

剛な擁壁に働く砂地盤の土圧分布

—擁壁の傾斜角と移動モードの影響—

地盤工学分野 北村卓治

1. はじめに

土圧を構成する要因は多く、その影響水準を調べ上げるには数多くの実験を必要とするので、大型モデルでは要求に応える数の実験を行うことは不可能であり、小型モデルに頼らなくてはならなくなる。しかし、応力依存性の極めて強い力学特性を有し、かつ自重応力が卓越する土構造物に対して小型モデルでは実物挙動の再現性がほとんど期待できない。遠心模型実験は、小型モデルの有するこの欠点を除くものである。図-1に遠心模型実験の概念を示す。遠心模型実験は縮尺 $1/n$ の相似模型に重力加速度の n 倍の加速度を作用させることで実物と模型の応力の同一性を満たす実験手法である。遠心加速度比と模型寸法を組み合わせると等価な実物を想定した複数模型実験の結果が同一の場合、実物を外挿できる (Modeling of Models)。

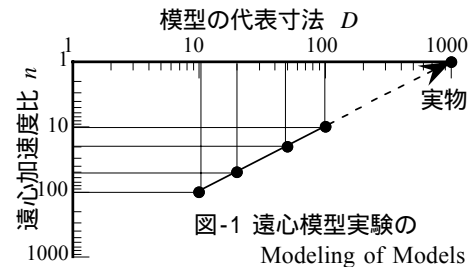


図-1 遠心模型実験の Modeling of Models

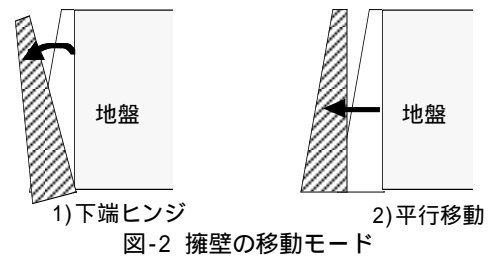


図-2 擁壁の移動モード

過去の二次元土圧に関する遠心模型実験では、壁面に作用する全土圧の計測は行われてきたが、深度方向の土圧分布を測定した例はほとんどない。そこで、本研究室では'02年度から深さごとに分割され、各々が土圧を測定できる剛な壁面を持つ模型擁壁を開発し、土圧分布の測定を遠心模型実験で行ってきている。過去2年の研究では砂地盤に傾斜させて設けた模型擁壁を、下端をヒンジとして主働方向に回転移動させ、静止状態から主働状態に至るまで、模型擁壁に働く土圧分布を測定するものであった。実際には地盤の状態によって下端ヒンジ以外の移動モードも考えられ、特に傾斜を持つ「もたれ擁壁」では水平に移動する崩壊形態が多いとされる。そこで、本研究では砂地盤に傾斜する模型擁壁を図-2のように1)下端をヒンジとする回転移動、2)平行移動させ、移動モードが土圧に与える影響を調べた。

