

双設トンネルの挙動と中壁部に作用する土圧に関する研究

An investigation of deformational behaviours and stresses in a central wall of parallel tunnels

桜井春輔^{*}・丸岡巧^{**}・チャールズ アカユリ^{***}・芥川真一^{****}

Shunsuke SAKURAI, Takumi MARUOKA, Charles AKAYULI and Shinichi AKUTAGAWA

An experimental investigation was conducted to observe fundamental deformational behaviours of parallel tunnels as a function of central wall width B , overburden height H , and tunnel diameter D . The experimental apparatus used here simulates tunnel excavation by reducing pressure of dual air-bags which represent two adjacent tunnels constructed within aluminium bars. Failure modes, pillar stresses, air-bag pressures at collapse, etc. are monitored during experiments wherein pillar width and overburden height are varied for parallel tunnels having diameters of 15cm. Results are compiled with regard to a relationship between B/D and H/D , showing the existence of a transition zone which identifies the onset of a failure mode, which is characterized by collapse of pillar and subsequent formation of a loosened zone involving both tunnels.

Keywords : Parallel tunnels, pillar stresses, loosened zone, transition of failure mode

1. はじめに

近接したトンネルの設計・施工、及び挙動の計測例に関しては、古くはTerzaghiによる双設トンネルの現場計測結果の検討¹⁾から、最近では都市部における土被りの浅い土砂山における眼鏡トンネルの施工・計測例^{例1) (2) 3)}に見られるように多くの実例が存在する。また、研究面でも、トンネル離間距離(中壁幅)などの主要パラメータが、双設トンネルの覆土、トンネル中間部(中壁部)や周辺地山の応力・変形状態に及ぼす影響を数値解析^{例4) (5) 6) 7)}、あるいは室内実験^{例8) (9) 9)}によって様々な角度からの詳細な検討がなされている。これらの研究においては、トンネルの複雑な施工過程を念頭においたものもあるが、実際の施工における計測結果を分析する際、例えば数値解析の予測が十分な精度に達しているとは言い難い。また、近年では地下構造物の大型化が進んでおり、大断面双設トンネルの例も珍しくないが、特に空洞が大型化した場合には、緩み域の発生や重力の効果などを適切に取り扱うことが難しいため、数値解析による検討においては特に注意を要する。

このような背景から、本研究では土被りの浅い単設トンネルの挙動分析¹⁰⁾に用いた応力制御型のトンネル掘削シミュレーション装置を用いて、双設トンネルの掘削・崩壊実験を行うこととした。本報告は、その第一歩として実施した同時掘削型の双設トンネルの室内実験において、その変形挙動・崩壊形態が、中壁幅(B)、土被り(H)、トンネル径(D)などの主要パラメータ(図-1参照)と、どのような関係にあるかについて述べたものである。

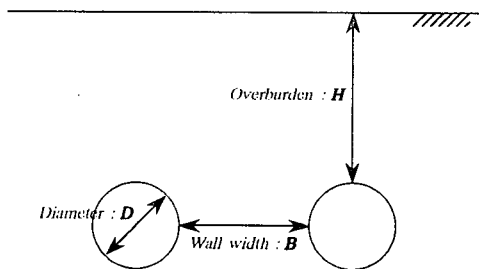


図-1 双設トンネルの挙動に関する主要なパラメータ

2. 実験装置の概要と手順

エアバッグを用いた応力制御型の実験装置¹⁰⁾を用いて、アルミ棒積層体内に設けた双設トンネル(直径 D は15cm)の掘削シミュレーション装置を図-2に示すように設定した。

