

(12) DEM解析によるトンネル支保特性曲線 と地盤挙動の考察

鳥取大学工学部 正員 木山 英郎 藤村 尚
西村 強 池添 保雄

DEM ANALYSIS OF PARTICLE BEHAVIORS AND THE FENNER-PACHER CURVES

by

Hideo KIYAMA, Hisashi FUJIMURA, Tsuyoshi NISHIMURA and Yasuo IKEZOE
(Faculty of Engineering, Tottori University)

Abstract

DEM analysis of a new model of tunneling was performed in order to investigate the behavior of ground adjacent to the tunnel. From the results, it has already reported that there are three typical characteristic curves of the vertical bearing load P and deformation U_D .

In this paper, the relations between the horizontal bearing load Q and deformation U_D are added and the feature of the characteristic curves are summarized. Then the particle behaviors and the distribution of contact forces between particles around the tunnel are discussed in connection with these curves.

1. はじめに

図-1に示すように、地盤を円形要素の集合体と考え、一定の鉛直応力 p_v と水平応力 p_h の作用のもとで、トンネル掘削をトンネル要素の重量と剛性の減少で表すことによって、 P_{min} を有するFenner-Pacher型をはじめとして種々の支保特性曲線が得られることをさきに報告した¹⁾。それらは、図-2～図-5の各上段に示すように、鉛直方向の支保圧 P と内径収縮量 U_D の関係を中心に論じたものである。

本報では、さらに水平方向の支保圧 Q と U_D の関係を示すことによって、支保特性曲線の特徴をまとめる。ついで、それらの支保特性が、トンネル周辺要素の接触力伝達機構とどのように関連するかを考察する。

2. 模型地盤の特徴と $P-U_D$ 関係のまとめ

(1) 粒子配列の相違(3配列で、17/18, 13/14, 11/12と略記する)によるトンネル掘削前の初期地盤の安定性は以下のである。

図-2の $P-U_D$ 関係を示す17/18配列は、鉛直力の伝達が卓越し、側圧係数(p_h/p_v)が0.31以上で安定な初期地盤であり、これを側圧係数0.5に設定している。

図-3、図-4の13/14配列は、鉛直力と水平力の伝達が相半ばし、側圧係数が0.81以上で安定な初期地盤である。これに対し側圧係数0.8と1.0の2水準を供している。

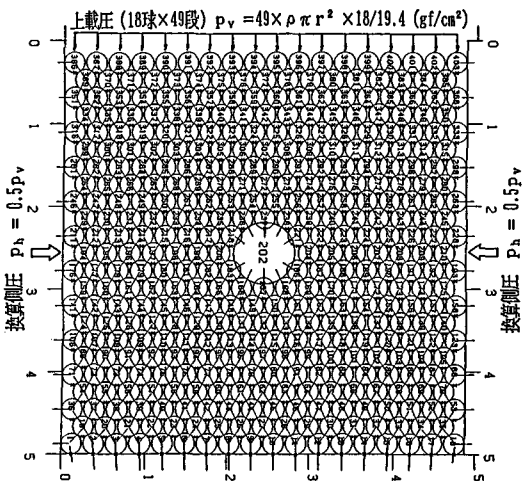


図-1 解析モデル
(17/18配列, $p_h/p_v=0.5$, step 0)

図-5の11/12配列は水平力の伝達が卓越し、側圧係数が1.51以上必要な不安定な初期地盤のモデルである。側圧係数1.50の場合と側方流動を拘束した場合(図中FIXで示す)とを検討している。

(2) トンネル掘削に伴う $P-U_D$ 関係が示す支保特性曲線の特徴をまとめると以下のようである。

図-2の $P-U_D$ 曲線のように、大変形区間(step 3以降)においても、内径収縮量の増加とともに支保圧が単調に減少する、安定な支保特性曲線が存在する。

図-3の $P-U_D$ 曲線のように P_{min} を示した後に支保圧の急増を示すやや不安定な場合と、図-4の $P-U_D$ 曲線のように、 P_{min} を示した後に大変形区間において安定した支保圧の漸増を示す場合とがFenner-Pacher型支保特性曲線とよべよう。これら両者の差が、側圧係数の僅かの差によるものであることに注意する必要がある。

