

砂地盤中のトンネル掘削に伴う周辺地盤の力学的挙動に関する研究

吉川 和行

概 要

近年、鉄道線路下や道路下を横断する構造物を非開削工法で構築する事例が増加している。その際、非開削工法の代表としてエレメント推進・けん引工法などがよく行われる。しかしながら、エレメント推進・けん引工法は、工法自体が鋼管を複数本施工する必要があるため周辺地山を乱し、応力の再配分に影響を与える場合も考えられる。そこで、本研究では、エレメント推進・けん引時の影響を解明することを目的に、砂地盤中にエレメント鋼管と見立てた並列落とし戸を連続降下する模型実験や数値解析などによる検討を行った。

Study on Mechanical Behaviors of Sandy Grounds around a Tunnel

Abstract

Recently, the number of construction projects to excavate under existing railways and roads with non-open cut methods has increased, and the element jacking method is usually adopted. However, since several steel pipes are pushed into grounds when the element jacking method is adopted, the pushing pipes may disturb the grounds around the tunnels and affect the stress re-distribution in grounds. In this report, in order to clarify these behaviors when the element jacking method or the pipe roofing method is adopted, trapdoor experiments to simulate tunnel excavation in sandy ground were carried out and comparisons with the results of numerical analysis were made.

キーワード： 模型実験 エレメント推進工法
落とし戸 パイプルーフ工法

§1.はじめに

近年、鉄道線路下や道路下を横断する構造物を構築する場合、軌道面や舗装面への影響を最小限にとどめること、横断構造物の断面が大きくなってきていること、延長が長くなってきていることなどから非開削工法で施工する場合が増加している。この場合、非開削工法の代表としてエレメント推進・けん引工法などがよく行われる。しかしながら、エレメント推進・けん引工法は、工法自体が鋼管を複数本施工する必要があるため周辺地山を乱し、応力の再配分に影響を与えることも考えられる。

そこで、本研究では、エレメント推進・けん引時の影響を解明することを目的に、まず模型実験にて砂地盤中にエレメント鋼管と見立てた並列落し戸を連続降下させ、エレメント鋼管の形状が周辺地盤に与える影響について検討を行い、次に代表的なケースに絞ってシミュレーション解析を行った。本報告では、これら模型実験とシミュレーション結果について報告するものである。

§2. 模型実験による検討

2.1 実験概要

模型実験は、図1に示すような幅1200mm×高さ870mm×奥行き300mmの土槽を用いて想定実構造物の約1/8縮尺モデルで行った。図2中の土槽の底盤中央部には掘削を模擬する落し戸(幅96mm×奥行き295mm)が3つ並列してあり、これを降下することでエレメント掘削を再現した。

本実験では、3種類の落し戸を用意した。1つ目の落し戸は、矩形エレメントを模擬し幅96mmのノーライズ(平坦)とした。2つ目は、扁平筒形(曲率半径=60mm、ライズ=24mm、幅=96mm)とし、3つ目はパイプルーフを模擬した半円筒形(曲率半径=48mm、ライズ=48mm、幅=96mm)の落し戸とした。

2.2 実験方法

実験に使用した模擬地盤は、乾燥浜岡砂を所定の高さから空中落下法により作製した。その後、表1に示す実験ケースにしたがって落し戸を降下させた。土被りは500mmと250mmの2ケースである。表2に模擬地盤の物性を示す。主な計測項目は図1に示すように①地表面の変位(8点)②落し戸に作用する荷重(3点)③地中の鉛直土圧(14点)である。実験は、図3に示すよう、まず落し戸Aを降下させ次に落し戸B、最後に落し戸Cの順で約6mmまで降下させ各種計測は落し戸降下0.15mm毎に行った。