^{*} 正会員 神戸大学工学部建設学科
^{**} (株) ニュージェック、ダム・砂防部

^{***} 神戸大学大学院自然科学研究科博士後期課程
^{****} 神戸大学都市安全研究センター

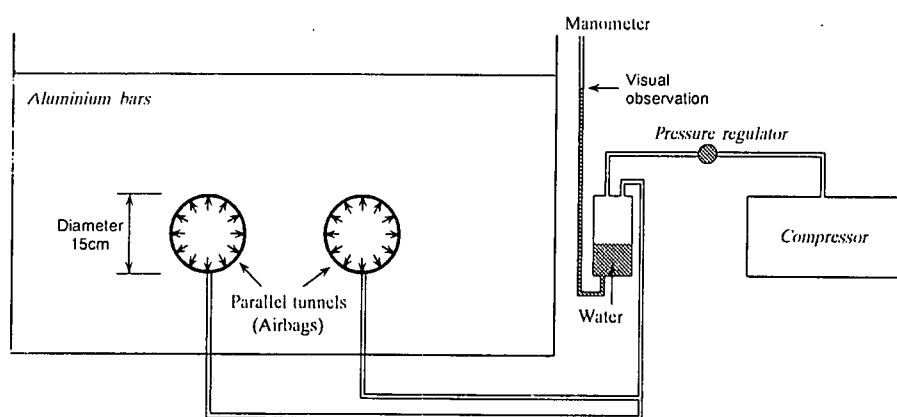


図-2 双設トンネル掘削シミュレーション装置

供試体作成に当たっては、アルミ棒を積み上げる前に掘削するトンネルの部分にアルミ板で作った型枠を設置し、その外側にアルミ棒を積み上げた。その後、変形挙動を観察するためアルミ棒積層体の表面にメッシュ図を描いた。さらに、土圧を測定する場合には、曲げ梁に歪ゲージを装着したタイプの土圧計¹¹⁾を設置位置に挿入した。次に、エアバック内にトンネル中心高さにおける土被り圧と等しい空気圧を作用させ、アルミ棒積層体が変形しない様に注意して型枠を外した。その後、エアバック内の空気圧を同時に低下させトンネルの掘削をシミュレートした。空気圧を低トさせる各段階では、写真撮影により変形量を記録した。また、変形が止まらなくなった状態に達したときの空気圧をもって最小支保圧とし、実験を終了した。また、この実験で用いたアルミ棒は直径1.6mmと直径3mmの2種類を1.67:1の割合で混ぜたもの（単位体積重量 $\gamma=2.18\text{gf/cm}^3$ 、内部摩擦角 $\phi=29^\circ$ 、粘着力 3.0gf/cm^2 ）である。

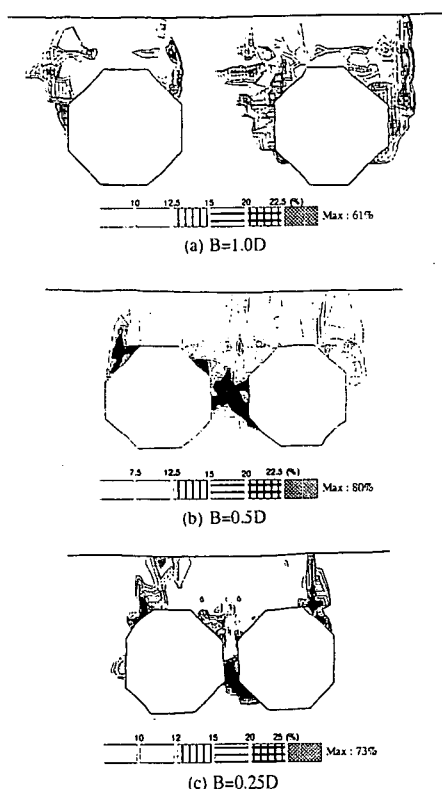


図-3 土被りが浅い場合の最大せん断ひずみ分布図

3. 実験結果：土被りの浅い場合

まず、土被りの浅い場合として、土被り H を1.0Dとし、中壁隔 B を1.0D, 0.5D, 0.25Dとした3つのケースについて実験を行った。それぞれのケースにおける実験の最終段階での最大せん断ひずみ分布図を図-3に示す。

ケース1では、それぞれのトンネルが別々に破壊し、トンネル周囲の変形挙動が互いに影響を及ぼしあっている様子はない。一方、ケース2では中壁がその中心部で破壊し、それぞれのトンネル周囲のひずみ分布は、変形挙動がある程度干渉し始めていると見ることができる。ケース3においては中壁の破壊が下部から進行し、両トンネルの外側の肩部から地表面までせん断ひずみの卓越した領域が発生しており、2つのトンネルが一体となって崩壊していると考えられる。また地表面沈下に関しては、ケース1では中壁直上部はほとんど沈下していなかったが、ケース2、3においては中壁直上における変位が最大であった。

