

長岡技術科学大学講義ノート*

地盤の振動台実験方法とその適用性

豊田 浩史†

概要

地盤工学に関する模型実験では、確固たる方法が確立されておらず、研究者の判断にまかせられることが多い。目的、精度、時間、装置、費用、労力などをその状況に応じて決定するわけだが、効率よく実験するためにはこれまでの例（論文）を調べ、経験者の意見を聞くことが望ましい。ただし論文等にはその詳しい内訳や内情は出てこないものである。ここでは、模型実験の方法とその一例を取り上げる。これが実験計画を練るときの参考になれば幸いです。



1 地盤工学における模型実験

て述べる。

1.1 はじめに

地盤工学の分野で実験といえば、次の3つに大きく分類できる。

1. 要素実験

一軸試験や三軸試験ことを言い、地盤の中からある微小要素を取りだしてきたと考える。地盤を縮小したわけではない。

2. 模型実験

ある対象物を実験室レベルで実験できるように縮小したもの。地盤のある微小部分を取りだしてきたわけではない。1G 場で行うものと遠心場で行うものがある。

3. 原位置試験

広くは原位置で行われる実験および調査全般を指す。例えば実際の構造物（実物）を使った実験（調査）や地盤の物理探査など。

ここではこれらの実験の中でも模型実験、特に地盤工学において振動問題を対象とした模型実験について

1.2 模型実験を行う理由

最近ではコンピューターの発達により、かなり複雑な計算でも短時間でこなすことができるようになってきた。よってその現象のメカニズムが完全に把握できており、定式化や理論化できるなら実験を行わなくとも、数値計算のみで十分である。

現象のメカニズムがわからないときに実験を行うわけであるが、特に模型実験は多くの未知の要因が存在しその現象が非常に複雑であり、要素の挙動の組み合わせから全体の挙動を予測することが困難な場合に行われることが多い。模型実験の結果は現象の定式化や理論化に使われ、実務的には設計法などにフィードバックされる。また既存の設計法の精度確認にも模型実験を用いることができる。

当然模型を作製するより実物、または実物大で実験を行うほうが、信頼性が高い。しかし実物で実験を行えることは数少ない。その理由を次に記しておく。

- 実物が高価である。
- 実物を破壊させられない。例えばダムなど。

*建設工学実験 I, 建設工学実験 II

†長岡技術科学大学 環境・建設系

- 現象が長期に及ぶ。例えば厚い粘土層の圧密など。
- 実現象を必要ときに呼び出せない。例えば地震や台風など。

しかし研究目的によっては模型のほうが適当な場合もある。次にその理由を示しておく。

- 条件の単純化，明確化ができ，再現性が高まる。
- 条件を変化させ，数多くの実験ができる。

地盤工学においては次に示す問題について，よく模型実験が行われる。

- 地盤の支持力
- 土圧
- 安定問題
- 振動問題 (液状化問題を含む)

1.3 模型実験の目的

模型実験を行う目的としては，以下のようなことが考えられる。

1. 現象のメカニズムの解明
例えば破壊モード (円弧すべり) の検証を行い，これをもとに数値モデルを確立する。
2. 相似則の検証
3. 計算法の妥当性の検証
例えば模型をミニサイズの実物と見なし，数値計算の整合性を見る。
4. 実務，施工の再現 (管理)
5. 土の力学定数の把握 (要素試験との対応など)

1.4 相似則

1.4.1 はじめに

相似模型とは，その幾何学的形状が実物と相似であるばかりでなく，その運動 (模型現象に含まれる

変数) も相似でなければならない。しかし完全な相似模型というのは不可能であり，我々が興味のある範囲内で本質的にその現象に関する相似が満たされていればよい。相似が満たされている模型では，模型実験より実物の挙動も予測できる。ここでは相似模型を作るために必要な法則である相似則の求め方について述べる。

1.4.2 地盤の模型振動実験における相似則

相似則を求めるためにはいくつかの方法があるが，以下に代表的なものを記しておく。

- Buckingham の π 定理を用いる方法

Buckingham の π 定理は，同種の物理量の比を模型と実物で同一に取る方法である。同種の物理量の比は無次元量であり， π ナンバーと呼ばれる。この方法ではまず第一に現象に関係すると考えられる物理量を全て列挙し，第二に Buckingham の π 定理を用いて無次元量を組み立て，そして第三にこれらの無次元量を 2 つの系で等しく取ることにより相似則を立てる。この方法は適用性が広く，物理量を列挙しさえすれば後は数学的な処理をするだけである。しかし以下のような欠点も有している。

- どの無次元量が大切であるかの判断をする基準がない。
- 物理量を列挙するための確固たる法則がない。
- 実際に必要な無次元量の数が定理より求めたそれより少なくなることがある。

- 力の比を用いる方法

力学的現象について適用できる方法である。一般性に欠ける方法であるが，二つの系が相似であるということは形状が相似であり，二つの系の間で主な力の比が全て同一であれば満足されるという仮定に基づいている。

