

未固結含水地山トンネルにおける地盤変状予測に関する研究
THE RESEARCH OF THE SURFACE SETTLEMENT BY THE EXCAVATION THROUGH
THE UNHARDENING-WATERCONTENT-BEDROCK

角湯克典*・猪熊 明*・山村浩介**

Katsunori KADOYU, Akira INOKUMA and Kousuke YAMAMURA

It is well known that the analyzed area has an influence on the result of analysis when we use F.E.M. to simulate the tunnel excavation. In this study, we analyzed how the surface settlement varied depending on the change of the analyzed area, and we proposed the optimum analyzed area for F.E.M. analysis. We also did some trial calculations to examine the influence of the modulus of elasticity of the ground on the simulation of the surface settlement.

Keywords:tunnel excavation, analyzed area , F.E.M., surface settlement

1. まえがき

わが国における土地利用を考えたとき、人口・諸機能が著しく集中した大都市圏においては、地下空間の利用は、国際化、情報化、高齢化がさらに進展すると思われる今後、ますます重要かつ緊急な課題であると考えられる。しかしながら、既に過密化した都市内においては、新たに地下構造物を建設する際、既存の地上構造物への影響を最小限にする必要がある。そのため事前設計の段階でトンネルを掘削した際の地表面変位を予測することはたいへん重要である。本研究は、未固結含水地山に山岳工法（NATM工法）でトンネルを掘削した際の地表面変位の予測解析結果が、解析断面の境界領域の大きさと、変形係数によりどの様に影響を受けるかを検討するものである。

2. 解析にもちいる解放率

解析は2次元平面歪条件で弾性線形モデルを用いて有限要素解析を行った。解析手順としてはトンネル要素を含めた自重計算を行い初期応力を求め、求めた初期応力とトンネル要素の自重から掘削外力を作用させ、トンネル掘削による地表面変位を求めた。このとき掘削外力としては、初期応力 $=\sigma$ 。に解放率 $=R$ を乗じ

* 正会員 建設省土木研究所 トンネル研究室

** 建設省土木研究所 部外研究員 東洋建設（株）

たものを掘削外力として作用させる。

図-1¹⁾は成田層での土被りの浅い都市NATMトンネル工事における上半切羽の進行にともなう地表面沈下の例を示したものである。この図によれば、切羽では最終地表面沈下量の30%、切羽より0.2D後方付近(D:トンネル直径)では最終地表面沈下量

の50%が発生している。本研究はトンネル掘削にともなう地表面変位を解析対象としているため、解放率としては最終地表面沈下量に対する切羽付近の地表面沈下量の比をとることとする。また今回対象とする未固結含水地山は、成田層と同様に洪積砂層としての特性を持つものと考えられる。よって以下の議論では、解析に用いる解放率Rは50%とする。

3. 境界条件と地表面変位の関係

有限要素解析によりトンネル掘削による地表面変位解析を行う場合、解析対象となる境界領域の大きさにより解析結果が異なるということが一般に知られている。本研究では、解析領域の違いによりどのように解析結果が変化するかを考察する。解析は図-2に示すように、

- ①土被り (1D、3D、6D D:トンネル直径16m)
- ②トンネルインバートから下端境界までの距離 (1D~10D)
- ③トンネル中心から側端境界までの距離 (1H~4H H:トンネル中心から地表面までの距離)

