双設トンネル及び大深度トンネル掘削時の地盤挙動

Ground behavior during deep tunnel excavation and twin tunnel excavation

黒井 翔¹, ホサインシャヒン², 中井照夫², 岩田 敏和³

- 1 名古屋工業大学大学院 E-mail:this_scenery_is-evergreen-@ezweb.ne.jp
- 2 名古屋工業大学・工学部・都市社会工学科
- 3 西日本電信電話株式会社

概 要

トンネル掘削が周辺地盤や既設構造物に及ぼす影響を予測することは重要である。そこで、本研究では 変位・応力混合制御型トンネル掘削模型装置を用いて双設トンネル掘削と、大深度地下における杭基礎と の近接施工を想定したトンネル掘削の2次元モデル実験を実施し、有限要素解析と合わせてトンネルー地 盤ー構造物の相互作用の検討を行った。双設トンネル掘削における相対位置と掘削順序に着目し、既往の 研究との比較を行った。その結果2つのトンネルに作用する土圧モードは、掘削順序によって大きく異な ることが分かった。大深度地下におけるトンネル掘削では、杭長を変化させたパターンの比較を行い、ト ンネルと杭基礎が相互に影響を及ぼし合うことが分かった。また、解析結果は実験結果をよく捉えており、 トンネル掘削時の挙動を予測する上で有用なツールになると考えられる。

キーワード:トンネル,掘削,近接施工,モデル実験,有限要素法

1. はじめに

現在,都市部には地上地下を問わず様々な構造物が高密 度に建設されているため、その中で新たにトンネルを建設 する場合には周辺地盤の安定性を把握するだけでなく,既 設構造物への影響を考慮することも重要である。双設トン ネルの施工では用地や制約条件から非常に近接した状態 を余儀なくされることもあり、実際に離隔 0.3D (D:トン ネル外径)以下の施工事例の報告もある。また地下空間の 有効利用という観点から、大深度地下におけるトンネル施 工も近年注目されているが、この場合もトンネル掘削に伴 う地盤内の変形挙動を把握し,周辺構造物が存在する場合 にはそれらへの影響を適切に評価する必要がある。しかし ながら現行のトンネル設計法は、これまでの施工事例に基 づく経験的手法や、大胆な仮定をもとに設計・施工された ものが多い。このような背景から、トンネル-地盤-構造 物の力学的相互作用を把握することの重要性は多くの研 究者たちが述べている。

筆者らの研究グループは、これまでに降下床¹⁰や円形ト ンネル掘削試験機を用いたトンネル掘削実験と弾塑性有 限要素解析を実施し、トンネル掘削が既設トンネルや既設 構造物に及ぼす影響をモデル実験・解析の両面から検討し てきた。しかし、これらの研究ではトンネル掘削面問題を 掘削境界面に一定の変位を与える変位境界の問題として、 もしくは掘削面に一定の応力を与える応力境界の問題と して取り扱っていた²⁾³⁾。しかし本来,トンネル掘削に伴 う内空変位やトンネル周面土圧は未知数であり,地山側の 特性によって決定されるものであると考えられる。

そこで本研究では、前述のような背景から、実際のトン ネル掘削おける掘削面の境界条件は変位・応力境界双方の 中間的な様相を呈するものと考え, 掘削面を変位境界とし て実験を実施してきた既存の円形トンネル装置に改良を 加え、トンネル径の収縮量を制御し、なおかつ鉛直・水平 方向に作用する土圧と釣り合うように地盤の動きに追随 できるトンネル掘削模型装置4を開発した。双設トンネル 掘削問題に対してはこの装置を 2 機用いてトンネルの位 置関係と掘削順序に着目した 2 次元トンネル掘削モデル 実験を実施した。さらに都市部における空間の有効利用と いう観点から施行された大深度法についても着目し、杭基 礎との近接施工を想定した実験も行った。また地盤材料の 力学特性を適切に考慮した非線形数値解析を実験に即し た条件で行い、実験および解析の両面からこれらのトンネ ル掘削時の地盤及びトンネルの応力・変形メカニズムを考 察し,基礎的な立場から地盤の変形挙動について検討する。