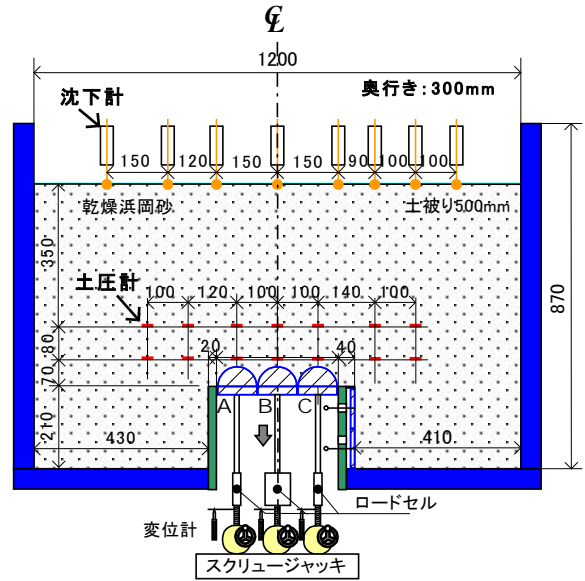


図1 実験土槽 (Case3)

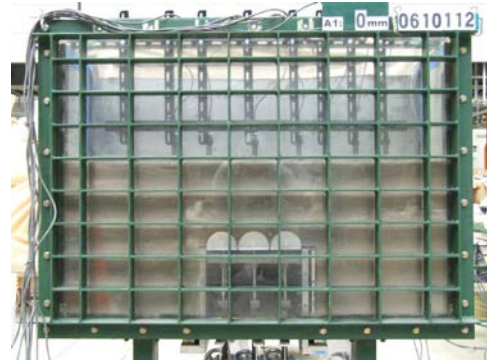


図2 実験土槽(case6)

表1 実験ケース

ケース名	落し戸装置	土被り
CASE1	平坦	500mm
CASE2	扁平筒形	500mm
CASE3	半円筒形	500mm
CASE4	平坦	250mm
CASE5	扁平筒形	250mm
CASE6	半円筒形	250mm

表2 模擬地盤の物性

使用した砂	乾燥浜岡砂
乾燥密度(g/cm ³)	1.509
土粒子の密度(g/cm ³)	2.672
最大間隙比 e _{max}	0.898
最小間隙比 e _{min}	0.582
相対密度 Dr (%)	40.5
平均粒径(mm)	0.2394
内部摩擦角(°)	34.5
粘着力(kN/m ²)	0.0

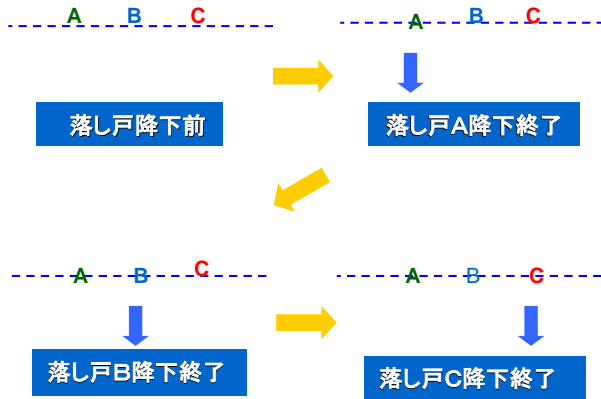


図3 落とし戸の降下順(case2)

2.3 実験結果

図4に土被り500mmにおけるケース毎の各落とし戸降下に伴う各落とし戸に作用する荷重を示す。落とし戸降下時の降下した落とし戸に作用する荷重(落とし戸荷重)は減少するが、隣接している落とし戸の荷重(落とし戸荷重)は増加しているのが確認できる。また、落とし戸降下時の降下した落とし戸に作用する荷重(落とし戸荷重)は、落とし戸の形状が平坦>扁平筒形>半円筒形の順に小さくなる。この傾向は、土被り250mmについても同様であった。