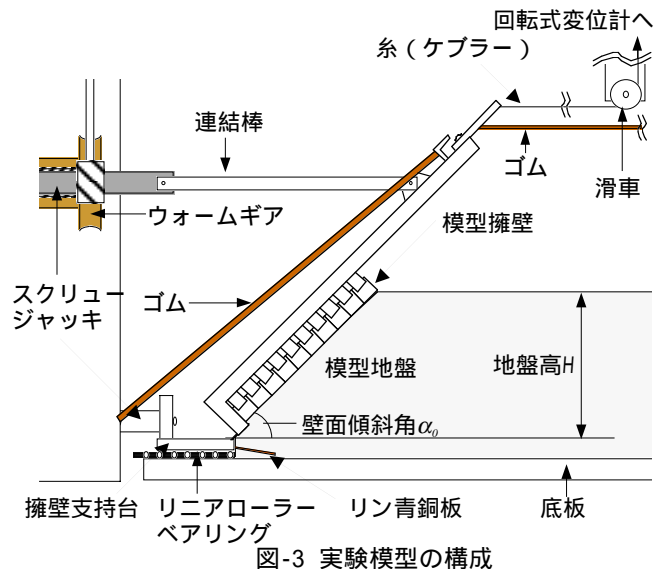


図-3 実験模型の構成

2. 実験方法

図-3に実験模型の構成を示す。模型擁壁を地盤高 H 、水平面に対する傾斜角 α_0 で配置する。擁壁上部は上スクリュージャッキに連結棒を介し、下部はリニアローラーベアリング上の擁壁支持台溝にはめ込み、それぞれヒンジとしている。移動モードの1)下端ヒンジの場合は上ジャッキのみを動かし、2)平行移動の場合は上下ジャッキを等速で動かし擁壁を主働方向に移動させ

る。模型地盤材料は、空気乾燥豊浦砂 ($\rho_{dmax}=1.65\text{g/cm}^3$ 、 $\rho_{dmin}=1.35\text{g/cm}^3$) を用い、空中落下法(横詰め法)で模型地盤を作製する。遠心力载荷装置の容器内に模型を設置後、擁壁を 0.2mm/min 程度の速度で動かし、水平変位 $d=0.1\text{mm}$ ごとに土圧を測定する。壁面の変位は擁壁上端に固定する糸で回転変位計に伝えて測定する。地盤変形は、インクで色付けした豊浦砂を観測面に格子状に散布し一定変位毎に写真撮影する。

図-4 に模型擁壁を示す。擁壁は両端を供試体壁面との摩擦を避けるダミー部として、中央部を深度方向に10分割し、幅7.8mmの受圧面とする土圧計を8mm間隔で設置している。土圧計は両端支持桁に角孔を2つあけて肉厚を薄くし、ひずみが集中する薄肉部にひずみゲージを2枚ずつ貼り、4ゲージ法で測定する。表-1に実験条件の一覧を示す。擁壁の移動モード、壁面傾斜角 α_0 、地盤の密度をパラメータとし、壁面傾斜角 α_0 ごとに地盤高 H が3mになるよう遠心加速度を組み合わせる。

3. 深度別土圧と壁面変位

図-5に深度別に土圧 p と、地盤高 H で無次元化した壁面変位 d/H の関係を壁面傾斜角 α_0 ごとにゆる詰め地盤の例を示す。測定深度は原型換算値 z (m)で示している。土圧は静止状態のピークを出発点として緩やかに減少する。下端ヒンジ条件で、深部の土圧が周期的に揺れる。隣り合う深度で振動の位相がずれており、進行性破壊現象が伝播していくことを示している。平行移動条件では、このような現象は見られない。両移動モードともに傾斜角 α_0 が小さくなると土圧は減少するが、深部への土圧集中が見られる。

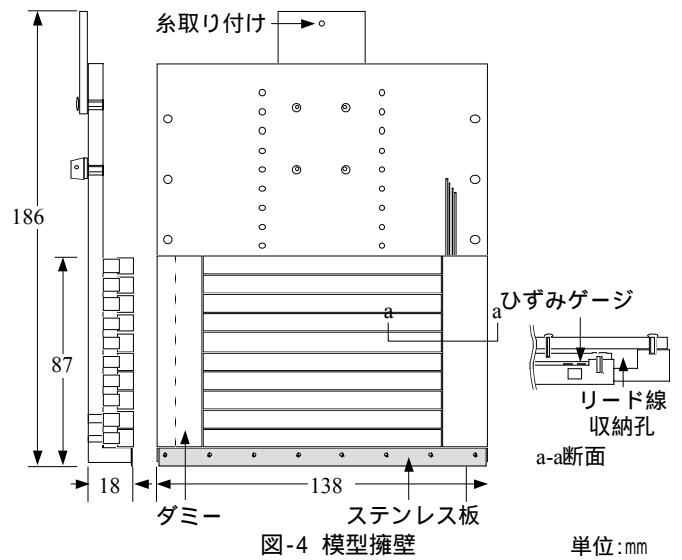


表-1 実験条件

擁壁の移動モード	壁面傾斜角と遠心加速度 α_0 (°)-n(G)	地盤密度	原型換算地盤高 H (m)
下端ヒンジ	90-34	ゆる	3
	73-36		
平行移動	63-40	密	3
	45-49		

