressure

1. はじめに

都市域において大断面トンネルを構築する場合、施工スペースがかなり制限されることに加え、低土被りかつ脆弱な地盤条件での施工を余儀なくされる場合には、トンネルの安定性ならびに周辺に及ぼす影響について十分な検討が必要となる。このような条件下を克服するためのトンネル構築方法として、近年 MMST とよばれる工法が開発されたのは周知の通りである。しかしながら本工法のように複数の小断面シールドを近接させて逐次掘削していく工法に関しては、シールド相互の作用メカニズムや掘削に伴う地中内変位や地表面沈下などについては定量的に明らかにされているとは言い難い。したがって、最適な覆工厚や小断面シールドの掘削順序などに関する合理的な設計手法あるいは施工方法が提案されるには至っていないのが現状である。

そこで著者らは、過去に MMST 工法を模した多連接降下床実験を実施し、小断面シールド掘削に伴うシールド相互の作用機構や周辺地盤応答機構について明らかにしてきた。本報告では、これらの実験結果から得られた基礎的かつ定性的な知見を踏まえ、周辺地盤応答のうち特にシールド覆工荷重を含めたシールド掘削に伴う周辺地盤の土圧作用履歴に着目し、これを定量的の評価に供しうる簡便な力学モデルについての一考察を与えた。

2. 多連接降下床実験概要

近接した複数の小断面シールド掘削を、5つの降下床で模擬した。図-1はその実験装置を示すもので、幅 1,200mm、高さ 900mm、奥行き 300mm の鋼製フレームのほぼ中央部に5つの降下床を連接配置している。ひとつ

1)正会員 東京都立大学大学院工学研究科 助手 土木工学専攻

2)正会員 博(工) インドネシア国立道路工学研究所(元東京都立大学大学院工学研究科 博士課程学生)

3)正会員 工学博士 東京都立大学大学院工学研究科 教授 土木工学専攻

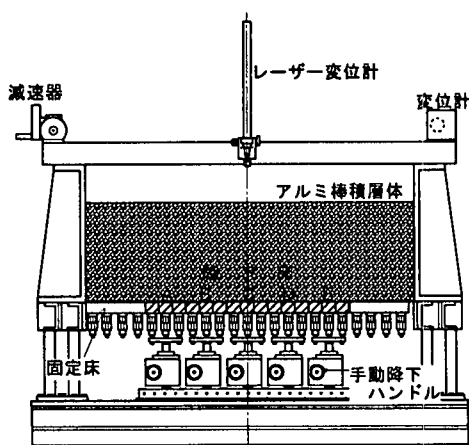


図-1 降下床実験土槽

表-1 地山材料諸元

地山材料	アルミ棒積層体
長さ	100 mm
直径 1	1.6 mm
直径 2	3.0 mm
重量混合比	直径 1:直径 2=3:2
単位体積重量	21.1 kN/m ³
内部摩擦角	30 deg
粘着力	0.0 kPa

表-2 実験ケース

実験ケース名	降下(掘削)順序
case 1	A→B→C→D→E
case 2	A→C→E→B→D
case 3	B→D→C→A→E
case 4	C→B→D→A→E

の降下床は3つの直方体型ロードセルから構成されており、降下床下部のジャッキを手動ハンドルの操作によって降下床を降下および上昇させることができる。ひとつの降下床の降下床幅 B_{ms} は 150mm である。

地山材料は表-1の通り、アルミ棒積層体とした。また、実験ケースは、小断面シールドの掘削順序が与える土圧作用履歴などの影響を把握するため、表-2のように4種類の掘削順序を設定した。なお、各実験ケースとも土被り H は 250, 500 および 750mm を実施し、降下床の降下量 δ はいずれも最大 2.0mm とした。