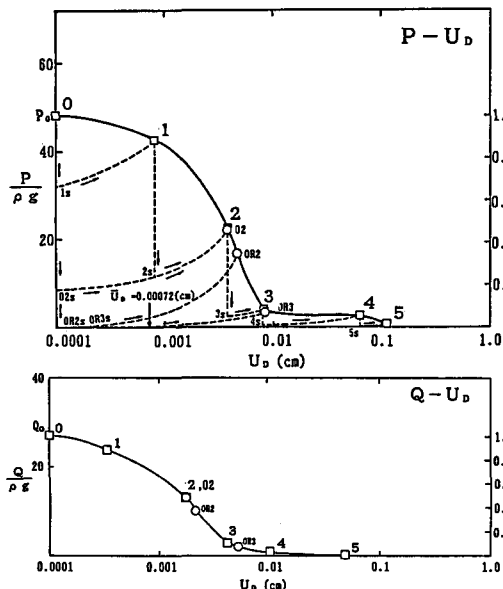


図-2 17/18配列 ($p_h/p_v=0.5$)

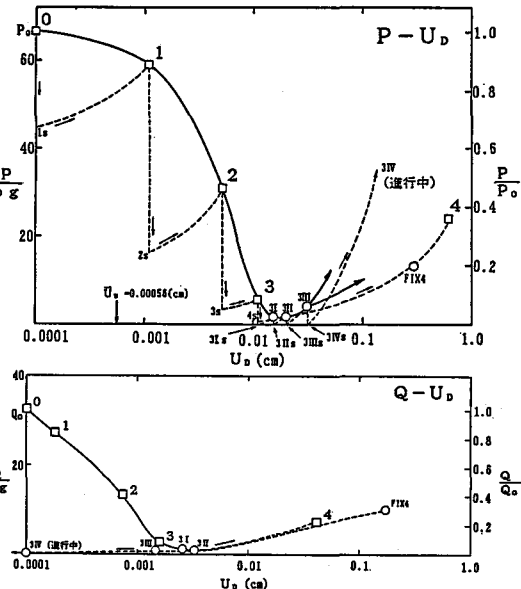


図-3 13/14配列 ($p_h/p_v=0.8$)

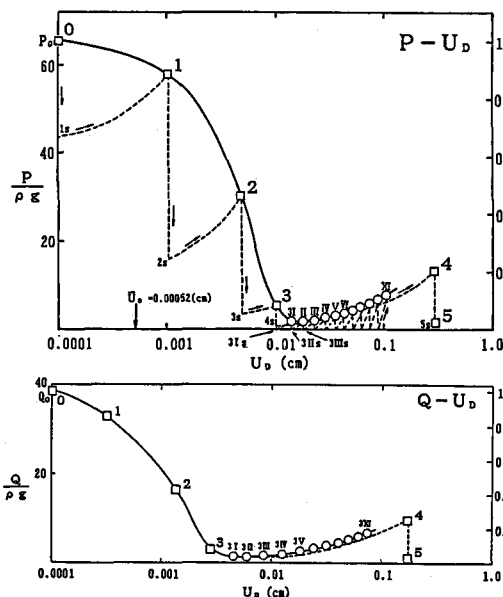


図-4 13/14配列 ($p_h/p_v=1.0$)

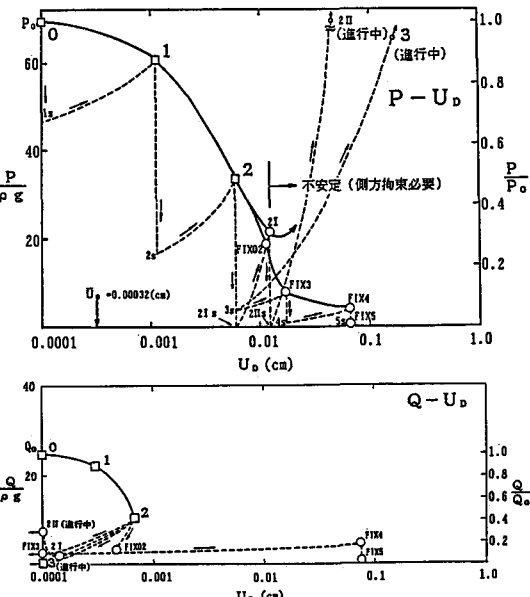


図-5 11/12配列 ($p_h/p_v=1.5$)

図-5の $P-U_0$ 曲線のように、ほとんど除荷過程もないまま（通常の線形区間の途中で）急激な支保圧の増加を示す、極めて不安定な特性曲線も存在する。これは当該地盤の有する強い側方流動性向による。

3. $Q-U_0$ 関係の考察

水平方向の支保圧 Q と U_0 の関係を、 $P-U_0$ 関係に対比して図-2～図-5の各下段に示す。 $P-U_0$ 関係が安定している地盤は、 $Q-U_0$ 関係もまた安定している（図-2、図-4）。一方、 $P-U_0$ 関係がやや不安定を示した図-3や、極めて不安定な図-5においては、 $Q-U_0$ 関係はその一意性を失うと同時に不安定域への進行を内径伸張（ $\Delta U < 0$ ）の形でより一層明白に示すことになる。