また、図4中の各ケースにおける落とし戸荷重の初期荷重は、模擬地盤を空中落下法で製作しているため各ケース、各落とし戸で同一とはならない。そこで、落とし戸に作用する最終荷重の和を初期荷重の和で除して荷重の無次元化を行ったものを図5に示す。同図より、CASE3:半円筒形、CASE2:扁平筒形、CASE1:平坦の順に小さくなるのがわかる。すなわち、落とし戸の形状が円形に近づくほど、落とし戸に作用する荷重が小さく、周辺地盤に荷重が分配されやすいことがわかった。

図6に土被り500mmにおける落とし戸C降下終了時の地中鉛直土圧の増分分布を示す。鉛直土圧は地表面より下方350mmの位置の値であり、落とし戸降下開始前の土圧を0としたものである。各落とし戸上方の鉛直土圧は、落とし戸降下に伴い減少し、その減少量は半円筒形が最も大きく、扁平筒形>平坦の順で小さくなった。一方、周辺地盤は土圧が増加し、その増加量は半円筒形が最も大きく、扁平筒形>平坦の順で小さくなっていった。この傾向は、土被り250mmについても同様であった。

図7と図8に土被り500mmと250mmのケース毎の各落とし戸降下に伴う地表面沈下の分布を示す。これより、土被り250mmの方が各落とし戸降下後の地表面沈下量の最大値が大きく、また、落とし戸C降下終了時の地表面沈下量はわずかではあるが半円筒形が最も小さく、扁平筒形<平坦の順で大きくなるのが分かった。

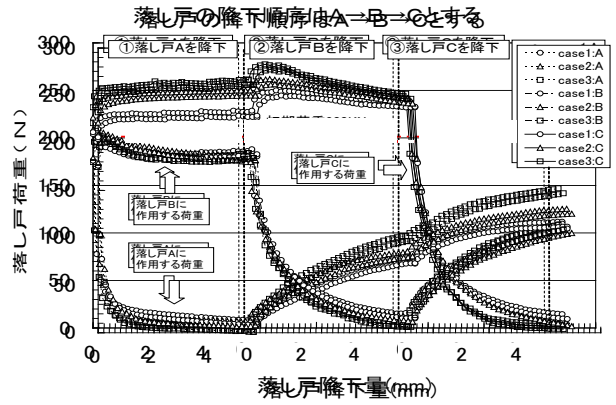


図4 落とし戸の降下量と落とし戸荷重の関係

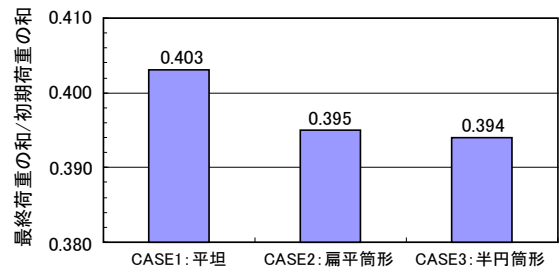


図5 落とし戸荷重の最終荷重の和/初期荷重の和 (CASE1~CASE3【土被り500mm】)

