

埋設管路の軸方向挙動と設計法の提案

地盤工学研究室 佐野 洋平

1. 研究の目的

不同沈下に対する管路の安全性の検討に現行設計基準では弾性床土上の梁理論の使用が推奨されている。しかし、実際の管路の軸方向挙動は、管材料、管周囲の土の性質など数多くの要因が絡む土と構造物の三次元相互作用問題であり、地盤変形に伴う管路の土圧の発現過程が複雑であるため、弾性床土上の梁理論に基づいた現行設計法では実際への適応に限界がある。そこで合理的な安全評価を行うためには、まず埋設管路に働く土圧と変形挙動の実態を明らかにする必要がある。本研究では、地盤材料、土被り高、管剛性を変化させることにより、地盤の不同沈下時の土圧と変形挙動に及ぼす影響を三次元遠心実験により調べ、不同沈下に対する新たな設計法を提案し、現行設計法との比較を行った。

2. 実験方法

2種類の模型管路(図-1)を実験容器(図-2、内寸法で長さ59cm×奥行30cm×高さ20.5cm)に、土被り高4cm、または8cmで表-1に示す6通りの地盤条件で埋め、遠心加速度30g場に置いて、左側の容器底板(長さ10cm)を固定し、右側の底板(長さ49cm)を降下させて地盤に不同沈下を生じさせ、模型管路に働く鉛直・せん断両土圧、内桁の曲げひずみ、管路両端の沈下量を測定した。容器底板と模型管路の距離は5cmである。表-2に実験条件を示す。

3. 実験結果

実験結果は いずれも原型換算で表す。図-3に地盤の沈下量 δ_G と内桁の測定最大曲げひずみ ε_{max} の関係を示す。これはS16_Dのデータで、 ε_{max} の正值が固定地盤側、負値が沈下地盤側のものを表す。 ε_{max} は δ_G の増大につれて増えるが、次第に頭打ちとなる非線形な変化を示し、絶対値は固定地盤側の方が大きい。これらの傾向は後述する提案設計法による予測結果と一致している。

図-4に $\delta_G=36$ cm時点の鉛直土圧 p_c (上側)・ p_c (下側)

内桁の測定曲げひずみ ε 、管変位量 δ_p を示す。 δ_p は管路両端変位量を境界条件として、 ε を積分して求めた。黒塗り、白抜きマークが rigid-pipe(以後 R 管路と呼ぶ)と flexible-pipe(以後 F 管路と呼ぶ)の場合のデータを、また実線と破線が密、ゆる地盤の場合のデータをそれぞれ表す。図から以下のことがわかる。

- (1) 土圧は、左側の固定地盤の p_r とその右側の沈下地盤の p_v に集中が見られ、その度合いは、地盤密度とH/Dが大きいかどうかかなり高いが、管路剛性の違いによる変化傾向は地盤密度によってばらつきが見られあまりはつきりしない。
- (2) 沈下地盤側で p_r がゼロとなる範囲は、R管路の方がF管路よりも広く、これが ε の分布に影響している。
- (3) ε についてはさらに管路剛性の違いによって左端付近で分布形に違いが見られ、またF管路の ε はR管路の ε よりもかなり大きい。H/Dが増大すると ε は増えるが、増加の程度はそれほど大きくない。