すなわち、トンネル地盤の支保特性の定量的検討のためには連続性のある鉛直方向の $P-U_0$ 関係を用いるのが良いが、地盤の不安定化の点検には水平方向の $Q-U_0$ 関係の併用が望ましいといえる。

4. 要素間接触力の伝達模様

4.1 用語の説明

地盤を剛性要素の集合体とみなすDEM解析においては、地盤内の応力分布の特徴は、要素間の接触力の伝達状況によって考察することになる。図-6をもとに、必要な用語を定義しておく。

せん断帯：トンネル要素を中心に、ほぼその直径を帯幅として、X字型に斜交する領域（配列によって傾斜角が異なる）をいう。この領域のせん断変形によって、トンネル周辺の接触力の伝達模様に変化し、脱力要素とアーチ作用の生成、発展、消滅が生じる。

脱力要素、脱力域：トンネル剛性の減少とともに、せん断帯内のトンネル近傍要素から順に、壁面に平行な方向

（せん断帯を横切る方向）の接触力が増加し、一方、トンネルに流れ込む方向（せん断帯に沿う方向）の接触力が減少する。このような状態の要素を脱力要素、その集合域を脱力域とよぶ。通常、脱力域の拡大は、せん断帯を横切る方向の力の伝達の直線性を強め、アーチの成長に対応し、支保圧の減少を生む。脱力域の進展は下盤側より上盤側が大きい。

アーチ作用：トンネル周辺要素の接触力の伝達形状によって定義する。トンネル掘削に伴う地盤全体の力の流れに関与し、大きな地圧支持力を発揮するグランドアーチと、トンネル壁面要素の自重による崩落等を支えるだけのルーフアーチとに大別できる。この中、主として、前者が、トンネル周辺地盤が本来有している支持力として機能し、支保工等に作用する支保圧の増減に深く関係する。

4.2 安定な地盤（17/18配列、 $p_h/p_v=0.5$ ）

図-1に示したように、初期地盤（step 0）において、接触力が法線成分からなり、地盤内を直線的に伝達されている。

掘削の進行に伴う線形区間（step 1～3）において、図-7aに示すように、せん断帯内の要素の変位はわずかで、脱力域は比較的成長し、その域における力の伝達の直線性（アーチ肩部にあたる）をよく保っている。

step 3以降の大変形区間においても、例えば、図-7bに示すように、脱力域の成長と力の伝達の直線性の回復および直線的グランドアーチの発達が見られる。

以上のように、この地盤は線形～大変形区間を通じて安定した接触力の伝達機構により、支保圧の単調減少（図-2）を示すことになる。

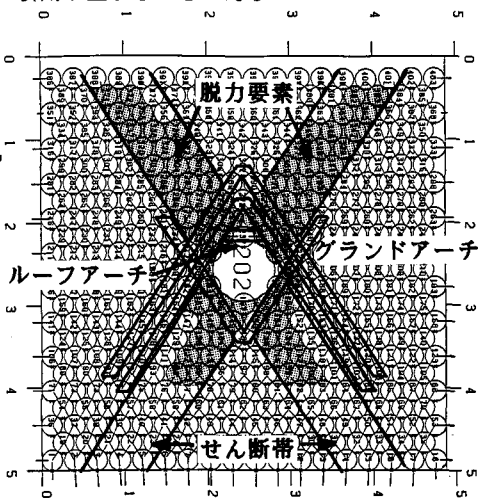


図-6 用語説明図

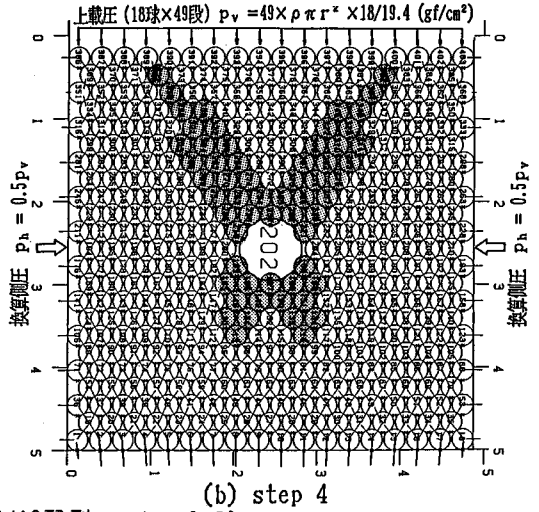
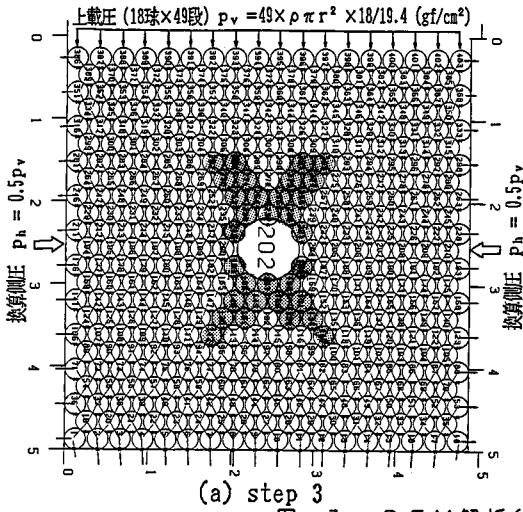