- 支配方程式を用いる方法

現象を支配する方程式およびその境界条件がわかっている場合にはさらに効率の良い相似則を立てることができる。すなわちこのような方程式は二つの系に対して同等に適用可能であってこれを無次元化することにより現象を支配する無次元量を抽出することができる。相似則を得るためには支配方程式およびこれに対応する境界条件を無次元化することにより無次元量を組み立て、これらの無次元量を二つの系で等しく取ればよい。

以上に述べた方法のうちで比較的簡単な力の比を用いる方法を用い [1]、地盤の模型振動実験における相似則を導いてみる。

地盤の振動特性に影響を持っていると考えられる力は、慣性力、弾性力、内部摩擦減衰力、自重、破壊時に示す力などが考えられる。以下にそれぞれについて考えてみる。添字 p および m はそれぞれ対応する物理量が実物および模型に属するものであることを示している。実物と模型の長さの比を $\lambda (= l_p/l_m)$ とする。

1. 慣性力 ($Ma = M\omega^2 y$)

質量 M 、角振動数 ω 、動的変位 y 、密度 ρ 、動ひずみ $\varepsilon (= y/l)$ を用いて慣性力の力の比 r_i は次式のようになる。

$$r_i = \frac{M_m}{M_p} \cdot \frac{\omega_m^2}{\omega_p^2} \cdot \frac{y_m}{y_p} \quad (1)$$

$$= \frac{\rho_m}{\rho_p} \cdot \frac{\omega_m^2}{\omega_p^2} \cdot \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_p} \cdot \frac{1}{\lambda^4} \quad (2)$$

2. 弾性力 ($E\varepsilon A$)

弾性力の比 r_e は動ひずみ ε 、弾性定数 E 、面積 A を用いて次式のように表すことができる。

$$r_e = \frac{E_m}{E_p} \cdot \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_p} \cdot \frac{A_m}{A_p} \quad (3)$$

$$= \frac{E_m}{E_p} \cdot \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_p} \cdot \frac{1}{\lambda^2} \quad (4)$$

3. 内部摩擦減衰力 ($hE\varepsilon A$)

内部摩擦減衰力の比 r_{dp} は減衰定数 h 、弾性定数 E 、動ひずみ ε 、面積 A を用いて次式で与えられる。

$$r_e = \frac{h_m}{h_p} \cdot \frac{E_m}{E_p} \cdot \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_p} \cdot \frac{A_m}{A_p} \quad (5)$$

$$= \frac{h_m}{h_p} \cdot \frac{E_m}{E_p} \cdot \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_p} \cdot \frac{1}{\lambda^2} \quad (6)$$

4. 自重 (Mg)

自重による力の比 r_d は質量 M 、重力加速度 g を用いて次式のように与えられる。

$$r_d = \frac{M_m}{M_p} \cdot \frac{g_m}{g_p} \quad (7)$$

$$= \frac{\rho_m}{\rho_p} \cdot \frac{g_m}{g_p} \cdot \frac{1}{\lambda^3} \quad (8)$$

5. 破壊時に示す力 ($c' + \sigma' \tan \phi'$)

土のせん断抵抗 τ_f は破壊面に作用する有効垂直応力 σ' 、粘着力 c' 、内部摩擦角 ϕ' を用いて次式のように表すことができる。

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (9)$$

粘着力による力の比と内部摩擦角による力の比を別々に考えることにする。まず粘着力による力の比 r_c は次式のように表すことができる。

$$r_c = \frac{c_m'}{c_p'} \cdot \frac{A_m}{A_p} \quad (10)$$

$$= \frac{c_m'}{c_p'} \cdot \frac{1}{\lambda^2} \quad (11)$$

また内部摩擦角による力の比 r_f は次式のように表すことができる。

$$r_f = \frac{\sigma_m'}{\sigma_p'} \cdot \frac{A_m}{A_p} \cdot \frac{\tan \phi_m'}{\tan \phi_p'} \quad (12)$$

$$= \frac{\sigma_m'}{\sigma_p'} \cdot \frac{\tan \phi_m'}{\tan \phi_p'} \cdot \frac{1}{\lambda^2} \quad (13)$$

$$(14)$$

以上より模型と実物を結びつける相似則は次式が満足されればよい。

$$r_i = r_e = r_{dp} = r_d = r_c = r_f \quad (15)$$

さらに実験条件を絞っていくと、1G 場で実験を行い、土の力学特性を重視するため、模型と実物で同じ土¹を使うとすると次式が成り立つ。

$$\frac{\rho_m}{\rho_p} = 1 \quad (16)$$

$$\frac{\sigma_m'}{\sigma_p'} = \frac{1}{\lambda} \quad (17)$$

これまでの研究により、 $\varepsilon < 10^{-3}$ においては次式が成り立つといえる。

$$\frac{E_m}{E_p} = \frac{1}{\lambda^{\frac{1}{2}}} \quad (18)$$

式(18)を用いるということは、破壊時の大変形ひずみまで議論ができなくなってしまう。よって厳密には、対象としているひずみレベル(あるいはひずみレベルで場合分けをして)において相似則を立てるべきである。式(18)によって影響を受ける物理量は式(15)よりひずみのみであることがわかる。つまりこの仮定が違えばひずみの相似比が変わってくる。ここではとりあえず式(18)の仮定で議論を進めていくことにする。