3. 実験結果

3.1 降下床降下に伴う各降下床作用土圧履歴

各実験ケースの降下床作用土圧の変化について、各降下床降下量を降下床幅で除した正規化降下量を横軸に降下床作用土圧 σ_v を初期土圧 σ_{v0} で除した正規化土圧を縦軸に図-2(a)から(d)に示す。なお、ここで示した結果はすべて土被り 500mm ($H/B_{ms}=3.33$) のものである。同図(a)を例に降下床降下に伴う作用土圧変化の基本的挙動について述べる。まず、降下床 A の降下に伴って降下床 A 自身の土圧が減少し、最終降下量 2mm ($\delta/B_{ms}=1.3\%$) ではほぼ Terzaghi のゆるみ荷重相当に収束している様子がわかる (Terzaghi ゆるみ土圧算定にはトンネル幅をひとつの降下床幅 (150mm) とし、土圧係数 $K=1.0$ としている)。降下床 A 降下に伴って、隣接降下床 B の土圧は増加し最終的に初期土圧の 1.2 倍程度 (約 20% 増) となっている。降下床 B の右隣の降下床 C においても土圧増加はみられるが、その増加量は降下床 B の半分程度となっている。さらに右隣の降下床 D および E の降下床 A 降下に伴う土圧増加は、D において若干土圧増加が認められるが E はほとんど認められない。次の降下ステージとして降下床 B が降下すると、降下床 A 降下と同様にそれ自身の作用土圧が減少し、最終降下時にはやはり Terzaghi のゆるみ土圧相当に達する。これに伴い、隣接降下床の A および C は作用土圧が増加する。ただし、降下床 A および C の増加率を比較すると、A の増加率の方が C に比して大きい。換言すれば、既に降下床を降下して周辺地盤をゆるめている側 (降下床 A 側) がまだゆるめていない側 (降下床 C 側) よりも増加土圧分担率が高い。降下床 C 降下以降の挙動は、このような基本的挙動を踏まえれば容易に理解することができる。

実験ケース 1 を例に降下床降下に伴う各降下床作用土圧の基本的挙動を述べたが、他の実験ケースについても同様に考察すると、降下床降下に伴う降下床作用土圧履歴は次のようにまとめることができる。

- 1) 降下床が降下すると、それ自身の土圧はほぼ Terzaghi のゆるみ土圧値に収束する。
- 2) 降下床が降下すると、それによる土圧増加の影響はその降下床から数えてせいぜい3つめの降下床 (例: A と D

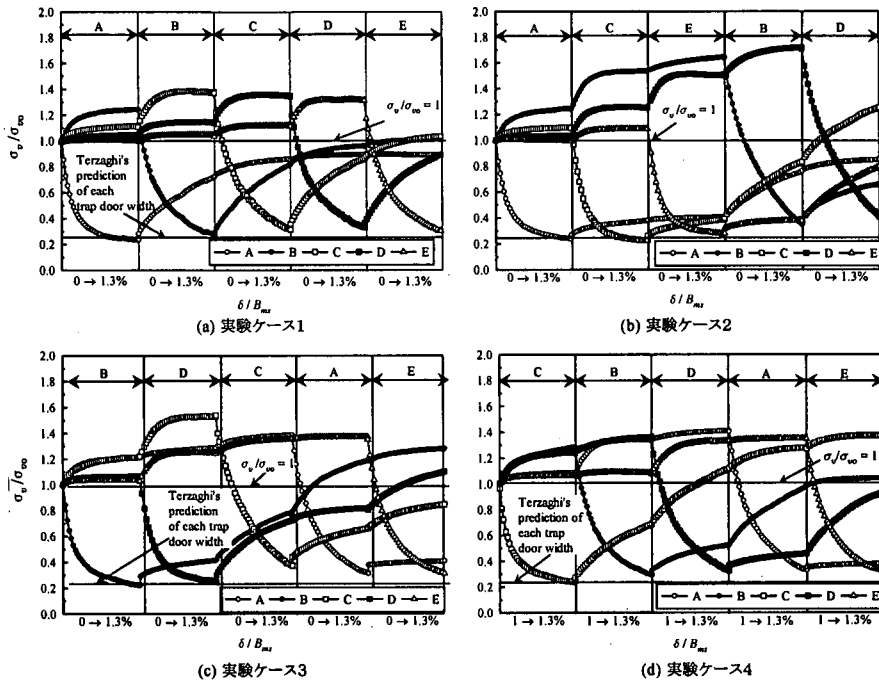


図-2 降下床降下に伴う各降下床作用土圧の履歴

の位置関係)までである。

3)降下床が降下する際、両隣の降下床の作用土圧の増加には次の3種類がある。

- a)両隣のうちどちらか一方が既に降下している場合には、土圧増加は既に降下している降下床の方が土圧分担率が高い。
- b)両隣とも既に降下している場合にはいずれも土圧増加は大きく、それは上記 a)の既に降下している降下床が受ける土圧増加率(初期土圧の40%増)とほぼ同じである。
- c)両隣ともまだ降下していない場合にはいずれも土圧増加は小さく、それは上記 a)のまだ降下していない降下床が受ける土圧増加率(初期土圧の約20%増)とほぼ同じである。