をパラメーターとした計30ケースの解析を行った。地盤は均質で以下の物性を設定した。

変形係数 $E = 500 \text{ kg/cm}^2$

ポアソン比 $\nu = 0.3$

単位体積重量 $\gamma = 1.8 \text{ tf/m}^3$

また応力解放率は全ケース50%とした。

解析結果を表-1に示す。

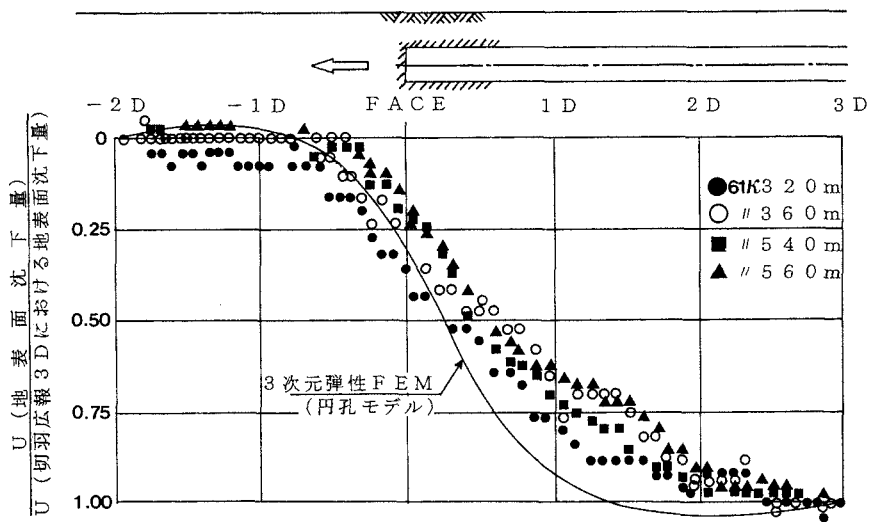


図-1 上半切羽の進行に伴う地表面沈下の例

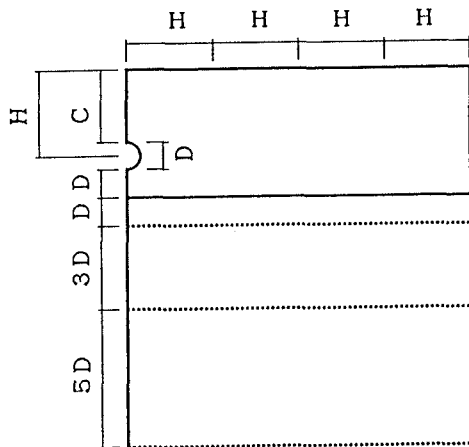


図-2 対象とする解析領域

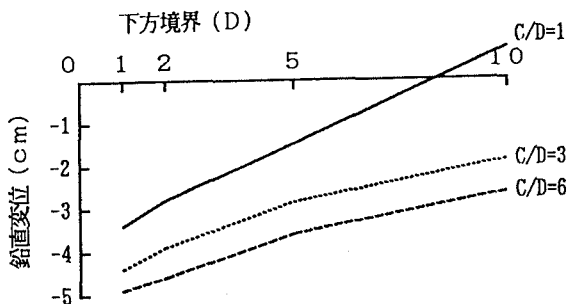


図-3 下方境界の変化に伴う地表面変位量

ここではトンネル直上および側端部の地表面変位のみに注目して解析結果をまとめた。ここで負の符号は沈下を表す。また、図-3には下方境界の違いによる地表面変位量を、図-4には側方境界の違いによる地表面変位量を示す。これらより

①浅いトンネル（土被り1D）においては、5D以上の位置に下方境界を設定すると隆起する結果が生じる。

②側方境界の影響は、下方境界の位置に関わらず、2H程度で収束する。

一方、つぎに実際現場で計測された地盤内変位計測データより、トンネル下方向で影響の及ぶ範囲について考察する。通常、トンネル掘削にともなう地表面変位を解析する有限要素解析において、下方境界は境界条件としては不動点として取り扱う。そこで本研究では、実測値を基に不動点の位置を明らかにし、下方境界を設定する方法を採用した。図-5に示すようにトンネルスプリングラインより側方1D以内（ $\angle H \leq D$ ）の地盤内変位計測データの値が0であり、（通常、地中傾斜計では計測最下点は地中変位計測データは0となる）隣接する計測点の相対変位量が0であるとき、地表面に近い側の計測点を不動点として下方境界を定める。（図-5では点B）

表-1. パラメーター解析結果

ケース	土被り	応力解放率	境界条件		鉛直変位 (cm)	
			下方	側方	トンネル直上	側端
1	1 D	50%	1D	2H	-3.330	-0.285
2			2D		-2.796	-0.127
3			5D		-1.443	1.110
4			10D		0.757	3.317
5			2D	1H	-2.870	-1.008
6				2H	-2.796	-0.127
7				3H	-2.736	-0.095
8				4H	-2.716	-0.063
9			5D	1H	-2.175	1.646
10				2H	-1.443	1.110
11				3H	-1.594	0.463
12				4H	-1.556	0.100
13	3 D	50%	1D	2H	-4.411	-0.059
14			2D		-3.930	-0.188
15			5D		-2.859	-0.162
16			10D		-1.824	0.675
17			2D	1H	-4.156	-2.133
18				2H	-3.930	-0.188
19				3H	-3.931	0.010
20				4H	-3.922	-0.010
21			5D	1H	-3.027	-1.102
22				2H	-2.859	-0.162
23				3H	-2.811	-0.102
24				4H	-2.798	-0.058
25	6 D	50%	1D	2H	-4.892	0.031
26			2D		-4.593	-0.020
27			5D		-3.610	-0.238
28			10D		-2.683	-0.144
29			2D	1H	-4.645	-2.320
30				2H	-4.593	-0.020
31				3H	-4.577	0.032
32				4H	-4.570	-0.024
33			5D	1H	-3.874	-2.042
34				2H	-3.610	-0.238
35				3H	-3.612	0.014
36				4H	-3.603	0.002