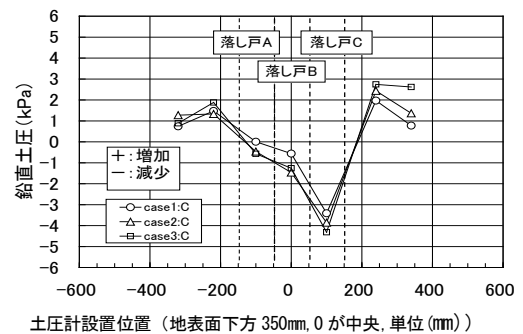


図6 落とし戸降下に伴う土圧の増分分布【H=500mm】

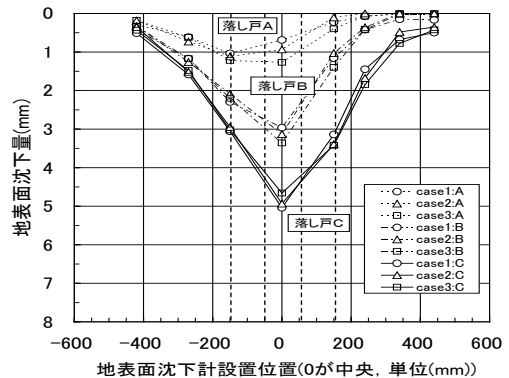


図7 落とし戸降下に伴う地表面沈下量の関係【H=500mm】

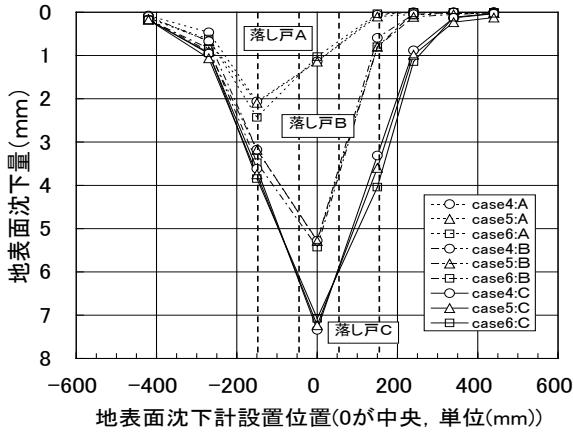


図 8 落とし戸の降下に伴う地表面沈下量の関係【H=250mm】

§3. シミュレーション解析による検討

3.1 解析概要

並列落とし戸を連続降下する模型実験の結果から、半円筒形落とし戸は、扁平筒形や平坦よりも落とし戸に作用する荷重が小さく、また周辺地山への応力再配分がより滑らかに行われることが分かった。そこで、シミュレーション解析では、模型実験の case3 の半円筒形の落とし戸を対象として行った。

シミュレーション解析では、並列落とし戸を連続降下する模型実験を模擬することを目的とするため、幅 120cm×高さ 71cm を解析領域とし、底盤中央部に掘削を模擬する落とし戸(幅 96mm×奥行き 295mm)を 3 つ並列し、これを降下させることでエレメント掘削を再現した。具体的には、落とし戸の形状については、模型実験の case3 のパイプルーフを模擬した半円筒形(曲率半径=48mm、ライズ=48mm、幅=96mm)とし、落とし戸 A を 1mm 毎に 6mm まで降下させた。その後、落とし戸 B を降下させ、最後に落とし戸 C 降下させた。

3.2 解析手法

シミュレーション解析は、模型実験を模擬するため 2 次元平面ひずみ状態とし有限差分法による弾性解析とした。図 9 に解析メッシュ図を示す。解析コードは、FLAC_ver.5.0 を用いた。模擬地盤の物性値等は、単位体積重量 $\gamma_t=14.8$ (kN/m³)、弾性係数 $E=0.32$ (MPa)、ポアソン比 $\nu=0.3$ の一様地盤とした。ここで、弾性係数については土圧の分布状況から設定した。なお、模擬地盤と半円形落とし戸模型との接触は、摩擦角を 35°、接線ばね定数(Ks)を 2×10^4 (MPa/m)、法線ばね定数は 2×10^4 (MPa/m) で設定した。

落とし戸の降下については、落とし戸に変位速度 $5.0 \times$

10^{-9} (m/step)を与え、時間ステップを 20 万回計算して 1mm の降下を再現した。ただし、各落とし戸降下後には地盤より反力が生じるように落とし戸を固定した。