これらの仮定を用いて式(15)を解くと次式が求められる。

$$\frac{\omega_m}{\omega_p} = \lambda^{\frac{3}{4}} \quad (19)$$

$$\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_p} = \frac{1}{\lambda^{\frac{1}{2}}} \quad (20)$$

¹ 実際粒径が砂より小さいものについては、実物と同じ土が使われることが多い。礫以上の大きさになると粒径に相似則を適用する場合がある。

$$\frac{h_m}{h_p} = 1 \quad (21)$$

$$\frac{c_m'}{c_p'} = \frac{1}{\lambda} \quad (22)$$

$$\frac{\tan \phi_m'}{\tan \phi_p'} = 1 \quad (23)$$

応力とひずみの相似比が1にならないなどの若干の問題点もあるが、上式を満たすように模型実験を行えば、模型の挙動から実物の挙動が定量的に推定できる。

ここで土の動的変形・強度定数である $h, c', \tan \phi'$ について考える。まず式(22)であるが、同じ土を用いてこれを満たすことはできない。よって c' が無視できるような状態(飽和粘土の大変形時など)での適用のみ可能である。式(21), (23)については拘束圧の差が小さければ成立するとしてよい。したがって、幾何的相似比が大きくなっていくような模型は好ましくない。

表1に主な物理量の相似比をまとめておく。また参考のため遠心場の相似比も示しておく。

表1: 模型振動実験の相似則

項目	1G 場 (模型/実物)	遠心場 (模型/実物)
長さ	$1/\lambda$	$1/\lambda$
振動数	$\lambda^{\frac{3}{4}}$	λ
密度	1	1
変位	$1/\lambda^{\frac{3}{2}}$	$1/\lambda$
ひずみ	$1/\lambda^{\frac{1}{2}}$	1
応力	$1/\lambda$	1
加速度	1	λ

1.5 模型実験の注意点

模型実験にマニュアルは存在しない。目的、精度、時間、装置、費用、労力などをその状況に応じて決定しなければならない。効率よく実験を行うには、これまでの例(論文)を調べたり、経験者の意見を聞いて

たりして前もって情報を得ることが望ましい。

2 模型地盤の作製方法

2.1 はじめに

地盤工学における模型実験の第一歩は模型地盤の作製である。研究の目的によって均一な地盤、層状の地盤、複雑な応力履歴を持った地盤など多くの種類の模型地盤を作製する場合があるが、実験に当たっては作製した模型地盤の力学特性を正確に把握し、実物との相違を認識した上で実験を行う姿勢が必要である。

2.2 砂地盤の作製

1G 場の模型実験では砂地盤が対象となることが多い。よってここでは対象を砂地盤にかぎり、主な作製方法を何種類か紹介する。またここに示す作製方法については正式な呼び名が決まっているわけではない。実験に当たっては研究目的に応じて適当な作製方法を選択するか、もしくは独自に新しい方法を考えなければならない。

- 空中落下法
乾燥した砂を空中からまいて堆積させる。砂の落下高さや落下密度を調節して、地盤密度をコントロールできる。調整できる相対密度は 30 ~ 80% 程度である。一般的に落下高さを高くして少しずつ砂を降らせる（落下密度小）と相対密度 80% 程度の密な地盤の作製も可能である。均一な地盤を作るためにはふるいを通して落下させると良い。
- 水中堆積法
水中に砂をまいて堆積させる方法である。飽和した地盤を作るときに最も一般的な方法である。ゆっくりと堆積させていくとかなり飽和度の高い地盤の作製が可能である。この方法で作製される地盤の相対密度は 30 ~ 40% と範囲が小

さい。逆に言えば、少しくらい砂のまき方が変わっても同じような地盤の作製が可能である。

- 湿潤堆積法
水で湿らせた砂を堆積させる方法である。ただ堆積させただけでは非常にゆるく詰まるので突固めや転圧が行われる。1G 場では湿潤状態で実験を行うことは少なく、この後飽和させるが、空中落下法や水中堆積法よりもゆるい地盤の作製が可能である。
- 振動締固法
これはそれぞれの方法で堆積させた地盤の密度調整方法である。加速度の大きさや振動時間で調整を行う。相対密度 100% 近い地盤の作製も可能であるが、土構造物があるときは、これが壊れてしまうことがあるため使用が限定される。
- 突固法
それぞれの方法で堆積させた地盤を突き棒やタンパーで締固め、密度を調整する方法である。砂地盤に突き刺さる程度の細目の突き棒で乾燥砂地盤を突き固めると、堆積によって起こる異方性が取り除かれるといわれているが、地盤が大きくなると作業上困難である。

以上が代表的な砂地盤作製方法であるが、空中落下法や湿潤堆積法で堆積させた地盤の飽和方法について簡単に述べておく。基本的には地盤の下からゆっくりと水を入れていくわけであるが、これだけで高い飽和度を得ることは困難である。したがって、水を入れる前に二酸化炭素を地盤の下より供給する方法がある。この方法により少しは飽和度の上昇が見込める。最も良いのは、模型地盤が作製されている地盤を真空槽の中に入れて真空にし、下から脱気水を供給する方法であるが模型地盤が大きい場合には困難である。