図-7 DEM解析 (17/18配列, $p_h/p_v=0.5$)

4.3 やや不安定な地盤 (13/14配列, $p_h/p_v=0.8, 1.0$)

(1) $p_h/p_v=0.8$ のとき: 図-8aに示すように、線形区間のstep 3において、せん断帯内のトンネル近傍要素のすべり変位により、この部分 (アーチ肩部) の力の伝達の直線性が乱れ、脱力域の成長も上述の安定な地盤に比べると小さい。

図-8bに示すように、step 3IIにおいて、脱力域は成長し、トンネル近傍の力の伝達の直線性は回復され、上部直線-下部曲線型のグランドアーチを形成する。このとき支保圧は、 P_{min} を呈す。

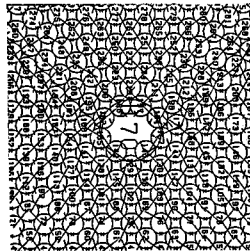
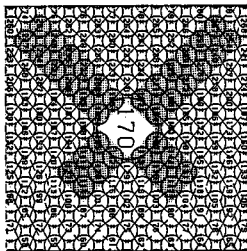
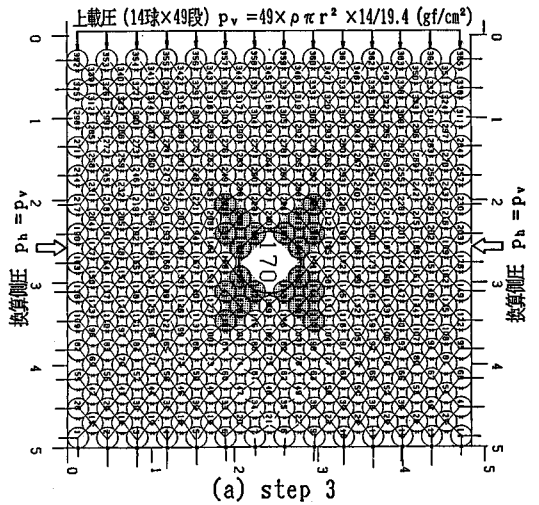
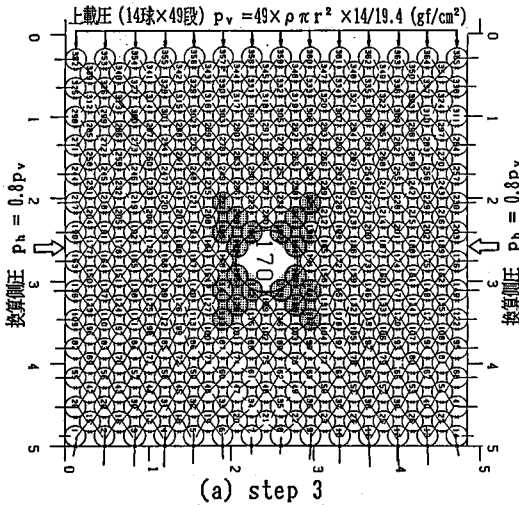


図-8 DEM解析 (13/14配列, $p_h/p_v=0.8$)

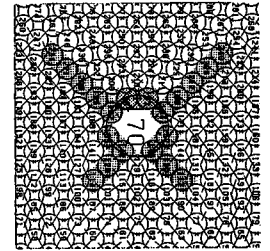
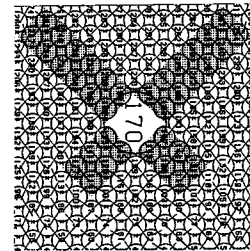


図-9 DEM解析 (13/14配列, $p_h/p_v=1.0$)