3. 2 土被り高さと作用土圧の関係

図-3は3種類の土被り高さにおける各実験ケースで計測された最大土圧と最小土圧および両者の平均を、いずれも全土被り土圧で除した値で示している。なお、各実験値の上にある英文字は最大土圧あるいは最小土圧が得られた降下床を示す。この図からわかるように、最小土圧については土被り250mmのケースで他の土被りに比して高めの土圧を示している。この理由は、 H/B_{ms} が250mmで最も小さく、他の土被りに比して地山のアーチ作用が十分に発揮されなかったことによるものと考えられる。最大土圧については、実験ケース1(左から順に降下させるケース)が最も小さく、それ以外の3ケースは大きな値を示している。また、最大土圧および最小土圧となる降下床はほぼ決まった位置で計測され、それらはそれぞれ降下床Cおよび降下床Eである。この位置は地表面沈下計測結果において、降下床Cの直上が最も沈下量が大きく、逆に降下床Eの直上が最も沈下量が小さくなっている挙動と対応していることが確認された。ただし、すべての降下床の降下が終了した時点での最終的な地表面沈下量およびその形状は実験ケースによらずほぼ同じであったことが確認されている。

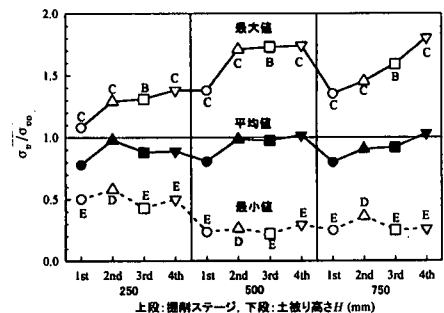


図-3 土被り高さと作用土圧

4. 作用土圧履歴に関する簡便なモデル

4. 1 降下床降下に伴う土圧減少について

作用土圧の変化を定量的に評価するため、ここではまず着目降下床の降下時の作用土圧変化のみに着目して分析する。図-4(a)から(d)は、横軸に降下量、縦軸に降下床降下に伴う作用土圧減分をそれぞれ最大降下量および土圧減少量で正規化したものについて全実験ケースの結果を示している。ここで土圧減分とはある降下量における作用土圧を降下前土圧から引いた差を、土圧減少量とは降下前の作用土圧から降下後の最終的な土圧を引いた量としている。本図から判断すれば、実験ケースによらず作用土圧の減少量については3種類の挙動に明確に分類できる。3種類の曲線のうち、曲線勾配の大きいものから順にトラック1、2および3とすると、これらのトラックは降下床の受けた荷重履歴によって次のように分類される。