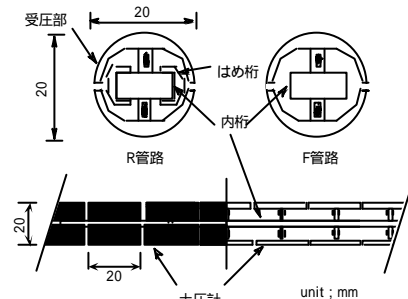


図-1 土圧計 模型管路

表-2 実験条件

土	密度#	管路	H/D
S0	D-L	R	2.4
S0	D	F	2
S16	D-L	R	2.4
S16	D-L	F	2.4
S30	D-L	R	2.4
S30	D	F	2

#D: 密詰め、L: ゆる詰め

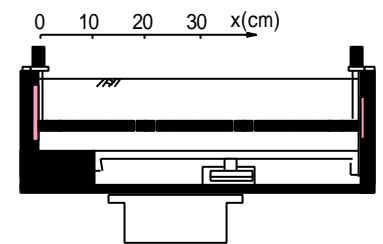


図-2 実験装置

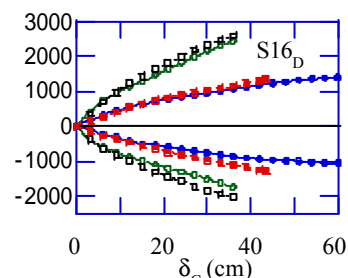


図-3 降下床の降下量 δ_G と最大縁ひずみ ε_{max} の関係

表-1 地盤材料の性質

Soil	G_s	U_c	Γ_{dmax} (g/cm ³)	Γ_{dmin} (g/cm ³)	Γ_d (g/cm ³)	W (%)	C_d (kPa)	ϕ_d
S0 _L	2.65	1.8	1.58	1.32	1.43	0	0	37
S0 _D					1.55			0
S16 _L	2.71	70	1.92	1.37	1.50	10	9	38
S16 _D					1.70			23
S30 _L	2.67	115	1.86	1.18	1.50	12	29	32
S30 _D					1.70			45