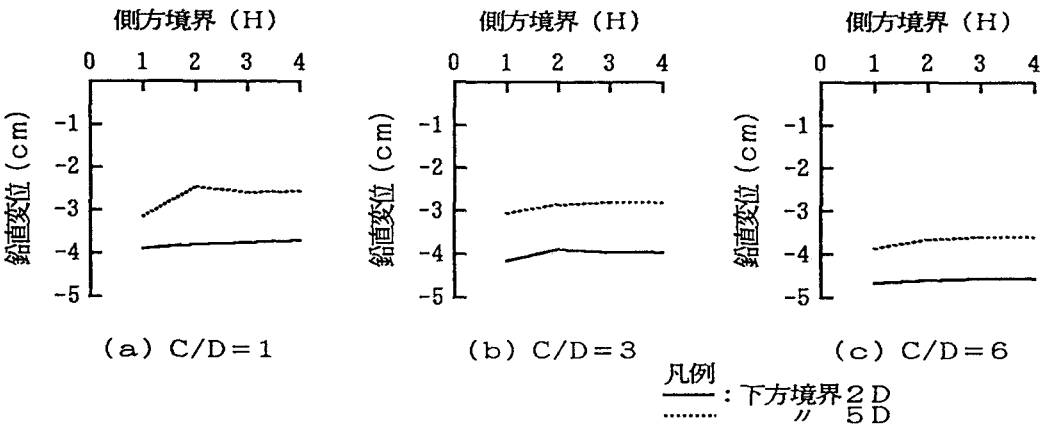


図-4 側方境界の変化に伴う地表面変位量

なおここでの計測データは、過去に計測された実績が多い水平方向の変位の計測値を考える。

日本トンネル技術協会より発行されている「トンネルと地下」の過去十年間 (Vol.12, no.9, 1981～vol.21, no.9, 1990) の発表論文を中心にトンネル周辺地盤の現場計測において不動点がトンネル下方のどのあたりに位置するかについて文献調査を行った。その結果を図-6、図-7に示す。図-6は横軸にトンネル土被り比、縦軸に計測不動点のトンネル下端よりの深さをとったものであり、図-7は横軸にトンネル土被り比、縦軸に計測不動点のトンネル下端よりの深さをトンネル直径(馬蹄形断面の場合ここでいう直径とはトンネル天端よりインバートまでの距離の最大値を言う)で除したものである。

これらより

- ①実測値からの計測不動点はトンネルインバートより 10 m程度より浅いことが多い。
- ②実測値からの計測不動点は、1D程度より浅いところにあることが多い。

以上実測値および解析結果より、不動点の位置を解析領域の下方境界に設定することとすれば、有限要素解析を用いてトンネル掘削による地表面変位を予測する解析においては解析領域としては応力集中等の支障がなければ、下方に1D、側方に2H程度とするのが適当であると考えられる。また特殊な事情がある場合も、むやみに境界領域を大きくするのは不適当だと考えられる。