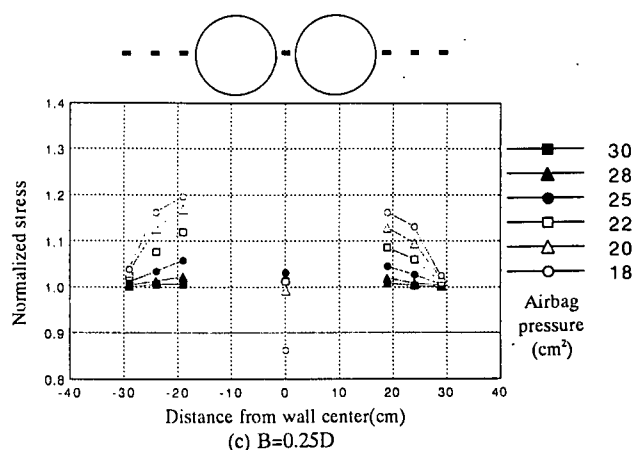
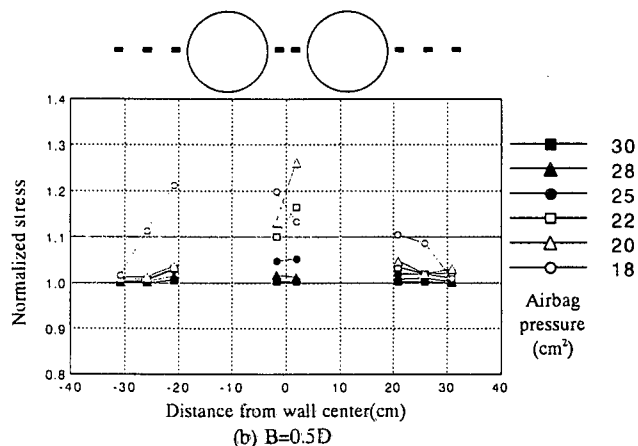
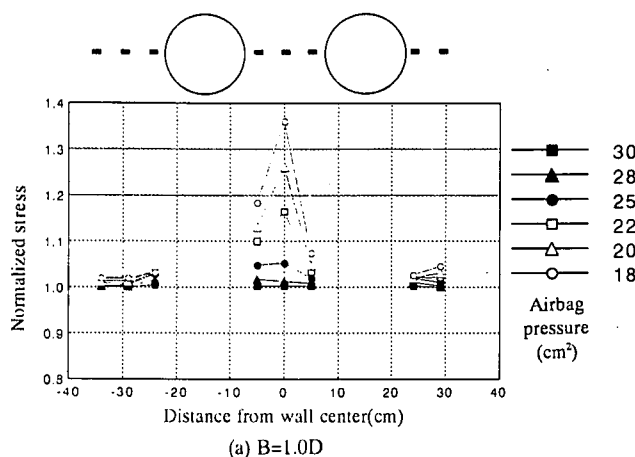


図-4 土被りが浅い場合の土圧計測結果

図-4に各ケースにおける土圧計測の結果を土圧計の設置位置と併せて示す。ここに示した土圧は計測された全土圧をトンネル中心高さにおける土被り圧で正規化したものである。ケース1 ($B=1.0D$) では、トンネル周辺の土圧変化はトンネルの中壁側でも外側でもエアバック内の空気圧が高い時はあまり差はない。しかし、エアバック内の空気圧が低くなってくると徐々にトンネル近辺の土圧が大きくなっていく。さらに中壁の中心部の土圧が最も高くなる。ケース2 ($B=0.5D$) においてはトンネル周辺の土圧はエアバック内の空気圧が減少するにつれて中壁側の値がケース1よりも早い段階から上昇している。これは、トンネル間隔が狭くなったことによる相互の影響によると考えられる。ケース3 ($B=0.25D$) では圧力を下げ始めると中壁の土圧はわずかに増加するが、その後すぐに中壁下部が不安定になり崩壊が始まるので、土圧は大幅に減少する。しかし、中壁と反対側のトンネル周辺の土圧は増加する傾向にある。