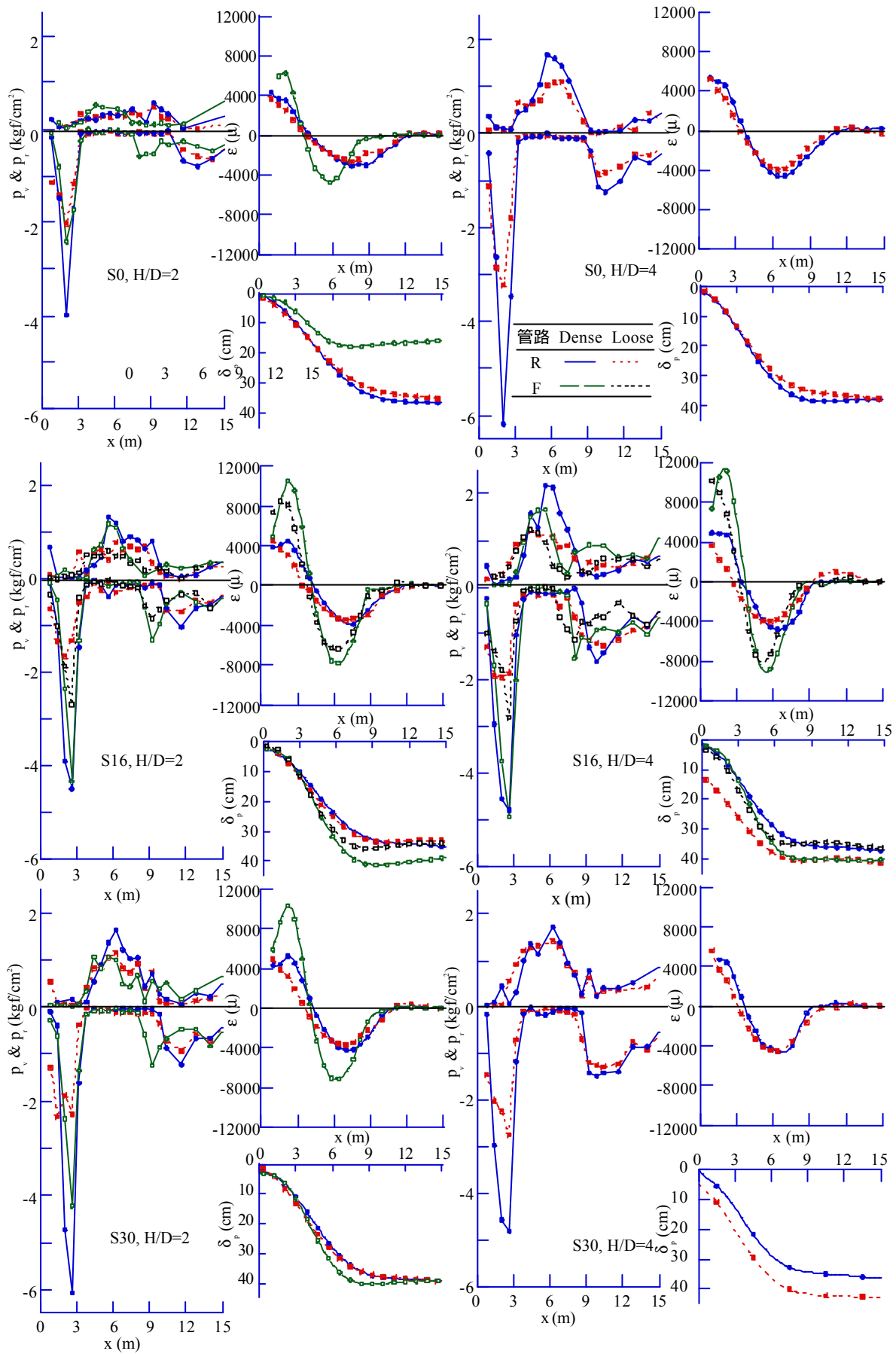


図-4 $\delta_c=36\text{cm}$ 時点の測定結果 (S0, F管路, H/D=2の場合のみ $\delta_c=18\text{cm}$ の時点)

4. 提案設計法

4.1 提案設計法の概要

図-4(a)に提案設計法で用いるモデルを示す。このモデルは、無限に近い長い連続管路を対象とし、地盤の沈下量 $\delta_G >$ 管路の沈下量 δ_p である領域2において $p_v (=P_v/D)$ を領域の中央に最大値 q_{vmax} を持つ放物線形分布で与え、領域1と3の地盤反力 p_r を $(\delta_G - \delta_p) \times kD$ で与える。ここに D :管路の外径(cm)、 P_v :管路の上半分に働く鉛直土圧の総量(kgf/cm)、 k :地盤の反力係数(kgf/cm³)である。領域2の距離 L は、領域1、2の境界から $\delta_p = \delta_G$ になる地点までの距離として収束計算により求める。領域2の最大土圧 p_{vmax} と領域1、3の地盤反力係数 k は、剛な二次元模型管路を用いた引上げ、引下げ遠心実験の結果に基づいて定める。

領域2の分布荷重の最大値 q_{max} は次式により求める。

$$q_{max} = p_v \times \quad (1)$$

p_v は二次元引上げ実験から得られる引上げ抵抗力である。 α は三次元アーチ作用を表わす係数であり、地盤材料、地盤密度、土被り高に関係なくほぼ $\alpha = 1.8$ になることを確かめた。

図-4(b)に示した現行設計法(以後ガス指針と呼ぶ)との基本的な違いは、ガス指針では全ての領域の荷重と反力を一律に $(\delta_G - \delta_p) \times \alpha$ 一定ばね定数 kD ($k = 8.4(D)^{-3/4}$)で与