4. 変形係数と地表面変位の関係に関する試算

地盤の変形係数は有効拘束圧により変化することが一般に知られている。そこで本研究では地盤の変形係数に深度

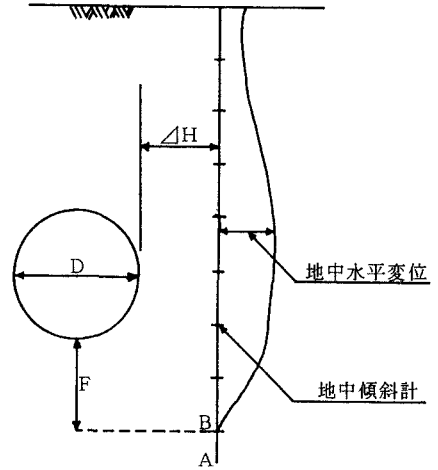


図-5 地中変位計測データのモデル図

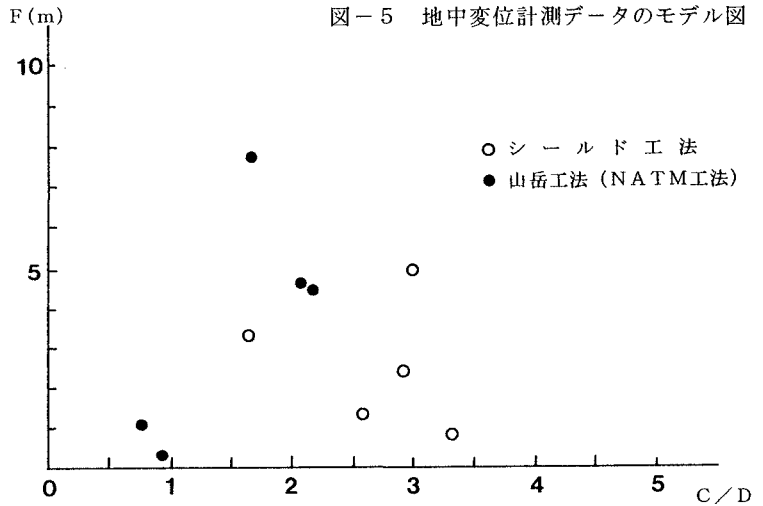


図-6 計測不動点と土被り比の関係

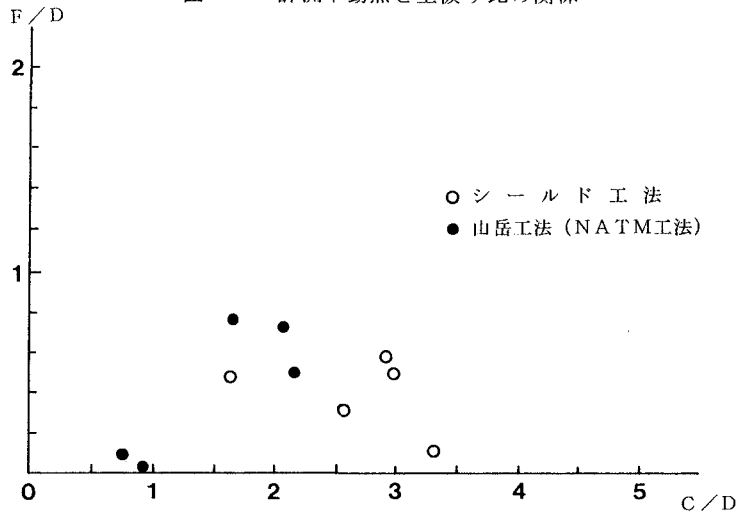


図-7 計測不動点深さをトンネル直径で除したものと土被り比の関係

表－2 N値の深度分布モデル式

ケース	GL-100m でのN値	N値分布	変形係数分布 ($E=7N$)
1	71.4 ($E=500 \text{ kgf/cm}^2$)	$=0.714 \cdot h$	$=5.00 \cdot h \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$
2		$=0.614 \cdot h + 10$	$=4.30 \cdot h + 70 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$
3		$=0.514 \cdot h + 20$	$=3.60 \cdot h + 140 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$
4		$=0.414 \cdot h + 30$	$=2.90 \cdot h + 210 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$
5		$=0.314 \cdot h + 40$	$=2.20 \cdot h + 280 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$
6		$=71.4$	$=500 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$
7	50.0 ($E=350 \text{ kgf/cm}^2$)	$=0.500 \cdot h$	$=3.50 \cdot h \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$
8		$=0.400 \cdot h + 10$	$=2.80 \cdot h + 70 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$
9		$=0.300 \cdot h + 20$	$=2.10 \cdot h + 140 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$
10		$=0.200 \cdot h + 30$	$=1.40 \cdot h + 210 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$
11		$=0.100 \cdot h + 40$	$=0.70 \cdot h + 280 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$
12		$=50.0$	$=350 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$