2.3 測定器の設置

模型地盤に測定器を設置して有用な値を取らなければ、工学的な観点からの考察ができない。ただし

測定器はむやみやたらに設置すればよいというものではなく、研究の目的にあわせて計画的に設置すべきである。測定器の材質は当然地盤とは異なっているため、これにより地盤の性質が変わらないようにする必要がある。したがって測定器はあまり大きいものを用いず、研究に支障をきたさない程度で、できるだけ少なくするのが望ましい。決して「測定器混じり地盤」とならないようにする。ここでは一例として水圧計と加速度計の設置について注意すべき点を記しておく。

まず水圧計であるが、これは液状化の実験などでよく用いられる。当然防水型とし、精度よく測定するために、発生する水圧によってその計器の最大許容値を決めたい。設置で注意する点は、液状化によって水圧計の位置が動いてしまったりは何を測定しているのかわからなくなってしまうため、通常は何か柱のようなものに設置し、動かないようにする。あまり柱が太いと地盤に影響することがあるので、紐などに固定するのも良い。

次に加速度であるが、これは地盤と一緒に動く必要がある。地盤とのかみ合わせをよくするために加速度計に安定台を取り付け、加速度計が地盤とともに動き、かつ傾かないようにする。加速度計が傾いてしまうと正確な加速度が測定できなくなってしまうので注意が必要である。また地盤の加速度を測定するため、加速度計は柱などに取り付けることはできず、液状化した地盤の正確な加速度測定は困難である。当然飽和地盤に加速度計を設置するときは防水型にする。

以上計器の設置について簡単に述べたが、模型実験においては視覚による観察も重要である。何らかのターゲットを写真やビデオに写し、デジタイザーなどでその位置の変化を追跡することもできる。また地盤中の動きを観察したければ、地盤に鉛玉を埋めておけば、X線写真により土中の動きを追跡可能である。ターゲットはできるだけ地盤材料と同じものを用いるべきであり、色砂などがよく用いられる。砂に色をつけるのであれば、粒径などが変化しないように染料を用いて染めるのが最もいい方法である。

2.4 壁面の影響

模型実験では半無限地盤中の実物を想定することが多いため土槽寸法の制約の中で壁の影響を受けないように模型を作る必要がある。振動と直角方向の壁の影響で最も問題になるのは、壁により変形が完全に拘束されてしまうことである。この影響を除く方法をいくつか示しておく。

- 土槽を十分長くし(高さの5倍以上が望ましい)、できるだけ土槽の中央部の土に着目する。
- 壁付近の地盤に切りかき(テーパ)をつけ、少しでも水平変形が起こりやすくする。
- 壁の下端をヒンジ結合とし、バネで支持してやる。
- 壁に柔らかいゴムやスポンジを貼る。
- リングせん断土槽を用いる。最も信頼できる方法であるが、土槽自体が非常に高価である。

次に振動方向の壁で問題になるのは摩擦である。ゆっくりとした載荷の場合には、ゴム膜の間にシリコングリスを挟んだものを壁に貼り付けることにより摩擦が軽減される。振動問題のように速い載荷に対しては、アクリルの代わりに硬化ガラスを用いたり、テフロンシートを重ねたりする方法がある。

2.5 土以外の模型材料の選定

地盤工学における模型実験では土以外の模型材料を使うことも多い。例えばジオテキスタイル補強の効果や破壊のメカニズムを探るといった実験ではこれら付加材料の特性にも十分な配慮が必要である。実物と同じ材質で作れないなどの問題が生じることがあるが、力学的な相似則さえ満足していれば材質はあまり重要ではない。模型においては可能な範囲で理想化あるいは単純化の姿勢が必要である。

3 計測技術

これについては別途作成してある，“長岡技術科学大学講義ノート”のなかの“地盤工学における測定技術”を参照していただきたい。

4 検定表について

変換器を購入すると必ずメーカーによる検定表が付属しており，これを参照することによって変換器の較正係数や性能を知ることができる。メーカーによる検定は精度が高く，変換器が適正な条件の下で使用されている限り記載されている数値が変化することはない。また，変換器の種類によっては我々の実験室であらためて検定することが不可能なものもあるため，メーカーの検定表は大切に保存しなければならない。自分で検定を行った場合もきちんとした検定表を作成して保存する。

以下に，検査成績表の重要な語句を簡単に説明する。

- 容量：変換器の測定精度が保証される最大値。これを越える値を受けると変換器の塑性変形が生じるなどして性能の変化をきたす。
- 定格出力：容量に対応する値がかけられたときの変換器の出力電圧（ブリッジ電圧に対する比）またはひずみゲージのひずみ量。
- 非直線性：変換器の出力の直線関係からのずれの最大量。定格出力に対する比で表す。
- 較正係数：容量と定格出力の比から求める。