その後、step 4への大変形区間において、図-8cに示すように、せん断帯内の要素は大きくすべり、この部分の力の伝達方向は大いに乱れ、トンネル近傍の脱力域は消失する（トンネル向きの力の伝達が行われる）。このため上述のグラウンドアーチは消滅し、これがstep 4における支保圧の急増加（図-3）を招いている。

なお、この地盤は大変形区間において、側圧不足から地盤要素は全体的に側方へ押し出されていること（側方流動とよぶ）によって、不安定化しているため、解析において側方剛板を固定することによって、上記力の伝達の乱れは相当量抑制され、支保圧の増加も抑えられることは図-3のFIX4が示すとおりである。

(2) $p_h/p_v=1.0$ のとき：側圧 p_h を $0.8p_v$ から $1.0p_v$ に増加させることによって、線形区間のstep 3（図-9a）、 P_{min} を示すstep 3II（図-9b）までの様子は上記とほぼ同じであるが、それ以降の大変形区間において両者の差は顕著となる。すなわち、step 3III、3IV、……、3XIにおいても、直線-曲線型のグラウンドアーチは安定している。

step 4（図-9c）において、せん断帯にすべりが生じ、脱力域が減少し、その域（アーチ肩部）の力の伝達の直線性が乱れ、全体に曲線型やや不完全なグラウンドアーチに移行する。ここにおいて、内空変位と支保圧の相当量の増加（図-4）を見ることになる。

4. 4 不安定な地盤（11/12配列、 $p_h/p_v=1.5$ ）

線形区間のstep 2（図-10a）において、せん断帯にわずかにすべりが生じ、脱力域は小さく、その域（アーチ肩部）の力の伝達の直線性が乱れている。

続く、step 2I（図-10b）において、脱力域は伸展し、トンネル近傍の力の伝達の直線性は回復され、不完全ながら、直線-曲線型のグラウンドアーチが形成される。

しかし、その後のstep 2IIあるいはstep 3では、せん断帯のすべり変形が続き、力の伝達の直線性は乱れ、脱力域の消失とこの部分からアーチの崩壊が生じ、もはや地盤の支持力は期待できなくなる。そのため、図-5に見たように、支保圧の急増が起こるわけであるが、こうした地盤の不安定は先にふれたように、この配列に対し、側圧 $p_h=1.5p_v$ が小さすぎるのであって、これを抑制するためには、側方剛板を固定する必要がある。

FIX3（図-10c）がその例であるが、せん断帯のすべりは抑制され、脱力域は大きく成長し、せん断帯を横切る力の直線性が回復し、明瞭な直線-曲線型のグラウンドアーチを形成する。このとき支保圧が減少するのは図-5にみるとおりである。

5. 結語

DEM解析における粒子配列と側圧係数の組合せによって生じる支保特性曲線の多様性を、せん断帯におけるすべり変形と脱力域の増減、せん断帯を横切る接触力の伝達の直線性の有無を観察因子として、グラウンドアーチの生成、発達、消滅と関連して理解できることを明らかにした。

参考文献

- 1) 木山、藤村、西村：DEM解析によるFenner-Pacher型支保特性曲線の実現とその考察、土木学会論文集、第394号/Ⅲ-9, pp.37-44, 1988.

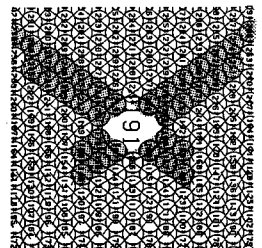
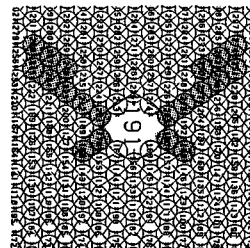
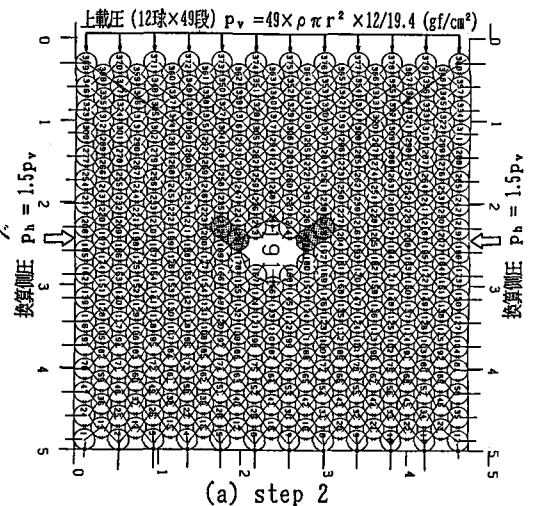


図-10 DEM解析(11/12配列、 $p_h/p_v=1.5$)