トラック1：左右両側の隣接降下床がまだ降下していない

トラック2：左右両側の降下床のうち、いずれか一方のみが既に降下している

トラック3：左右両側の降下床いずれも既に降下している

つまり、着目降下床の降下に伴って減少する作用荷重の挙動は、このように隣接降下床の降下履歴がわかれば定量的に推定できることを意味する。

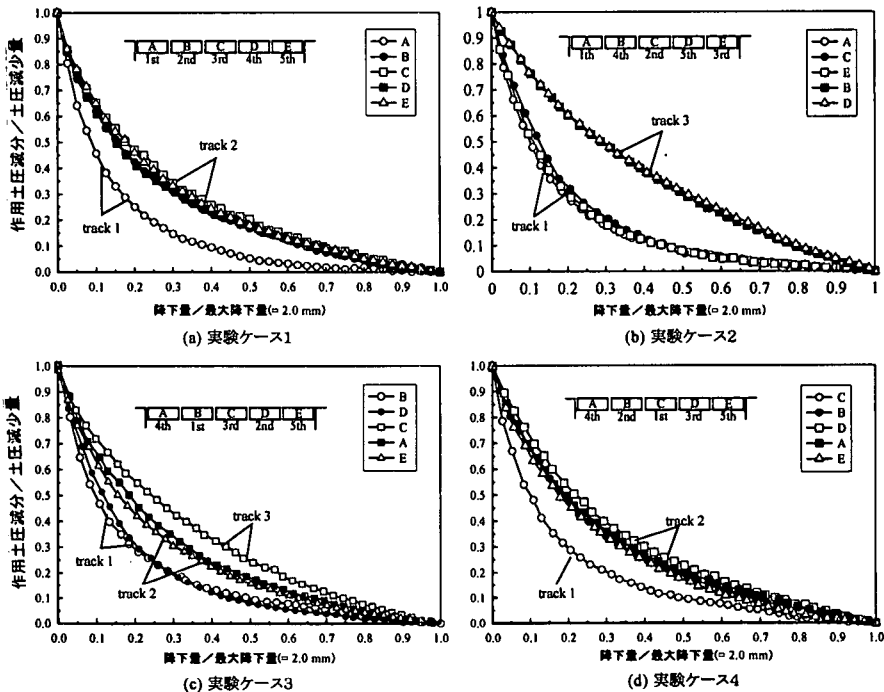


図-4 降下床降下に伴う土圧減少モード

4. 2 降下床降下に伴う他の降下床に及ぼす土圧増加について

3.1節の考察により、降下床降下に伴う各降下床の作用土圧履歴は、それ以前に降下した経験があるか否かでその挙動が異なることを明らかにした。ここでは、降下している降下床から数えて n 番目の降下床が、既に降下した経験があるか否かによって受ける増加土圧は次のように分類されるものとする。

降下経験のない降下床の受ける作用土圧増分： $\Delta\sigma_{\alpha n} = \alpha_n \times \sigma_{vi}$ (1)

降下経験のある降下床の受ける作用土圧増分： $\Delta\sigma_{\beta n} = \beta_n \times \sigma_{vi}$ (2)

ここで α_n , β_n はそれぞれ降下経験のないおよびある降下床の作用土圧増分比とし, σ_{vi} は土圧増加を受ける前段階の作用土圧とする. この σ_{vi} は, 他の降下床降下にともなう作用荷重を全く受けていなければ初期土圧 σ_{v0} と等しくなる.

2つの作用土圧増分比を定量的に明らかにするために, まずは前節と同様の手法で α_n , β_n の降下床降下に伴う挙動について分析を試みる. 図-5(a)および(b)はそれぞれ α_n および β_n について示したものであり, 縦軸に降下床降下に伴う作用土圧増分を土圧増加量で除して表している. 図中, 実線で示されている曲線は前節で得られた各実験ケースの土圧減少モードの平均的な曲線トラック 1, 2, および 3 を改めて求め, それぞれ原点に対する点対称な曲線に変換した曲線トラック 1', 2' および 3' である. 本図から明かなように, α_n および β_n で表した土圧増加モードは概ね α_n はトラック 1' に, β_n はトラック 3' に類似したモードを呈している.