えているのに対して、提案設計法では領域2の荷重 p_v を反力 p_r とは独立に与えるところにある。提案モデルの境界条件と連続条件は以下の通りである。

() 領域1 : $x_1 = 0$ のとき $\delta_p(x_1) = 0, \theta(x_1) = 0$

() 領域2 : $x_2 = L$ のとき $\delta_p(x_2) = \delta_G, \theta(x_2) = 0$

() 各領域の境界で δ_p, θ, M, Q が連続

このモデルは解が簡便に求められるという弾性床上の梁理論の長所を生かし、かつ三次元の地盤変形挙動であるアーチ作用を正當に考慮している点に特徴がある。

4.2 解析結果

解析結果を図-5に示す。提案設計モデルが、ガス指針と比べて p, ϵ, δ_p のいずれにおいても、実験結果をシミュレートできていることが確認できた。

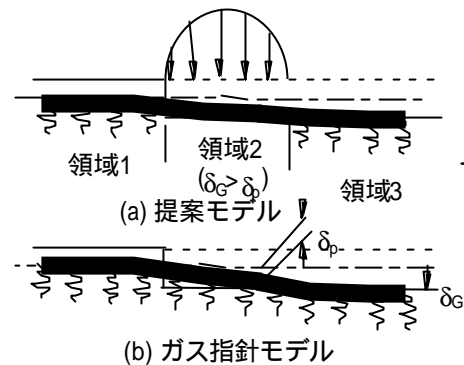


図-4 提案設計法と現行設計法のモデル

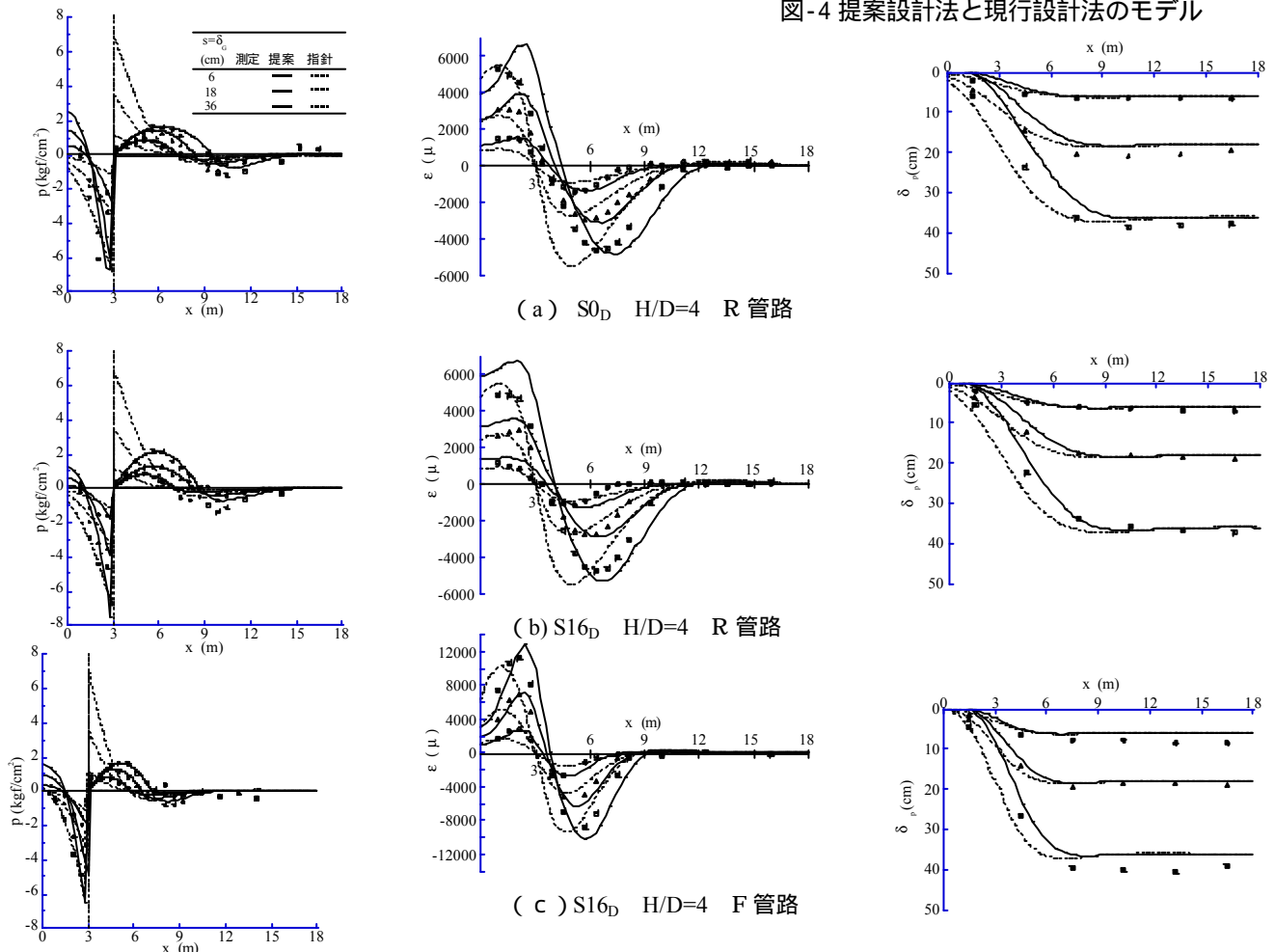


図-5 実験結果と解析結果の比較

5. 感度分析

提案設計法によって算出される管路の力学挙動が k 、 p_{vmax} 、 δ_G 、 EI 、および D の変化によってどのように変わるかを調べ、ガス指針による予測と比べた。計算は分析定数の値のみを変え、それ以外は、 $D=60\text{cm}$ 、 $EI=2.32 \times 10^{10}\text{kgf/cm}^2$ (以上は三次元遠心実験で用いた R 管路の原型換算値)、 $p_{vmax}=1\text{kgf/cm}^2$ 、 $k=0.5\text{kgf/cm}^3$ 、 $\delta_G=18\text{cm}$ に固定した。図-6 に管路の曲げひずみの最大値 ϵ_{max} と各定数の関係を示す。