2. モデル実験と数値解析の概要

2.1 2次元モデル実験の概要

本稿で実施している2次元モデル実験では、本研究室が 開発した円形トンネル掘削装置 2)に改良を加えた新型ト ンネル掘削装置 4を用いた。トンネル模型は実際の 1/100 のスケールを想定した直径 B=100mm の真円断面で、図 1(b)に示すように断面収縮用の中心軸とそれを取り囲む ように 12 個の受圧ブロックで構成されている。受圧ブロ ックはベアリングユニットにより半径方向に滑らかに収 縮する機構になっており, 内部に設置したロードセルで周 面土圧を計測する。なお受圧ブロックが中心軸に常に接触 するようにゴムバンドで固定するが、実験中のゴムバンド の張力変化は微小でロードセルの計測値には影響しない。 トンネル模型の中心部の Shim には断面径が滑らかに減少 するテーパーがつけられており、断面径収縮用モーターで 引き抜くと受圧ブロックが内空側に変位してトンネル径 が半径方向に収縮する機構になっている。本研究では既往 の装置2)を改良して掘削面を応力・変位境界型とする2次 元円形トンネル掘削実験を実施する。新型のトンネル模型 装置の概要を図 1(a)に示す。新型装置はトンネル収縮部が 軸受けべアリングと水平スライダーによって上下左右に 摩擦なく移動できる機構になっている。収縮装置全体の重 量は定滑車を介したカウンターウェイトで相殺し、トンネ ル自体の自重は別途重りを載荷し調整する。この一連の改 良により、トンネル収縮に伴う地山の変形に応じたトンネ ル作用土圧の変化に対応してトンネルが周辺地盤と釣り 合いを保つように変位し、内空変位量・周面土圧分布が得







図 3 掘削面に課した応力・混合境界条件

られる。このとき掘削面には図3に示すような変位・応力 混合境界条件が課される。なお収縮部は回転せず断面は常 に真円形を保つ。双設トンネル掘削実験では、実験台にト ンネル収縮装置を2機設置しており、その試験機概要を図 2(a)に示す。この装置はトンネル間の距離と位置関係や土 被りを任意に設定することが可能である。一方、近接施工 を想定した実験では既設構造物として杭基礎を用いてお り、その試験機概要図を図2(b)に示す。杭基礎におけるラ フト部は幅80mm、奥行き60mm、高さ40mmの剛なア ルミ製のものを用いる。なお、杭は取り外しが可能である。 構造



図 4 アルミ棒積層体の二軸圧縮試験と解析結果の比較

物に与える死荷重は別途実施した支持力試験により得ら れた極限支持力の約1/3の値とし、載荷ロッドを用いて所 定量の重りを載荷することにより、構造物荷重を再現した。 試験機の幅はすべての実験において 1200mm としており, トンネル模型の直径は 100mm, 模型地盤は直径 1.6mm と 3.0mm のアルミ棒を重量比 3:2 で混合した積層体を用 いた。図4の〇プロットはアルミ棒積層体の2軸試験の結 果である。同材料は中密な砂に似た応力ひずみ特性を呈し ており、都市部の砂質地山を想定した本実験に適したもの と考える。模型地盤はトンネル模型及び既設構造物を設置 した後,所定の高さまでアルミ棒を積み上げて作成し,試 験機下部のハンドルでアルミブロックを上昇させること でトンネル周面に作用する土圧及び地盤内の土圧が静止 土圧状態になるように調整した。双設トンネル掘削実験で はトンネル周面の土圧と地表面沈下形状およびトンネル 収縮部の鉛直・水平変位量を計測した。また模型地盤側面 デジタルカメラで撮影し、PIV 法を用いて地盤内のひずみ 分布を算出した。構造物に近接したトンネル掘削実験では, 上記の計測項目に加え杭基礎の荷重分担率と基礎の回転, 沈下量を計測した。PIV は Particle Image Velocimetry(粒 子画像流速測定法)の略称で、水や空気等の流体の速度計 測法の一つとして粒状体の移動量算出に利用している。

2.2 数値解析の概要

数値解析は地盤材料の弾塑性モデルに基づく非線形有 限要素解析コード FEMtij・2D を用いた。双設トンネルお よび既設構造物に近接したトンネルの要素分割の一例を それぞれ図 5(a), (b)に示す。地盤は 4 節点のアイソパラ メトリック要素で表現した。境界条件はモデル実験と同一 で,底面は完全固定,側面は水平変位のみ固定とした。ま た,掘削面では鉛直・水平作用土圧の合力の釣合いを満足 しつつ,真円形を保ったまま断面径が減少するディリクレ