5 模型実験例

5.1 はじめに

ここでは実際に行った3ヒンジアーチの振動台模型実験について簡単に紹介したい。プレキャスト製

3ヒンジアーチは短スパンの橋梁や現場打ちボックスカルバートに変わるものとしてフランスのテールアルメ社で開発された3ヒンジのアーチ構造物である。アーチ部分をプレキャスト製にすることによって施工期間の短縮と周囲に与える影響を最小限にとどめることができる。またこの方法では盛土側面をテールアルメ工法によって補強するため土工量を最小限にしトータルコストを削減できる。ただし日本のような地震国でこの工法を採用するには地震時の安定性や振動特性を把握する必要がある。

5.2 プレキャスト製3ヒンジアーチの特徴

プレキャスト製3ヒンジアーチの特徴は以下の通りである。

- コンクリート二次製品のアーチ部材を組み立てる構造のため，施工は迅速で交通遮断等を最小限に押さえることができる。
- 使用部材は全て工場生産されるため，高い信頼性が得られる。
- アーチ部材は左右交互に一台のクレーンで簡単に設置でき，アーチ部材の支保工を最小限に押さえることができる。
- アーチ部材の曲線形状は，懸垂曲線と呼ばれる曲線で現場の使用を満足し，曲げモーメントを最小にする形状である。この形状はアーチ部材の厚さを最小にし，部材コストを抑えることのできる最適な形状である。
- 坑口付近のウイング壁や頂部壁はテールアルメ工法を用いるため，土工量を最小にしトータルコストを削減できる。

5.3 プレキャスト製3ヒンジアーチの施工手順

プレキャスト製3ヒンジアーチの施工手順を示しておく。

検査成績表
CALIBRATION SHEET

形式	Model	LP-500
製造番号	Serial No.	376304
定格容量	Capacity	500 kgf
定格出力	Rated output	1.001 mV/V (1 mV/V = 2000 $\mu\epsilon$)
非直線性	Nonlinearity	-0.06 %RD
ヒステリシス	Hysteresis	-0.30 %RD
較正係数	Calibration constant	499.5 kgf / 1 mV/V
検査年月日	Inspected date	1997.07.10
検査者	Inspector	H. Toyota