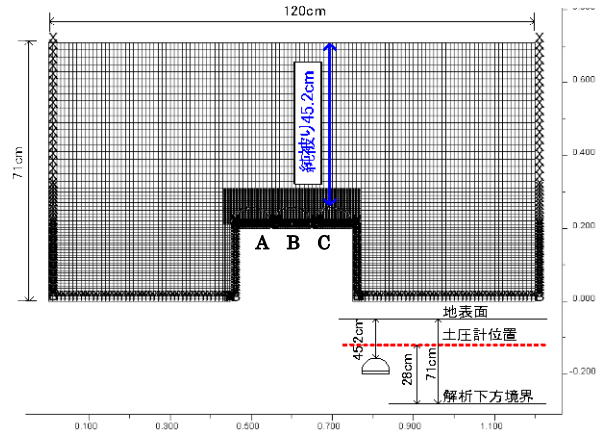


図 9 解析メッシュ図

3.3 解析結果

図 10 に落とし戸降下に伴う地中鉛直土圧分布を示す。これより、落とし戸降下前の地中鉛直土圧分布(図 10(a))は、円筒形落とし戸周辺の土圧がそれ以外の部分より比較的大きくなる結果となった。また、図 10(b)、図 10(c)より落とし戸 A の降下に伴って落とし戸 A 直上部の鉛直土圧が小さくなっていることも確認できた。

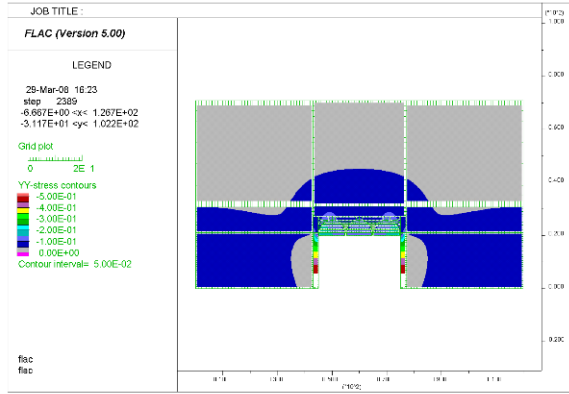
図 11 に落とし戸降下に伴う各落とし戸に作用する荷重比(落とし戸に作用する荷重と初期荷重との比)の解析結果と実験値(模型実験の case3)を示す。これより、落とし戸降下時の降下した落とし戸に作用する荷重(落とし戸荷重)は減少するが、隣接している落とし戸の荷重(落とし戸荷重)は増加しているのが確認できる。ただし、解析値の方が実験値より荷重減少の程度が緩やかとなった。

図 12~図 14 に落とし戸 A、B、C 降下量 5mm、6mm における地中鉛直土圧の増分分布を示す。鉛直土圧は解析領域下方境界より上方 280mm の位置の値であり、落とし戸降下開始前の土圧を 0kPa としたものである。

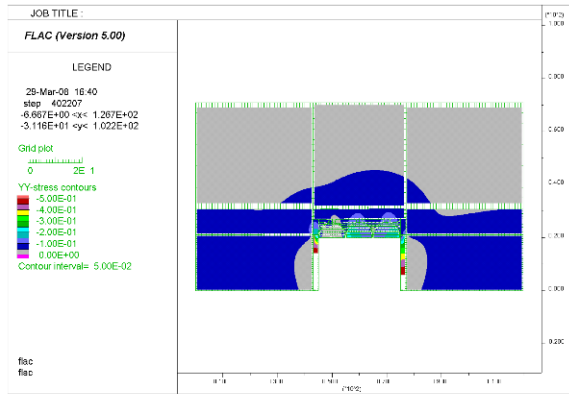
実験値(模型実験の case3)と解析値を比較すると、若干の乖離(例えば、図 13 では落とし戸 C 直上の土圧増分が約 2kPa、図 14 では落とし戸 B 直上の土圧増分の正負が約 3kPa)が見られるが、精度よくシミュレートできている。したがって、以下に解析値について考察する。

まず、図 12 より落とし戸 A を降下させた場合、落とし戸 A 直上で最も大きく減少し、落とし戸 B で増加する。次に、落とし戸 B を A に引き続き降下させた場合、図 13 から落とし戸 B 直上で減少し、落とし戸 A 直上では、落とし戸 A 降下時の減少量の半分程度増加する。そして、落とし戸 C の土圧が増加する。