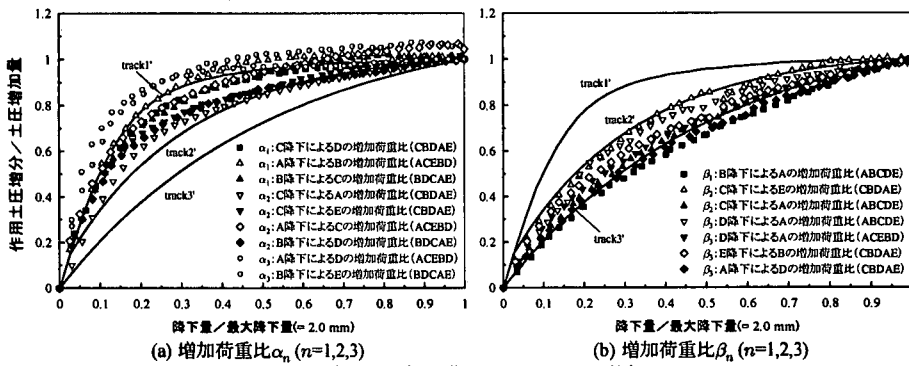


図-5 降下床降下履歴による土圧増加モード

4. 3 作用土圧履歴のモデル化に関する一手法について

本章ではこれまでに, 降下床降下に伴う降下床自身の作用土圧減少と, それ以外の周辺降下床に及ぼす作用土圧増加について, 降下床の位置関係と着目降下床が降下履歴があるか否かの2点からいくつかの基本的モードに分類できることを明らかにした. そこで本節では, このモードを定量的に求める一手法として, あるひとつの降下床を降下ならびに上昇を数回繰り返して得たヒステリシスループから求める方法について考えることとする.

図-6は土被り 500mm において, 降下床 C を降下-上昇することによって得たヒステリシスループを示している. また同図には,

Terzaghi のゆるみ土圧において土圧係数 $K=1.0$ としたものと, この値に受働土圧係数 K_p を当てはめたものをあわせて示した. これにより, ヒステリシスループの上限側(降下床上昇)の収束値はほぼゆるみ土圧式に K_p を代入したものと一致し, 逆に下限側(降下床降下)のそれはゆるみ土圧式に $K=1.0$ と一致することがわかる.

一方, 実験ケース1を例に各降下床の降下ステージにおける作用土圧の関係について, 降下床降下に伴う降下床自身の土圧減少はすべて周辺降下床の土圧増加に寄与すると考えると,

$$1\text{st ステージ (A 降下)}: 2 \times (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4) = 1 - \sigma_v(\text{Terzaghi}) \quad (3a)$$

$$2\text{nd ステージ (B 降下)}: (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4) + (\beta_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4) = 1 - \sigma_v(\text{Terzaghi}) + \alpha_1 \quad (3b)$$

$$3\text{rd ステージ (C 降下)}: (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4) + (\beta_1 + \beta_2 + \alpha_3 + \alpha_4) = 1 - \sigma_v(\text{Terzaghi}) + \alpha_1 + \alpha_2 \quad (3c)$$

$$4\text{th ステージ (D 降下)}: (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4) + (\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \alpha_4) = 1 - \sigma_v(\text{Terzaghi}) + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 \quad (3d)$$

$$5\text{th ステージ (E 降下)}: (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4) + (\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4) = 1 - \sigma_v(\text{Terzaghi}) + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 \quad (3e)$$

と表せる. これらの関係から α_n と β_n の関係は次のようになる.

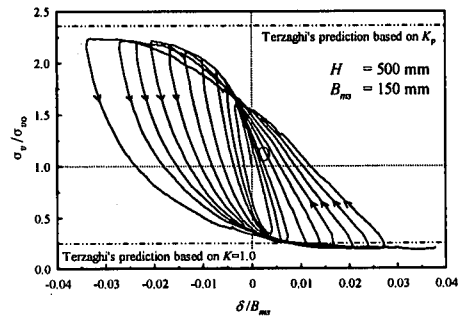


図-6 ヒステリシスループ

$$2\alpha_n = \beta_n \quad (4)$$

また、 α_n は実験結果から $n = 3$ 程度までしか影響があらわれないこと、そして 1st ステージの降下では周辺降下床はいずれも降下履歴がないことを考慮し、降下床 A 降下に伴う荷重分布形状が図-7のように左右対称となると仮定すれば、降下した降下床から数えて n 番目の降下床に作用する増加荷重面積比 A_{α_n} は次のような関係式で表せる。

$$A_{\alpha_n} = A_n / A_{\text{total}} = \alpha_n \times B_{ms}$$

以上の基礎的事項を踏まえ、実験ケース1(左から順に降下させる)を例にヒステリシスループから各降下床の土圧履歴を推定する方法を述べる。図-8中の太実線はヒステリシスループの一部とこのループの上限側及び下限側の包絡線を示している。まず、降下前の状態である原点 O から降下床 A を $\delta/B_{ms}=1.3\%$ 降下させると、その軌跡は曲線 OA_1 となる。この曲線は先に得たトラック 1 に相当するものである。実際にはトラック 1 をそのまま適用するのではなく、トラック 1 に対して縦軸については $\Delta\sigma_{v(A,1)}/\sigma_{v0}$ 倍、横軸については δ/B_{ms} 倍して変換した曲線をあてはめることになる。ここで $\Delta\sigma_{v(A,1)}$ は土圧減少量を意味し、かつこの添え字 A はその降下床を、I は掘削ステージを意味する。一方、A 降下に伴う周辺降下床の土