図 1: 検定表の書式の例

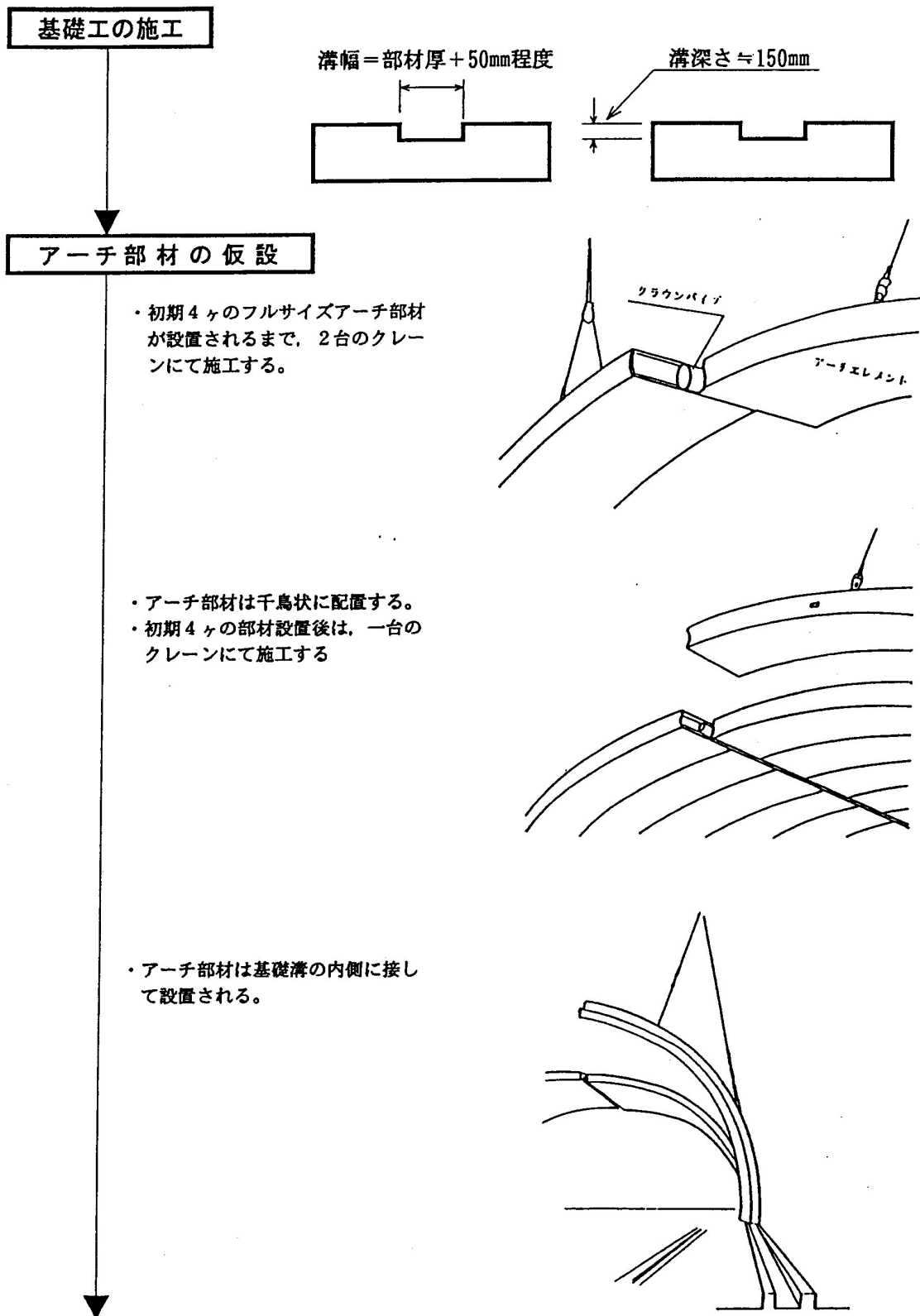


図 2: プレキャスト製3ヒンジアーチの施工手順 (その1)

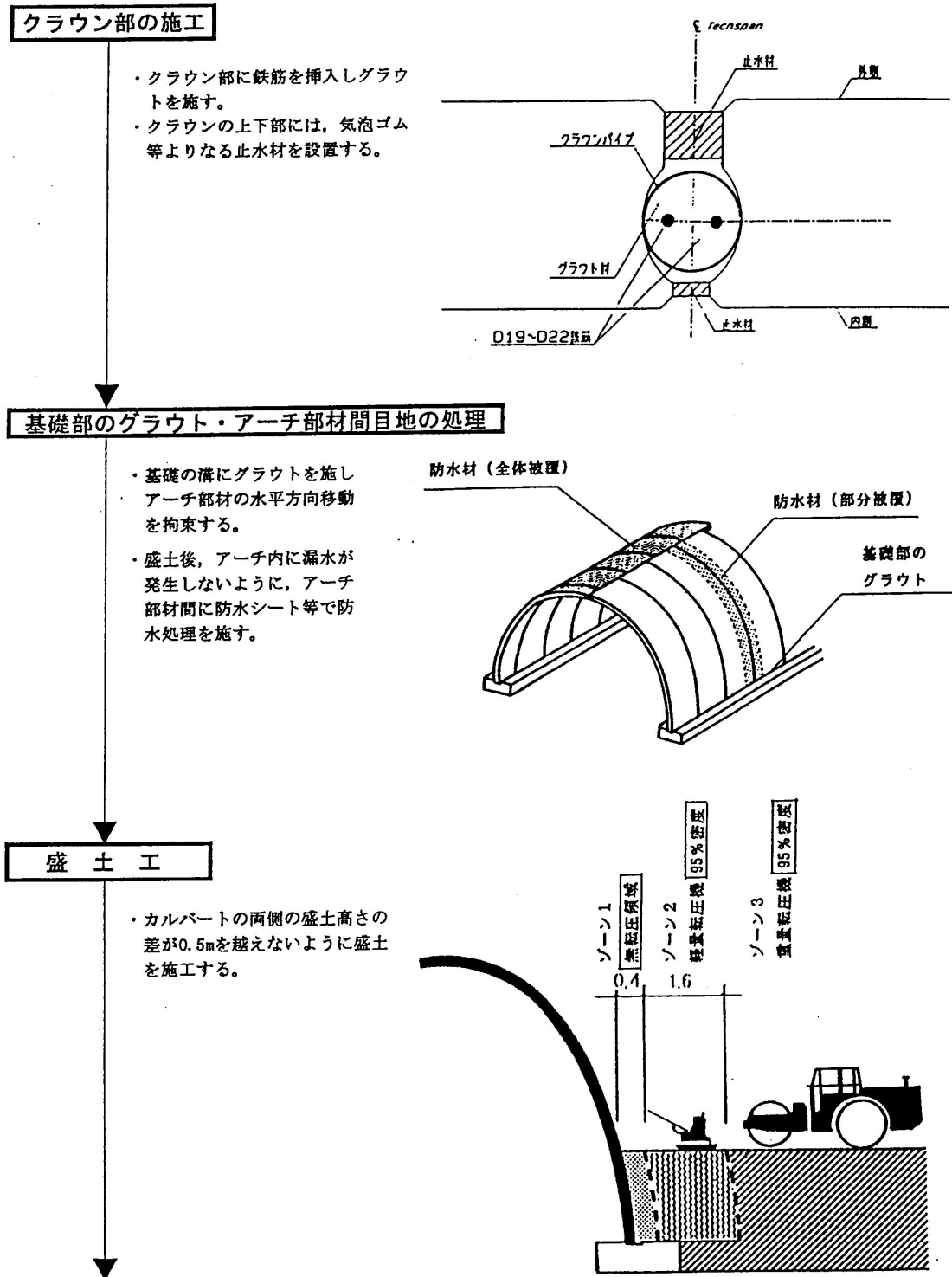


図 3: プレキャスト製3ヒンジアーチの施工手順 (その2)