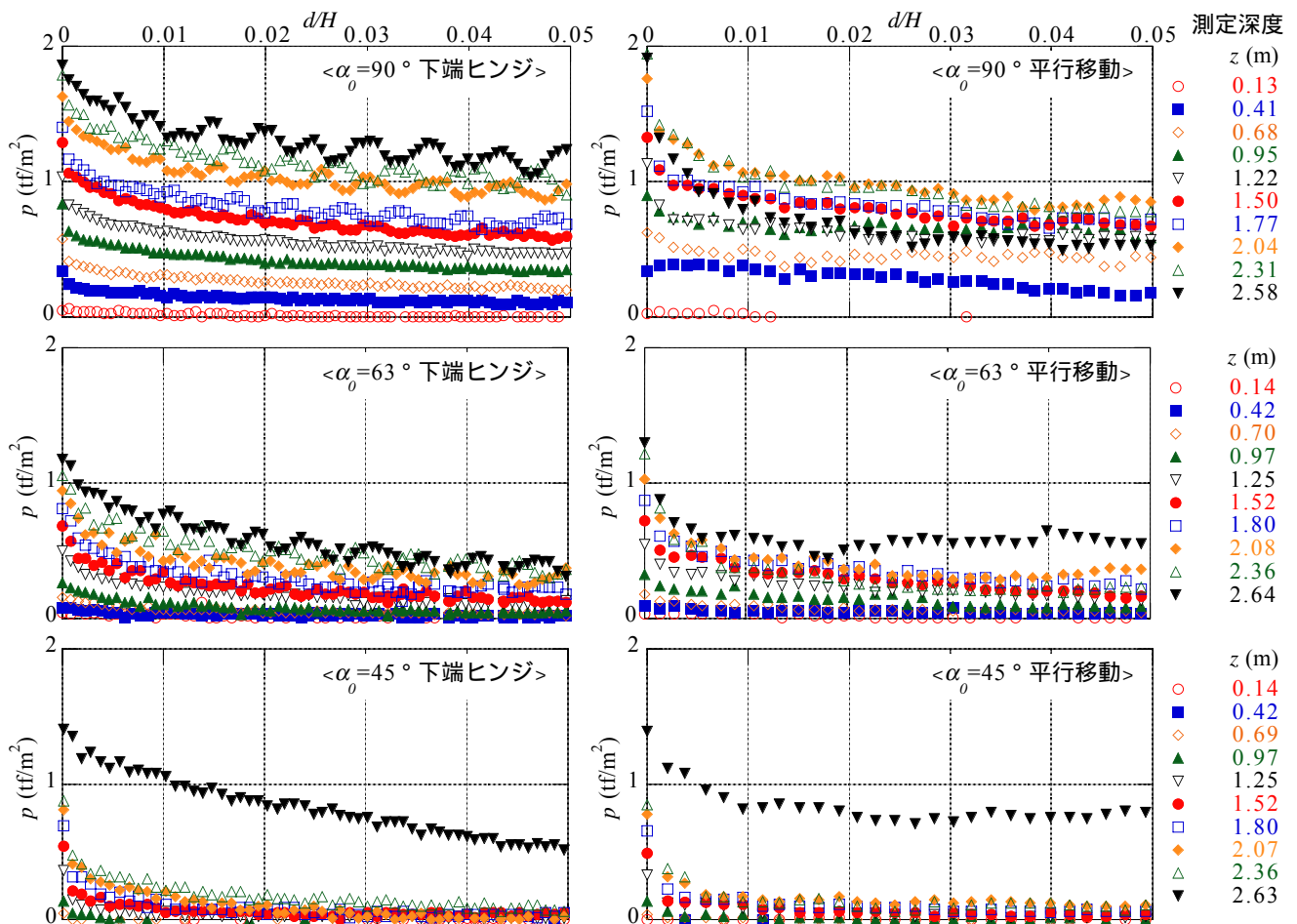


図-5 深度別土圧 変位関係 (ゆる詰め地盤)