依存性をもたせ地表面変位の解析を行った。解析断面は以下のように設定した。

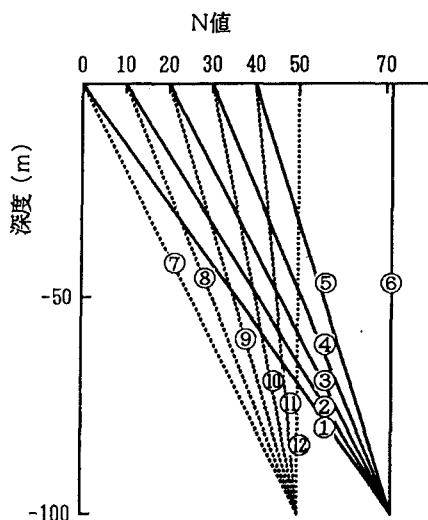
- ①土被り(1D、3D、6D)
 - ②下方境界(トンネルインバートより2D離れ)
 - ③側方境界(トンネル中心より2H離れ)
- とした。

変形係数は表－2および図－8に示すような深度分布とした。またその他の地盤の物性および応力解放率は3. で用いたものと同じものを用いた。解析によって得られた地表面最大沈下量と土被り比の関係を図－9に示す。土被り比と地表面沈下量の関係は、現場計測においては土被り比が大きくなるとアーチアクションにより地表面沈下量が小さくなるということが知られている。一方今回の試計算では、図－10の斜線部分が土被り比を大きくすれば地表面沈下が小さくなる変形係数の分布範囲に該当した。すなわち1.0m深くなると変形係数が2.8kg/cm²以上増加するように地盤定数を設定した地盤では、土被り比が大きくなると地表面沈下量が小さくなる。

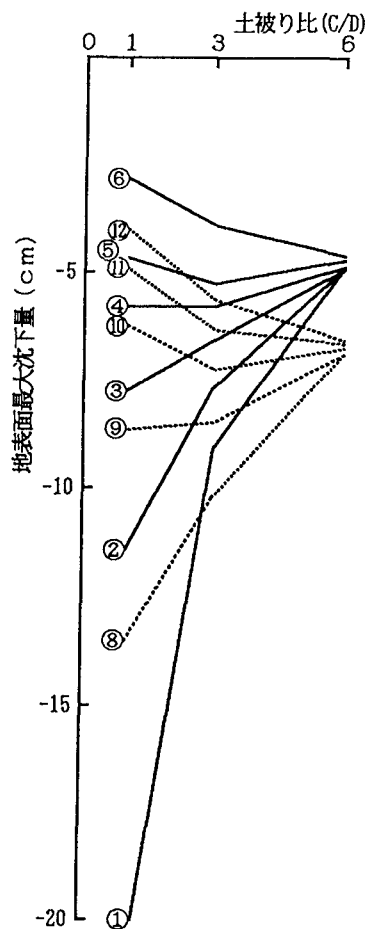
また代々木公園付近での採取資料から得られた変形係数(E_{50})の深度分布を示したものを図－11に示す。これより変形係数の深度方向の勾配は、2.8kg/cm²/m以上あることがわかり、実際の地盤においても変形係数が深度方向に増加するものがあることがわかる。ただし、実際の地山物性は必ずしも深度方向に変形係数が増加するとは限らず、今後さらにこの問題に関しては検討を進める必要がある。

5. 結論

本解析より以下のような結果がえられた。



図－8 N値の分布モデル



図－9 N値の深度分布による地表面変位量の影響

境界条件と地表面変位との関係を解析した結果、解析領域の違いによる解析結果の違いを明らかにすることが出来た。また現場の地中変位実測データより、トンネル下端インバートより1D程度で地中は水平に変位していないことがわかった。その結果、解析領域としては側方境界2H程度、下方境界1D程度を確保するのが適当であると思われた。またむやみに解析領域を大きくすることは現在の手法では好ましくないことがわかった。

6. おわりに

本解析により、地表面変位と解析領域の関係、地表面変位と弾性係数の関係を明らかにすることが出来た。今後は、応力解放率の設定方法と地表面変位の関係を明らかにする図-10 土被り比が大きくなると地表面沈下量とともにこれらを包括したトンネル掘削時の地表面変位の解析手法を提案したいと考えている。最後に本研究は、建設省土木研究所、(財)先端建設技術センター、民間12社(株)大林組、(株)奥村組、川崎重工業(株)、(株)熊谷組、佐藤工業(株)、清水建設(株)、東急建設(株)、同和公営(株)、(株)間組、(株)フジタ、前田建設工業(株)、(株)三井三池製作所)で行っている建設省総合技術開発プロジェクトの研究において得られた成果の一部である。また、本研究を進めるにあたり、(株)フジタの香川和夫氏、波田光敬氏にはいろいろとご協力をいただいた。ここに謝意を表します。