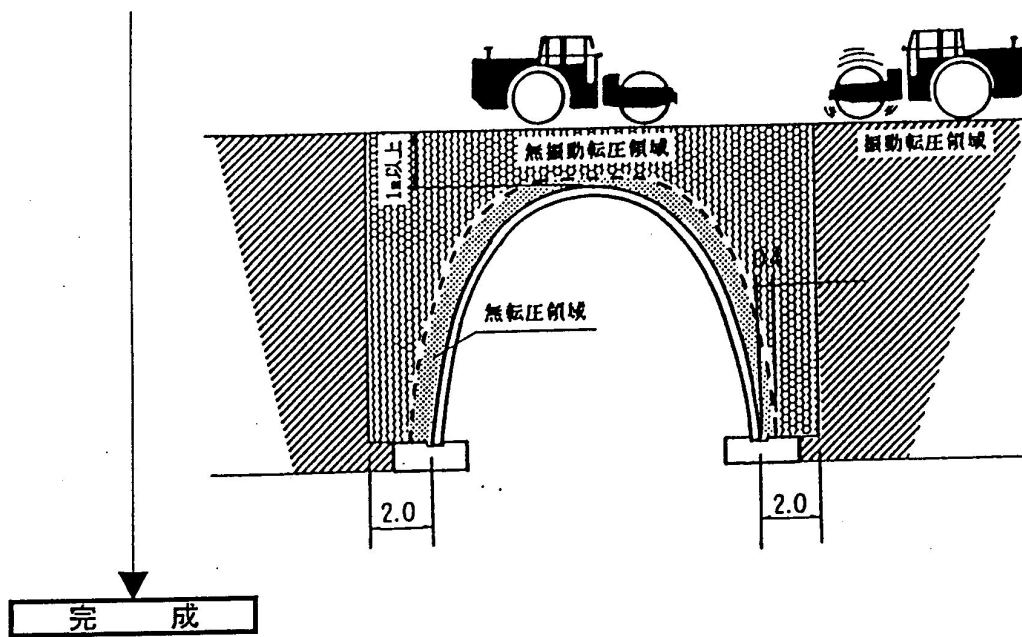
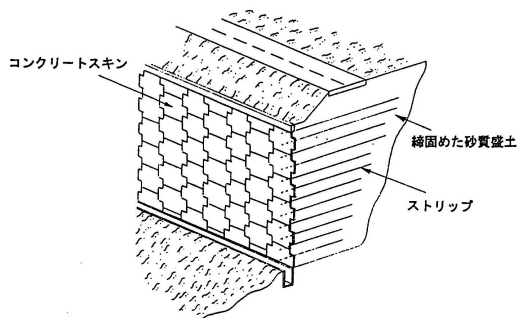


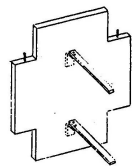
図 4: プレキャスト製 3 ヒンジアーチの施工手順 (その 3)

5.4 テールアルメ工法の特徴

テールアルメ工法とは盛土に水平、鉛直とも一定の間隔に帯鋼による補強材(ストリップと呼ぶ)を埋設し、土が変形しようとする力をストリップの引張力に変えて土の変位を拘束し、垂直盛土を構築することができる。ストリップの端部には背面の土砂のこぼれ出しを防ぎ、土圧の一部を受け持って盛土に拘束圧を与える役割を持つ壁面材(スキンと呼ぶ)が取り付けられる。図5にテールアルメ工法の構造を示す。



(a) 実際のテールアルメ工法



(b) スキンとストリップ

図5: テールアルメ工法の構造

テールアルメ工法は従来からあるコンクリート擁壁や石積み擁壁と比較すると次のような特徴を持っている。

- 垂直な面を持つ盛土が構築できるため、限られた用地を有効に利用できる。
- 工場製品を使用するため部材の品質面での信頼性が高い。また型枠組立やコンクリート打設が無いなど大幅な工期の短縮や省力化が図れる。

- テールアルメ工法の施工は、盛土材の敷きならし、締固め、ストリップの敷設、スキンの組立を1サイクルとして繰り返すもので、特殊な機械や技術を必要としない。
- 一般に鉛直間隔 33.3~75cm ごとにストリップが敷設されるため必然的に薄層転圧された品質の高い盛土が施工される。
- 基礎地盤の多少の不同沈下にも追随しうる柔構造で、壁面のみを堅固に支持する必要が無く、基礎の処理も一般には簡単なものでよい。
- スキンに着色したり、その表面にデザイン模様を施して、周囲の景観や環境に馴染む美しい外観に仕上げることができる。

5.5 盛土の作製方法

密詰めとゆる詰めの模型盛土を作製する。密詰め盛土は以下の方法で作製する。この方法により相対密度 80% の盛土が作製できる。

1. 土槽内に基礎工を設置し、土槽上部からクレーンにより支え板を入れる。
2. アーチカルバートを土槽内で組み立て、盛土内のアーチ坑口を木製の蓋でふさぐ。
3. あらかじめテールアルメ部材を組んでおき、土槽内の支え板に設置する。
4. アーチ全面にビニールを敷き、盛土材の漏れを防ぐ。
5. 下から1段目のストリップの高さまで盛土材を入れ、30Hz、600galで20秒間振動締固めを行う。
6. 振動締固め終了後、1段目のストリップを盛土材上に設置し、2段目のストリップの高さまで盛土材を入れ、再び振動締固めを行う。
7. 以降5., 6. を順次繰り返す。