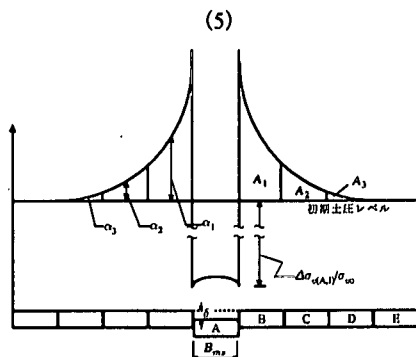


図-7 作用土圧の概念

圧増分について、ここでは降下床 B および C のみに着目して順に履歴を追うことにする。まず降下床 B であるが、曲線 OA_1 と原点に関して点対称な曲線 OB_1 を描き、次に B_1 の縦軸座標値に A_{α_1} を乗じる。この値が α_1 となり、図中 OB_1' で与えられる曲線が A 降下に伴う降下床 B の土圧増加モードとなる。降下床 C の土圧増加モードも同様に求めて OC_1 のようになる。次の掘削ステージ、すなわち降下床 B の降下を考える。降下床 B の土圧減少モードは隣接降下床 A がすでに降下しているのでトラック 2 に相当するモード(トラック 2 を該当倍率で変換した曲線)で表現される。したがって、曲線 $B_1'B_2$ の軌跡が B の土圧減少モードとなる。ここで得られる $B_1'B_2$ の高さが求める土圧減少量 $\Delta\sigma_{v(B,1)}/\sigma_{v0}$ で、これは Terzaghi のゆるみ土圧と等しい。B 降下床の土圧減少にともなう、周辺降下床には高さ OB_1' 、すなわち $(\Delta\sigma_{v(B,1)} - \Delta\sigma_{v(A,1)})/\sigma_{v0}$ 分の土圧増加をもたらす。周辺降下床のうち、既に降下経験のある降下床 A は作用土圧が $\Delta\sigma_{v(A,1)}/\sigma_{v0}$ から $\Delta\sigma_{v(A,1)}/\sigma_{v0} + \beta_1$ に増加する。ここで β_1 は α_1 と式(4)の関係にあるので、既に求められている α_1 から β_1 を求め、点 A_1 から β_1 分シフトした水平軸と原点を通る縦軸との交点から A_2 が得られる。この A_2 が降下床 B 降下に伴う降下床 A の作用土圧となり、その軌跡 A_1A_2 はトラック 3 相当の曲線で表せる。他の降下床 C、D および E も同様な手順で、それぞれ $(1+\alpha_2+\alpha_1)$ 、 $(1+\alpha_3+\alpha_2)$ および $(1+\alpha_4+\alpha_3)$ で規定される作用土圧が得られる。ただし実験結果によれば $\alpha_4 = 0$ が明らかとなっている。

このようにしてヒステリシスループを利用すれば、降下床作用荷重が各降下床の降下に応じて逐次求めることができる。

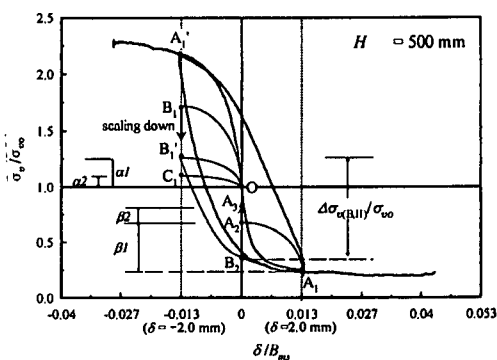


図-8 ヒステリシスループの適用例

謝 辞

本研究に関わる一連の模型実験を実施するにあたり、当時、東京都立大学学生 森真人君(現 東亜建設工業)、同院生 松原功明君(現 鹿島建設)および現院生 吉川浩央君には多大な尽力をいただいた。ここに記して深く感謝の意を表する次第である。