4. 理論値

実験値と比較する理論値は、静止状態では壁面鉛直を仮定するヤークーの静止土圧式、主動状態ではクーロンの主動土圧式で算出する。クーロン土圧の概念図を図-6に示す。ヤークー土圧 p_0 、クーロン土圧 p_A 、クーロン土圧を壁面全体で積分したクーロン全土圧 P_A の算出式を以下に示す。クーロン土圧式は、『大型ブロック積み擁壁設計・施工マニュアル』に掲載された近似式である。

$$p_0 = \gamma \cdot z \cdot (1 - \sin\phi)$$

$$p_A = \gamma \cdot z \cdot K_A$$

$$K_A = \frac{\cos^2(\phi + \alpha)}{\cos^3 \alpha \cdot \left\{ 1 + \frac{\sin\phi}{\cos\alpha} \right\}^2}$$

$$P_A = \frac{1}{2} \gamma \cdot H^2 K_A$$

ϕ : せん断抵抗角度、 γ : 裏込め土の単位体積重量(tf/m^3)、
 α : 壁面が鉛直面となす角度、 z : 地盤面からの深度(m)

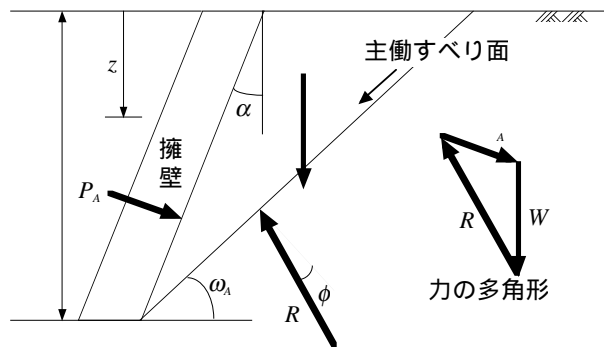


図-6 クーロン土圧概念図

5. 土圧の深度分布

図-7に壁面変位ごとの土圧の深度分布をゆる詰め地盤の例で示す。比較として静止土圧をヤークー土圧式、主動土圧をクーロン土圧式で算出して実線で示す。「静止状態」は擁壁が移動する前の状態であるため、移動モードによらない。2つの模型ごとに土圧分布はほぼ同じで、模型実験の再現性を示している。壁面傾斜角 $\alpha_0=90^\circ$ 条件で、静止土圧はヤークー式算出土圧よりも大きくなる。壁面傾斜角 α_0 が小さくなると土圧は小さくなる。「微小変位 ($d/H=0.001$)」レベルでは、壁面傾斜角 $\alpha_0=90^\circ$ 、平行移動条件の場合に最深部の土圧が急激に減少し、分布は弓形形態をとる。これは、地盤下部がゆるみ、アーチ効果によって地盤が原形を維持しようとしていることを示している。他の条件では移動モードによる土圧分布形状に大きな違いは現れない。「小変位 ($d/H=0.01$)」レベルでは、壁面傾斜角 $\alpha_0=73^\circ$ 、 63° の平行移動条件で深部への土圧集中が見られる。下端ヒンジ条件で、壁面傾斜角 α_0 が大きいと直線的な土圧分布を示すが、壁面傾斜角 α_0 が小さくなると深部への土圧集中が顕著に現れる。土圧分布は壁面傾斜角 $\alpha_0=90^\circ$ 条件を除いてクーロン式算出土圧に近い。最深部を除き平行移動の方が土圧は大きい。「大变位 ($d/H=0.05$)」レベルは主動土圧と考えられる。壁面傾斜角 $\alpha_0=90^\circ$ を除く平行移動条件で最深部付近への土圧集中がより顕著になり、最深部付近で地盤の大きな変形が生じたと考えられる。