提案設計法の固定側、沈下側として示した 2 本のラインはそれぞれ領域 1、2 における ϵ_{max} の絶対値を表し、両者の値は異なる。一方、ガス指針による ϵ_{max} は、固定側、沈下側とも等しい。 k 、 p_{vmax} 、 δ_G の変化に対して提案設計法の ϵ_{max} は強い非線形性を示すが、ガス指針の ϵ_{max} は k と δ_G の変化に対して線形的に変化する。 EI と D を変化させた時の ϵ_{max} の変化傾向は提案設計法、ガス指針ともよく似ている。

k を変化させた場合の提案設計法とガス指針による計算結果を図-7 (a)(b) に示す。各図の横軸の x は固定地盤と沈下地盤の境界を原点とする距離を表す。図(a)に示

した提案設計法による計算結果は、 k の増大につれて領域 2 の距離 L が増え、これに伴って $p_v \cdot p_r$ 、 ϵ 、 δ_p の分布が右方向にシフトし、どの分布も $x=0$ の左右で対称にはならない。一方、図(b)に示したガス指針による分布は、このようなシフトがなく、常に $x=0$ の左右で対称である。さらに、図-6 の $\epsilon_{max} \sim k$ 関係と $\epsilon_{max} \sim \delta_G$ 関係が提案設計法とガス指針で大きく異なったのは、図-7 で示したように、ガス指針によって算定される $p_v \cdot p_r$ の分布の形と大きさが遠心実験によって判明した実態とは著しく異なるためと説明できる。

6. 結論

ガス指針に規定された弾性床上の梁理論では、固定地盤側と沈下地盤側の境界で、 p 、 ϵ 、 δ_p 分布は対称モードとなるが、実験結果では対称とはならない。よってガス指針は不同沈下に対する実挙動を反映しているとは言えない。提案設計法は実験結果をかなりシミュレートできており、現行設計法に代わる合理的な設計法であることが確認された。