λ	0.008	compression index	
к	0.004	swelling index	
e _{NC}	0.3	reference void ratio on normally consolidation line at $p = 98$ kPa & $q = 0$ kPa	Same parameters
R _{cs}	1.8	critical state stress ratio R_{cs} = $(\sigma_1/\sigma_3)_{cs(comp.)}$	as Cam clay model
Ve	0.2	Poisson's ratio	
β	1.2	shape of yield surface (same as original Cam clay at $\beta = 1$)	
a	1300	influence of confining pressure	

- ノイマン型混合境界となるように設定した。また、杭は 弾性梁と弾性ソリッド要素に 9:1 の割合で剛性を配分し たハイブリッド要素 5で表現する。地盤と杭の摩擦は弾塑 性ジョイント要素で表現し, 別途実施した試験より地盤と 杭間の摩擦角 18°とし、地盤と基礎間の摩擦は摩擦角 15° とした。地盤材料の応力-ひずみ関係は,等方硬化型の弾 塑性構成モデル subloading tij model⁶⁾で記述した。このモ デルは中間主応力が土の強度・変形特性に及ぼす影響やひ ずみ増分方向の応力経路依存性,密度と拘束圧の影響を適 切に考慮できる。表1に同モデルの構成パラメータとアル ミ棒積層体の値を示す。aは密度と拘束圧の影響, Bは降 伏面の形状に関するパラメータであり、残りは Cam-clay モデルと共通のパラメータである。これらの構成パラメー タは一般的な土の要素試験によって簡単に求めることが できる。また, subloading tij model⁶⁾は実験値に見られる ひずみ硬化・軟化特性や正負のダイレイタンシー特性をよ く捉えている。なお、図4の破線はモデル地盤を想定した 低拘束応力での二軸試験のシミュレーション結果である が、同モデルは密度と拘束圧による応力ひずみ特性の違い を適切に説明している。初期の応力状態は、模型地盤と同 じ間隙比になるように領域下端から所定の高さまでの地

盤を自重圧密させる。なお,自重圧密後の地盤の静止土圧 係数 K₀ は 0.70~0.74 の範囲にあり,模型地盤のそれ (K₀≒0.70)とよい対応をしている。

2.3 実験及び解析パターン



 (a)双設トンネル掘削実験
 (b)杭基礎との近接施工

 図 6 実験と解析の諸元

双設トンネル掘削実験および数値解析では,斜め方向に 近接したケースを想定し, 先行トンネルを掘削後, 後続ト ンネルを掘削した。土被り D=2.0B の上部地盤に掘削す るトンネルを先行トンネルとし、続いて下方の地盤を掘削 する場合を Case1, 掘削順序を Case1 と逆とした場合を Case2 と定義し、両者の比較検討を行う。実験と解析の諸 元を図 6(a)に示す。先行トンネルの収縮量を dr1,後続ト ンネルの収縮量を dr2 とし、dr1=dr2=4.0mm で掘削完了と した。上部トンネルと下部トンネル(土被り D=3.25B) 間の鉛直・水平の距離をそれぞれ ST1, ST2 とし、本実験 は ST1=ST2=0.25B で一定とする。既設構造物に近接した トンネル掘削実験および数値解析では、トンネル径収縮量 は dr=4.00mm で掘削完了とする。 土被りは D=4.0B で一 定とし, 杭長を 200mm, 300mm と変化させた 2 つのパ ターンから、大深度地下に着目したトンネル掘削の検討を 行う。また実験と解析の諸元を図 6(b)に示す。

3. 結果と考察

3.1 掘削順序を考慮した双設トンネル掘削における実験 および解析結果の比較検討

双設トンネル掘削において,本研究室が実施した既往の 研究⁸から各トンネルを掘削するとその周辺地盤に順次 せん断帯を形成することから,掘削順序を考慮する必要が あることがわかった。そこで,本節では斜め方向に近接し たケースにおいてトンネルの位置関係はそのままに掘削 順序のみ変更した実験を実施し,解析と合わせて両者の比 較検討を行う。

各トンネルに作用する土圧分布の実測値と解析値を図7, 8 に示す。図中の(a)および(b)はそれぞれ先行トンネル, 後続トンネルの土圧分布の結果である。放射状に伸びた軸 上のプロットと中心の距離はトンネル周面のそれぞれの 方向の作用土圧の大きさを示している。図より,各ケース とも先行トンネルに作用する周面土圧は,単設トンネル掘