ゆる詰め盛土は以下の方法で作製する。この方法により相対密度 40% の盛土が作製できる。

1. 土槽内に基礎工を設置し、土槽上部からクレー

- ンにより支え板を入れる。
2. アーチカルバートを土槽内で組み立て、盛り土内のアーチ坑口を木製の蓋でふさぐ。
 3. あらかじめテールアルメ部材を組んでおき、土槽内の支え板に設置する。
 4. アーチ全面にビニールを敷き、盛土材の漏れを防ぐ。
 5. 下から1段目のストリップの高さまで盛土材を落下高さがほとんど無い状態に入れる。
 6. 1段目のストリップを盛土材上に設置し、2段目のストリップの高さまで同様の方法で盛土材を入れる。
 7. 以降5., 6. を順次繰り返す。

5.6 計測項目

本研究での計測手順は各計測器(変換器)の電圧を動ひずみ測定器で増幅し、PCM データレコーダーを用いてビデオテープに記録されるようになっている。表2に計測機器の一覧を示す。

各計測器は以下のように配置する。

- 加速度計
盛り土内の坑口付近に8ヶ所、奥行き中央付近に8ヶ所の計16ヶ所に設置した。加速度の測定方向は加振方向とする。
- レーザー式変位計
テールアルメ工法の壁面の移動を測定するために、頂部壁のアーチ部材付近と頂部付近の2ヶ所、ウイング壁の中間部付近と頂部付近の2ヶ所の計4ヶ所に設置した。変位の測定方向は加振方向に関係なく縦方向である。
- π 型変位計
図6に示すようにりん青銅板にひずみゲージを接着して作製した。アーチ部材の裏側に坑口から6個目までのつなぎ目5ヶ所に設置した。
- 軸力測定器
アーチ部材にひずみゲージを接着して作製し

た。坑口付近のアーチ部材と奥行き中央付近のアーチ部材に設置した。

- 曲げモーメント測定器
アーチ部材にひずみゲージを接着して作製した。坑口付近のアーチ部材と奥行き中央付近のアーチ部材に設置した。

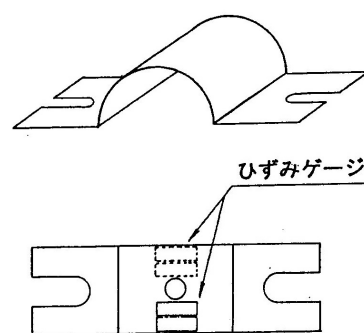


図6: π 型変位計

5.7 実験方法

本実験では模型盛土の周波数特性を調べるための共振試験と強震時のアーチ部材の応力状態を把握するための破壊試験を行った。なお、加速度入力波形は正弦波を用いる。

5.7.1 共振試験

土槽内に作製した模型盛土の周波数特性を調べるために行う共振試験は、50gal程度の比較的小さな加速度振幅の正弦波を5Hzから49Hzまで2Hz刻みで周波数を上げていき、各加速度計の測定位置における加速度を測定する。各加速度計の測定加速度と土槽底部の入力加速度から模型盛土の加速度応答倍率を求め、盛土の固有振動数を調べる。

表 2: 計測機器一覧

計測器名	製造会社	型式名	数量
加速度計	共和電業	ASW-2A	16
レーザー式変位計	KEYENCE	LB-1200, LB-300	4
π 型変位計	自作	ひずみゲージ接着	5
軸力測定器	自作	ひずみゲージ接着	6
曲げモーメント測定器	自作	ひずみゲージ接着	6
ビデオカメラ	SONY	EVC-X10	2

5.7.2 破壊試験

強震時のアーチ部材の応力状態を把握するために、行う破壊試験は、密詰めの場合、共振試験で求められた共振周波数で加速度振幅を 50gal から 50gal 刻みで上げ、最終的には最大 600gal まで加振を行う。なお、測定は各段階で振動が定常に至った時点より各測定器によって測定を行う。600gal より小さい加速度振幅で模型盛土が破壊した場合は、その加速度振幅で実験を終了する。

ゆる詰めの場合は、段階的に加速度を上げていくときに沈下などが生じ盛土の特性が変化してしまうため、加速度振幅 200gal(破壊加速度付近と考えた)で加振し、破壊に至らなかった場合は 100gal ずつ上げて加振を行う。

5.8 実験結果の概要

ここに実際に行った実験の結果と考察および解析結果に関しては参考文献 [2][3] を参照していただきたい。

参考文献

- [1] 香川崇章. “土構造物の模型振動実験における相似則”, 土木学会論文報告集, No. 275, pp. 69–77, 1978.
- [2] 豊田浩史, 高貝真. “テールアルメ盛土中にお

る 3 ヒンジアーチの動的挙動”, 土木学会論文集, No. 624 / III-47, pp. 255–266, 1999.

- [3] 豊田浩史, 伊藤寿晃. “テールアルメ盛土と 3 ヒンジアーチの動的挙動に与える加振条件と各種物性値の影響”, 土木学会論文集, No. 666 / III-53, pp. 279–289, 2000.