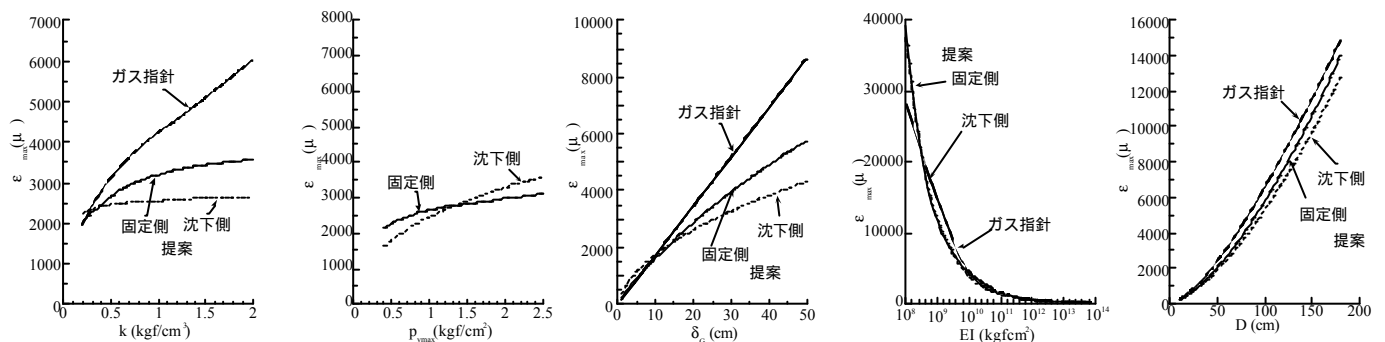


図-6 各定数を変化させた時の最大曲げひずみ ϵ_{max} の変化

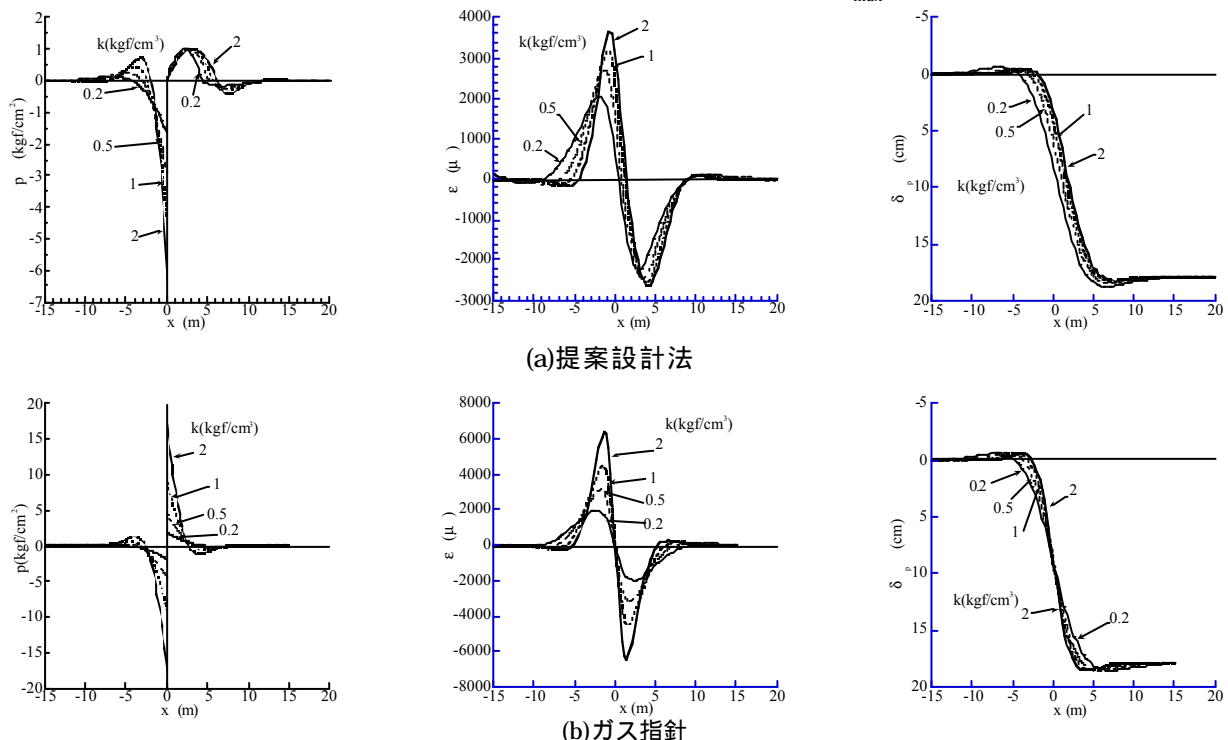


図-7 異なる k に対する p_v 、 p_r 、 ϵ 、 δ_p の分布