削時ⁿと同様左右対称の分布形状になり,一定値に収束し ていることがわかる。後続トンネル掘削に伴う先行トンネ ル作用土圧の変化に着目すると, Case1 では後続トンネル 掘削に伴い先行トンネルに作用する土圧(▲プロット⇒■ プロット)は応力再配分の影響で二つのトンネル間を結ぶ 直線の直交方向の土圧が増加し,初期土圧を上回る偏土圧 が作用していることがわかる。また Case2 では,後続ト ンネル掘削に伴い先行トンネルの作用土圧は応力再配分 の影響で全体的に増加しており,上下につぶされるような 挙動を示している。図8に示す解析結果は、土圧の再配分の様子など実験結果の傾向をよく表現しているといえる。 これらの結果から、トンネルの相対位置が同じでも、掘削 順序によって各々のトンネルに作用する土圧分布は異な り、掘削順序を考慮する必要があることが明らかになった。



0.00 0.04 0.08 0.12 0.16 0.20

(a)先行トンネルの掘削(b)先行~後続トンネルの掘削図 9 偏差ひずみの分布 (実験値)





続いて地盤内の偏差ひずみ分布の実験および解析結果 を図 9,10 に示す。図中の(a)および(b)は各トンネル掘削 によって生じた偏差ひずみ分布を示している。色の濃淡で ひずみの大きさを表す。図より,各ケースとも先行トンネ ル掘削によって生じたせん断ひずみは単設トンネル掘削 時^っと同様に左右対称の分布形状となることがわかる。後 続トンネル掘削(図中(b))に着目すると,いずれのパタ ーンにおいても双方のトンネルは各々偏差ひずみが大き い領域を形成し,両トンネル間の地盤に変形が集中してい ることがわかる。また掘削に伴いせん断帯が順次形成され る傾向は各ケースともに共通しており,最終的な地盤内の 変形に顕著な違いは見られない。なお解析結果は,先行・ 後続トンネル掘削によって生じた偏差ひずみ分布形状の 特徴をよく表現できているといえる。

次に地表面の沈下形状について考察する。トンネル掘削 時の地表面沈下形状の実験および解析結果を図 11, 12 に 示す。図より,先行トンネル掘削における最大沈下の発生 地点は各ケースともトンネル直上であることがわかる。後 続トンネル掘削後の地表面の沈下形状(■プロット)に着 目すると,各ケースとも両トンネル間中心の直上付近で最 大沈下が発生しており,これは前述の偏差ひずみ分布の変 形が集中している部分の上部である。したがって双設トン ネル掘削の場合,大変形が生じる両トンネル間の直上付近 で最大沈下が発生することがわかる。両者を比較すると, 最大沈下量に差がみられるものの,沈下形状の様子に顕著 な違いはみられない。また解析結果は実験結果をよく表現 できているといえる。



最後にトンネル中心部の変位量について考察する。図 13, 14 にそれぞれ実験および解析結果を示す。図中の(a) および(b)は先行トンネル及び後続トンネルの中心部の変 位量を示している。Case1の場合,先行トンネル掘削時に おけるトンネル中心部は単設トンネル掘削時⁸と同様に 鉛直下方向に変位している。後続トンネルは掘削に伴い鉛 直下方向に変位しつつわずかに先行トンネル側に変位し ていることがわかる。Case2 の場合, 先行トンネルは Case1 の場合と同様に掘削に伴い鉛直下方向に変位する。 一方,後続トンネルは掘削に伴い先行トンネルに引き寄せ られるように変位していることがわかる。ここで後続トン ネル掘削が先行トンネルに及ぼす影響(図中(a)の▲⇒■ プロット)に着目すると、Case1の場合先行トンネルは後 続トンネル掘削の影響で後続トンネル側に引き寄せられ るように変位するが、Case2の場合、先行トンネルは後続 トンネルの下方に位置するため,掘削による影響を受けて いないことがわかる。したがって, 掘削順序によりそれぞ れのトンネル中心部の変位量は異なる結果となる。また解 析結果は実験結果をよく表現できているといえる。