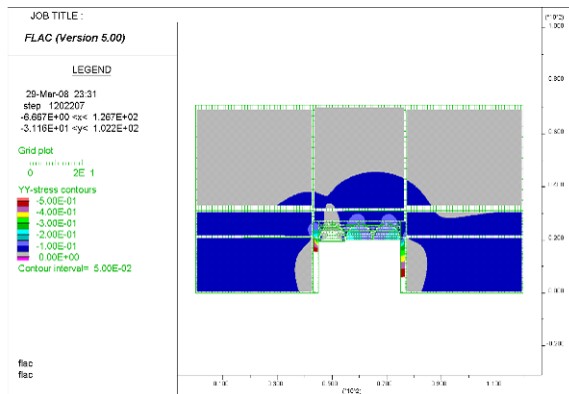
最後に、落とし戸 C を B に引き続き降下させた場合、図 14 から、落とし戸 C 直上で大きく減少し、落とし戸 A、B ともに落とし戸 B 降下時の減少量の半分程度増加する。そして、落とし戸の外側の土圧が増加し、ほぼ落とし戸幅分離れた位置で増分が最大となる結果となった。



(a) 落とし戸 A 降下量 $\delta = 0.0\text{mm}$



(b) 落とし戸 A 降下量 $\delta = 2.0\text{mm}$



(c) 落とし戸 A 降下量 $\delta = 6.0\text{mm}$

図 10 落とし戸降下に伴う地中鉛直土圧分布
(単位:100kPa、一側:圧縮)