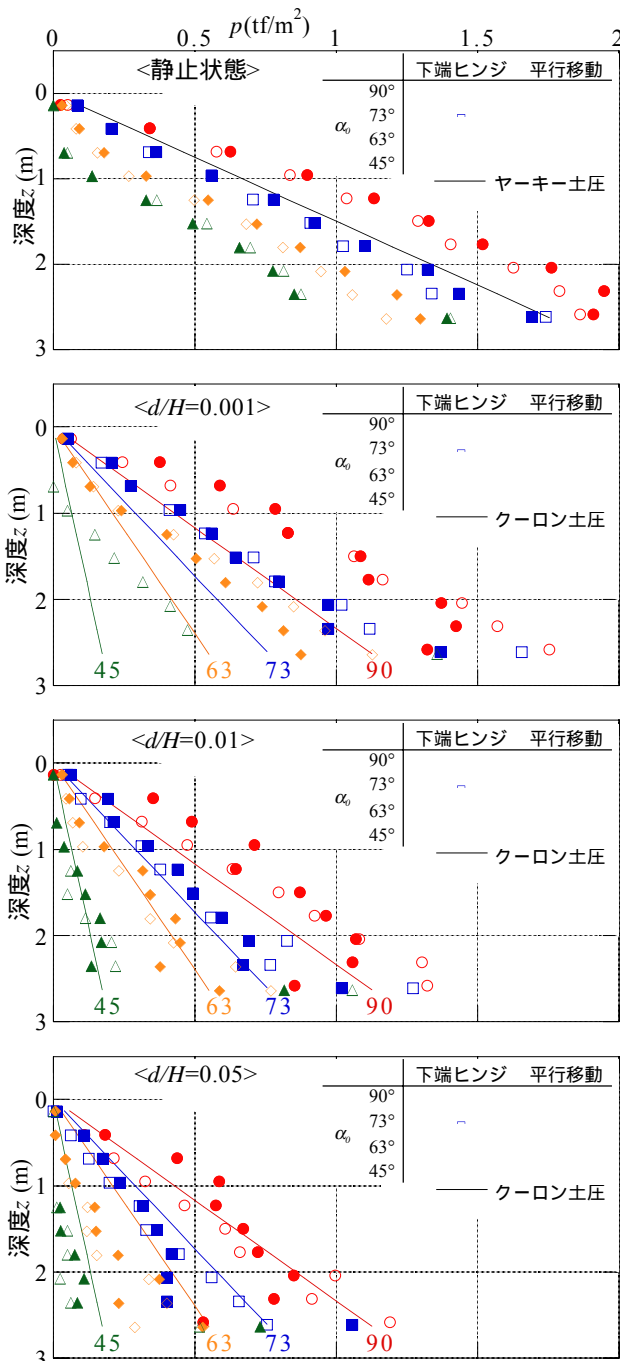


図-7 土圧分布 (ゆる詰め地盤)

6. 全土圧

図-8 に全土圧 P と壁面変位 d/H の関係を地盤条件ごとに示す。全土圧は深度別土圧に各土圧計の原型換算高さを乗じ、足し合わせて算出する。比較としてクーロン式で算出した全土圧を実線と矢印で示す。全土圧も深度ごとの土圧と同様に静止土圧状態から緩やかに減少し、クーロン全土圧よりもやや低い値で落ち着く。全土圧は壁面傾斜角順に規則正しく整列し、ゆる詰め地盤では移動モードによる差はほとんど見られない。密詰め地盤でも、 $d/H=0.01$ 付近まで移動モードによる差は見られないが、 $d/H=0.01$ 以後、下端ヒンジ条件ではゆるやかに減少し続けるが、平行移動条件ではピークを示して全土圧は増加する。これは応力 - 変位関係にピークを有する密詰め地盤が、平行移動に伴う大変位ですべり破壊するためと考えられる。

7. 地盤の変形

写真-1 に壁面傾斜角 $\alpha_0=73^\circ$ 、壁面変位 $d/H=0.05$ 時点での地盤の変形を示す。移動モードによらず密詰め地盤で変形領域が狭い。下端ヒンジ条件では、変型は