3.2 杭基礎と近接した場合のトンネル掘削実験・解析結 果の比較検討

続いて,近年施行された大深度法に着目し,大深度地下 におけるトンネル掘削が周辺構造物におよぼす影響につ いて考察を行う。なお土被りは D=4.0B で一定,杭長を 200,300mm と変化させて杭基礎との近接施工を想定し た実験および解析を行った。構造物荷重 q_v は杭長 200mm のとき 0.064×9.8 (N/mm), 300mm のとき $0.128 \times$ 9.8(N/mm)とする。ここに D_p はトンネル天端から杭端部 までの距離, L_p は杭長を表わす。

はじめに,地盤内の偏差ひずみ分布について考察を行う。 図 15 に偏差ひずみ分布の実験値および解析値をそれぞれ 示す。筆者らが別途実施した実験および解析結果 ⁹から, 土被りが浅く,杭基礎と近接する場合のトンネル掘削では 地盤内の偏差ひずみはトンネルインバート付近から基礎 下部地盤に向けて延びることがわかっており,その変形度 合いは土被りや杭長によって異なる。その点に着目すると, 大深度地下を想定した本実験の場合でもそのような傾向 がみられており,構造物に及ぼす影響を考慮する必要があ るといえる。杭長 300mmの実験および解析結果では,後 方杭に向けて偏差ひずみが卓越しており,杭の根入深さが トンネル掘削部近傍まで達している場合には,トンネル掘 削が周辺構造物に及ぼす影響に特に注意する必要がある。



また解析結果は基礎下部地盤へ向かう偏差ひずみの様 子など実験結果の傾向をよくとらえている。

トンネル掘削時の地表面沈下形状の実験および解析結 果をそれぞれ図 16, 17 に示す。いずれの場合も構造物の 設置側に沈下は偏り,トンネル中心線に対して左右非対称 の沈下を生じる。また最大沈下は構造物直下で発生してい ることがわかる。単設トンネル掘削時⁸⁰には,土被りが大 きいほど最大沈下量は減少するのに対し,構造物に近接し てトンネルを掘削する場合,最大沈下量は図中の実線で示 した構造物なし(Green field)の場合よりも大きくなる。こ れらの結果から,大深度地下においてトンネル周辺に構造 物が存在する場合には,地表面の沈下に注意を払う必要が ある。

トンネル周面に作用する土圧分布の実験および解析結 果を図 18 に示す。図より,基礎に死荷重を載荷する前に は左右対称であった土圧分布は死荷重を載荷することに より左右非対称な分布となる。またその傾向は死荷重が大





きいほど顕著に現れる。筆者らが別途実施した実験・解析 結果⁹⁰から,土被りが浅く,杭基礎と近接する場合のトン ネル掘削ではトンネル掘削に伴い構造物荷重の影響を受 け構造物側とその反対方向に位置するトンネル周面土圧 は増加する傾向があり,ケースによっては大きな偏土圧が 作用する場合もみられた。しかし大深度地下においてトン ネル掘削に伴う土圧の変化に着目すると,作用土圧は全体 的に減少傾向にあり,わずかに構造物荷重の影響を受けて いる部分も見受けられるが,特筆すべき偏土圧が作用して いる箇所は見受けられない。したがって,土被りが大きく なると構造物荷重の影響そのものは減少することがわか る。

4. まとめ

本研究では、2次元トンネル掘削モデル実験と非線形数 値解析により双設トンネル掘削及び大深度地下において 杭基礎と近接したトンネル掘削実験を実施し、トンネル掘 削時のトンネル - 地盤 - 構造物の力学的相互作用の検討 を行った。双設トンネル掘削の検討では先行・後続トンネ ルを順次掘削し施工過程,掘削順序に着目した比較検討を 行い,杭基礎との近接施工では特に大深度において杭長を 変化させて得られた実験・解析の結果の比較検討及び地盤 内の変形挙動の解明を目的とした。これら一連の考察から 得られた知見を以下にまとめる。

(1) 双設トンネル掘削において、先行トンネルに作用する 土圧はその土被りの違いは見られるものの、単設トン ネル掘削時と同様、左右対称な分布で急激に減少し、 一定値に収束する。その後新たにトンネルを掘削する ことにより地盤内応力の再配分によって先行トンネ ル周面に作用する土圧は増加する。