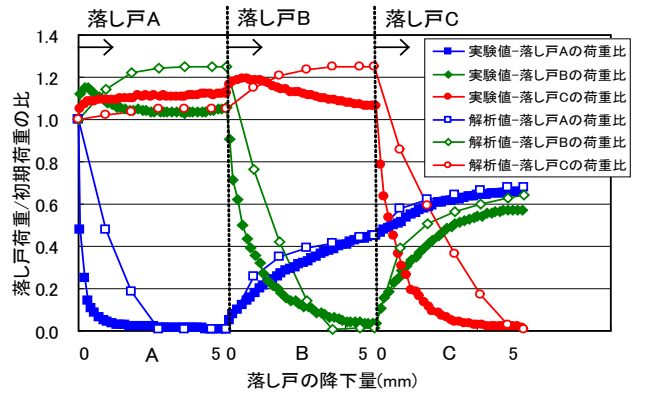


図 11 落とし戸降下に伴う落とし戸荷重/初期荷重の関係

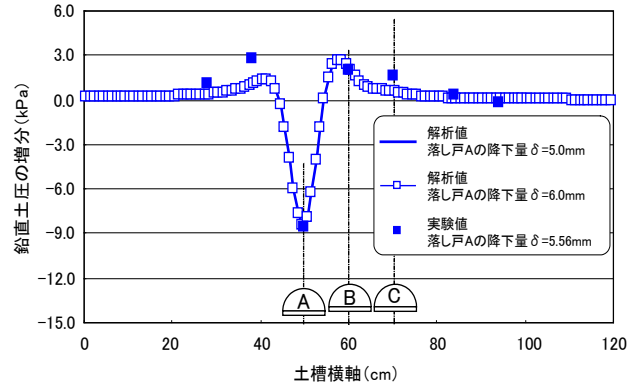


図 12 落とし戸(A1)降下に伴う鉛直土圧の増分分布

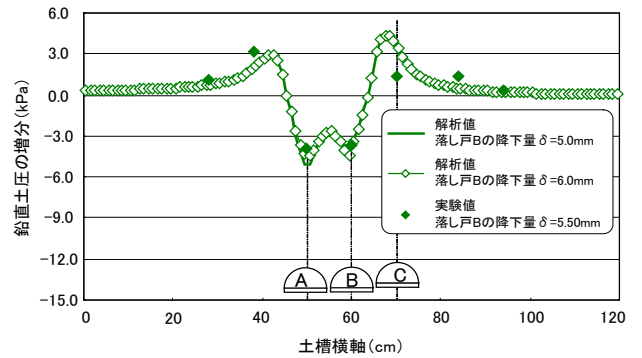


図 13 落とし戸(A2)降下に伴う鉛直土圧の増分分布

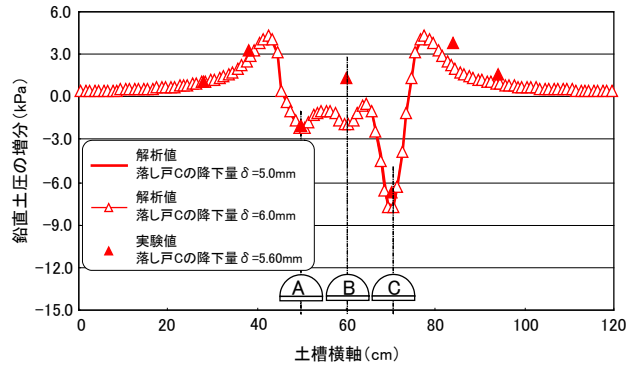


図 14 落とし戸(C)降下に伴う鉛直土圧の増分分布

§4. まとめ

本研究の連続落し戸実験とシミュレーション解析から以下の知見を得た。

- 1) 半円筒形落し戸形状の方が、扁平筒形や平坦よりも落し戸に作用する荷重が小さく、また周辺地山への応力再配分がより滑らかに行われることが分かった。
- 2) 土被りが小さいと落し戸上に発生する地表面沈下量が大きく、土被りが大きいと地表面沈下の影響範囲が大きいことが分かった。また、3 枚落し戸では最終落し戸降下時の地表面沈下量の最大値は、わずかではあるが円形に近い落し戸が最も小さく、扁平<lt平坦の順で大きくなることが分かった。
- 3) 2 次元有限差分法による弾性解析によって、半円筒形落し戸の降下量と落し戸荷重/初期荷重の関係および連続降下する落し戸の地中土圧の分布を精度よくシミュレートすることが可能である。
- 4) パイプルーフ工法におけるパイプルーフに作用する土圧および周辺地山応力の再分配について把握することができた。

謝辞 模型実験を進めるに当たり、(元)日本大学学生の山口真悟氏に御協力をいただいた。謝意を表します。

参考文献

- 1) 垂水尚志、山本征彦、大田弘、野口利雄: 砂地盤中のトンネル掘削に伴う荷重の再分配、トンネル工学研究発表会、第 2 巻、pp.27~34、1992.10
- 2) 足立紀尚、木村亮、岸田潔、伊藤浩志: 降下床実験によるトンネル掘削過程を考慮したトンネルおよび周辺地盤の力学的挙動の解明、土木学会論文集No.694/III-57、277-296、2001.12
- 3) 仲山貴司、松岡直樹: 小断面エレメント推進工法の作用土圧に関する研究、第 41 回地盤工学研究発表会、pp1753~1754、2006
- 4) 吉川和行、仲山貴司: 連続円形落し戸実験における周辺地盤の力学的挙動について、第 61 回土木学会年次学術講演会、III-055、2006.9
- 5) 仲山貴司、岡野法之: エレメント推進・けん引工法における緩み土圧の分布形状、鉄道総研報告、pp.41~46、2007.8
- 6) 吉川和行、岡野法之、仲山貴司: 砂地盤中のトンネル掘削に伴う周辺地盤の力学的挙動について、第 62 回土木学会年次学術講演会、III-174、2007.9

- 7) 吉川和行、岡野法之、仲山貴司: 砂地盤中におけるトンネル掘削に伴う周辺地盤の力学的挙動に関するシミュレーション解析について、第 63 回土木学会年次学術講演会(投稿中)



吉川 和行

ひとこと

エレメント推進時の設計土圧を提案するためには、模型実験でも行った落し戸の形状効果(平坦、扁平筒形)についてもシミュレート可能か否かの検討をすべきと考える。