7. 参考文献

1) 横山章：「土被りの薄い未固結地山におけるトンネル掘削時の地山挙動と施工管理方法の研究」、P55、昭和59年5月、学位論文。

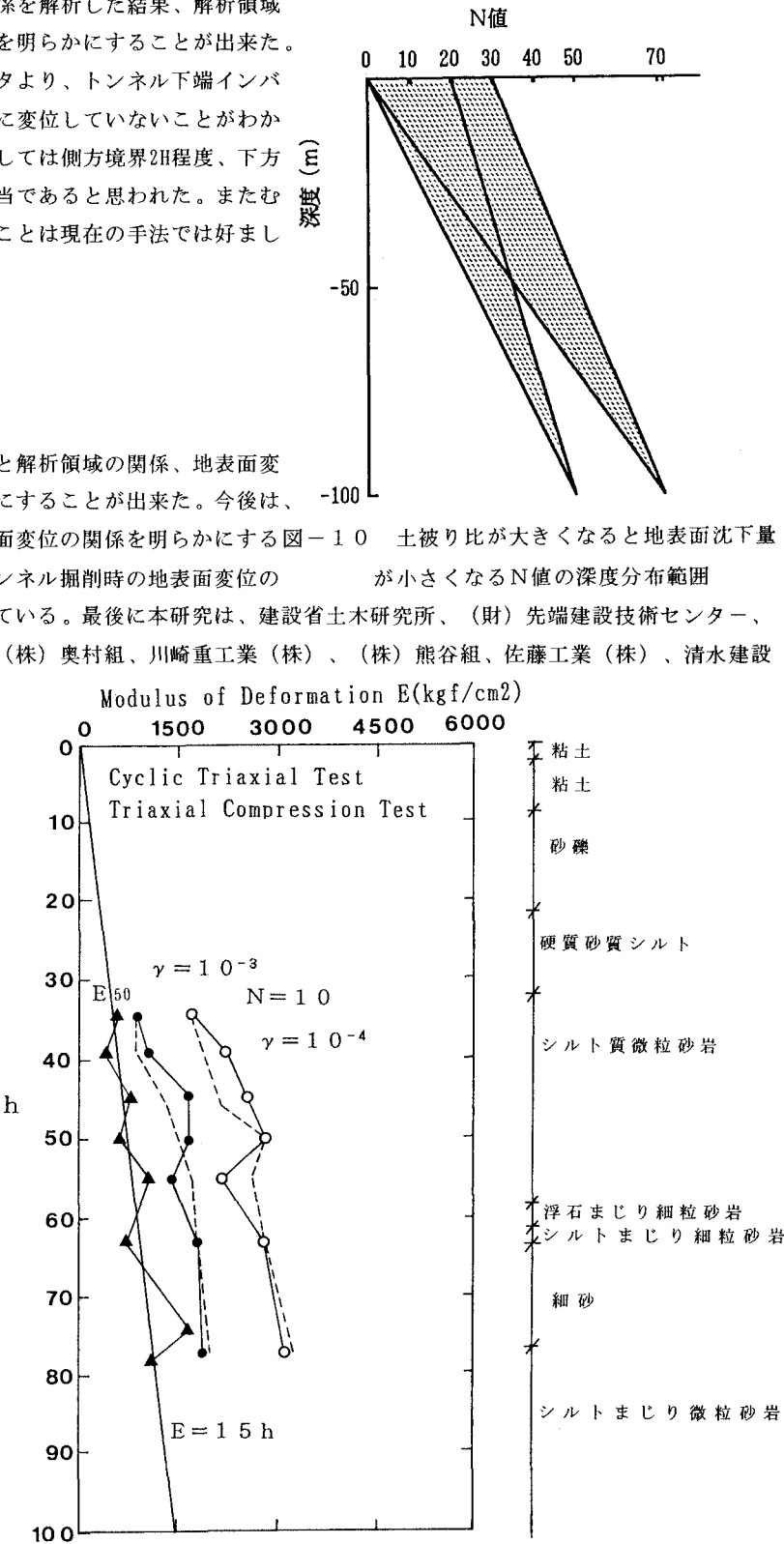


図-11 変形係数の深度分布の例