- (2) 双設トンネルに作用する土圧は相対位置関係が同じでも、掘削順序によって大きく異なる。特に上部地盤にトンネルを掘削した後その下部地盤に新たにトンネルを掘削する場合、先行トンネルは両トンネル間を結ぶ直線上の直交方向の土圧が増加し、今回の実験および解析パターンでは初期土圧を上回る偏土圧が作用する結果となった。一方、先行トンネルを下部地盤に掘削しその後上部地盤に新たにトンネルを掘削する場合、先行トンネルに作用する周面土圧は後続トンネル掘削に伴う地盤内応力再配分の影響で全体的に増加し、上下に押しつぶされるような挙動を示した。以上の結果から、双設トンネル掘削において掘削順序を考慮することは重要な検討項目になりうると考えられる。
- (3) 双設トンネル掘削に伴う周辺地盤の変形挙動は、両トンネルの影響を相互に受ける点において、掘削順序を変更した 2 パターンの結果を比較しても同様の傾向としてとらえることができる。また掘削順序を変更し、両者の結果を比較すると、最終的なせん断ひずみ分布には顕著な違いはみられなかった。
- (4) 双設トンネルにおいて,掘削順序の異なる2つのパタ ーンの土圧分布とトンネル中心部の変位量から,掘削 順序によってトンネル掘削時の変形モードは異なる ことがわかった。
- (5) 大深度地下において杭基礎と近接してトンネルを掘削する場合,地盤内の変形及び地表面沈下は既設構造物の影響を受けることが偏差ひずみ分布及び地表面沈下形状の実験・解析結果より明らかになった。地表面の沈下形状は構造物側に偏ったものになり、トンネル中心に対して左右非対称の変形が生じる。また最大沈下が構造物下部地盤で発生する点も留意するべき点である。
- (6)構造物と近接施工となる場合にはトンネル掘削に伴う地盤の変形はトンネルインバート付近から基礎下部地盤にむけて発達する。今回のように大深度地下を想定した場合でもその傾向は確認でき,特に杭の根入れ深さがトンネル掘削部近傍まで達している場合には構造物に及ぼす影響を考慮する必要がある。
- (7) 大深度地下にトンネルを掘削する場合,周辺に構造物が存在する場合でもトンネル周面土圧に及ぼす影響は大きくない。

地盤材料の応力ひずみ関係を適切に考慮できる弾塑性 構成モデルに基づく数値解析は,地盤内の力学挙動及びト ンネル-構造物の相互作用を適切に考慮でき,双設トンネ ル掘削時及び近接施工のトンネル掘削の土圧,地盤変形を 予測する上で有効なツールになりうるといえる。今後は地 盤特性を変化させた検討や実地盤の検討も行っていく予 定である。

参考文献

 村山朔郎:砂層内局部沈下部にかかる垂直土圧,京都 大学防災研究所年報第11号B, pp.549-565, 1968年
 Shahin, H. M., Nakai, T., Zhang, F., Kikumoto, M. and Nakahara, E.: Behavior of ground and response of existing foundation due to tunneling, *Soils and Foundations*, Vol.51, No3, pp. 395-409, 2011

 Shahin, H. M., Nakai, T., Hinokio, M. Kurimoto, T. and Sada, T. :Influence of surface loads and construction sequence on ground response due to tunneling, Soils and Foundations, Vol.44, No, No2, pp.53-70, 2004.

4) 菊本統,中井照夫,ホサインシャヒン,石井健嗣,岩田敏和: 実際の内空変位と周面土圧分布を考慮した単設トンネル掘削モ デル実験とその解析,土木学会論文集 F1(トンネル工学)特集号, 2011年

5) Zhang F., Kimura, M., Nakai, T. and Hoshikawa, T.: Mechanical behaviour of pile foundations subjected to cyclic lateral loading up to the ultimate state, *Soils & Foundations*, 40(5), 1-18, 2000

6) Nakai, T. and Hinokio, M. : A simple elastoplastic

normally and over consolidated soils with unified

material parameters, Soils and Foundations, Vol. 44,

No. 2, pp. 53-70, 2004.

7) 岩田敏和,石井健邇,中井照夫,H.M.Shahin,菊本統,鬼 頭達也:新しいトンネル掘削装置を用いた実験とその解析,第46 回地盤工学研究会,2011年

8) 岩田敏和,中井照夫,ホサインシャヒン,菊本統,石井健嗣: 新しい双設トンネル掘削実験とその解析,土木学会論文集 F1(トンネル工学)特集号 Vol.67 No.3/pp.33-44,2011

9) 岩田敏和 トンネル掘削問題における既設トンネルおよび既 設構造物の影響 名古屋工業大学修士論文 pp.23-84, 2012