連続的に生じる。これは、擁壁の移動に伴う壁面と地盤間の隙間が地盤浅部から生じ、表層から深部へ伝播する進行性破壊を示している。平行移動条件では、明確な不連続面（すべり面）を生じる。これは、擁壁の変位に伴う壁面と地盤間の隙間は地盤深部においても浅部と平行に生ずるため、変型破壊領域が大きくなるためすべり破壊を起こしたと考えられる。

8. 結論

地盤の破壊形態は、下端をヒンジとした回転移動で表層から深部へ伝播する進行性破壊、傾斜を維持する平行移動で明確なすべり面を生じるすべり破壊となる。土圧分布の形状も移動モードにより異なるが、全土圧にはあまり違いはない。平行移動の移動モードは、実地盤での破壊形態に近いと考えられる。三角形分布を仮定した理論分布は条件によっては近似解となる。

参考文献 大型ブロック積み擁壁設計・施工マニュアル(改訂版): 社団法人土木学会四国支部耐震性大型ブロック積み擁壁に関する研究委員会

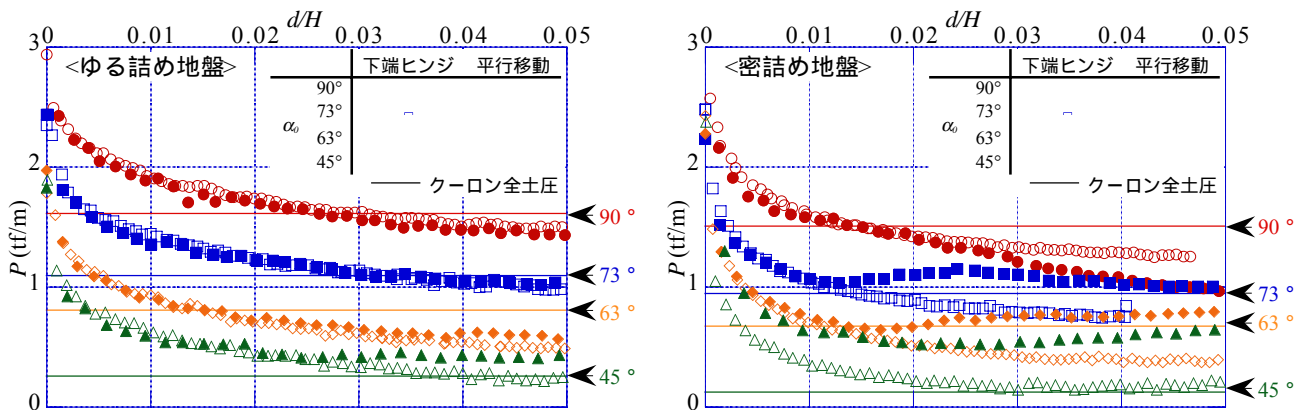
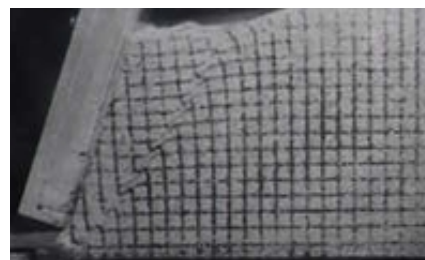


図-8 全土圧 変位関係



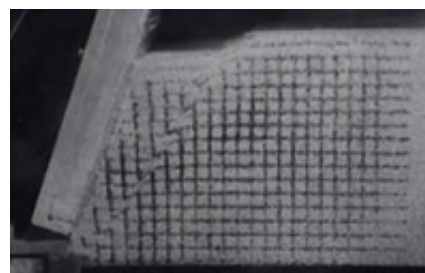
<ゆる詰め地盤、下端ヒンジ>



<ゆる詰め地盤、平行移動>



<密詰め地盤、下端ヒンジ>



<密詰め地盤、平行移動>

写真-1 地盤の変形 (壁面傾斜角 $\alpha_0=73^\circ$)