図-5に崩壊時のエアバック内の空気圧（最小支保圧）をトンネル中心高さにおける土被り圧（実験初期の空気圧）で正規化したものを示す。崩壊時のエアバック内の空気圧においても、ケース1の時は単独のトンネルの掘削シミュレート実験の崩壊時のエアバック内の空気圧とほぼ同じ結果となっている。ケース2、ケース3とトンネル間隔が小さくなるに従い崩壊時のエアバック内の空気圧が徐々に高くなっていく傾向（即ち崩壊しやすい傾向）が得られた。これは、中壁幅に依存して崩壊のモードが単設トンネルのものから双設トンネル特有のものへと遷移することを意味し、最大せん断びずり分布から推測される崩壊モードの変化を裏付けるものである。

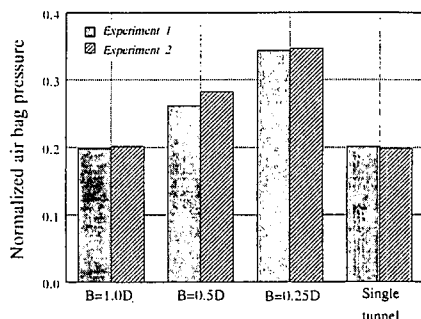


図-5 崩壊時のエアバック内の空気圧

4. 実験結果：土被りの深い場合

次に、土被りの深い場合として、 $H=40\text{cm}$ にして、トンネル間隔 B を $1.0D$, $0.25D$ の2つのパターンで実験を行った。さらに、トンネル間隔が $0.25D$ の時は中壁部を剛性の高い材料で置換した場合についても検討した。それぞれのケースの最大せん断ひずみ分布図を図-6に示す。

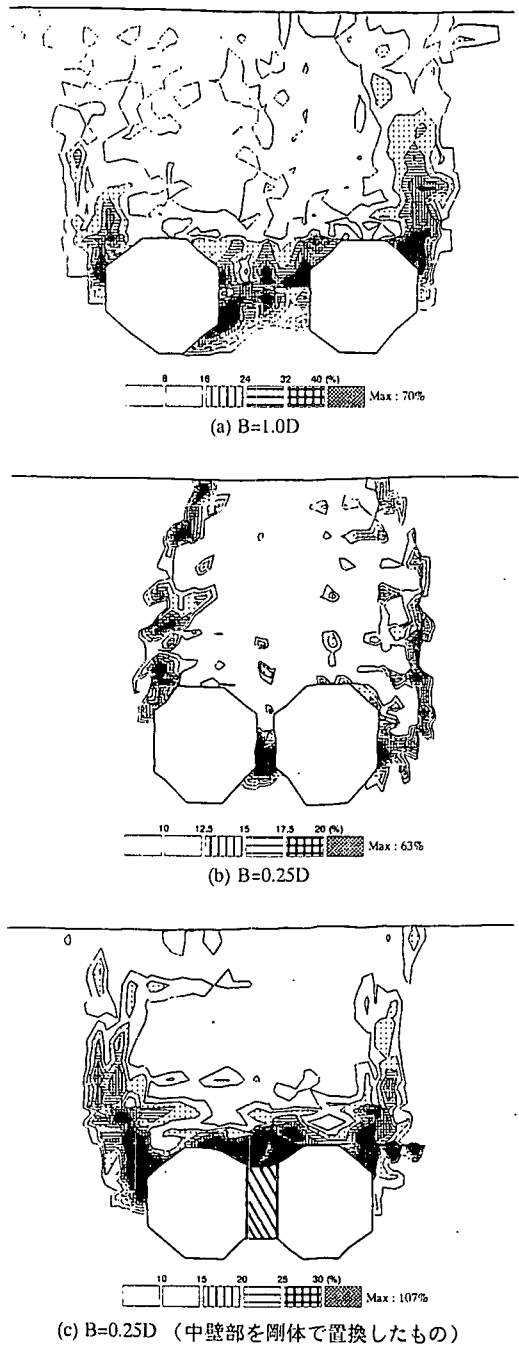


図-6 土被りが深い場合の最大せん断ひずみ分布図

土被りを深くした場合のモデル実験においては、土被りが浅い場合とは異なり、中壁幅 B が $1.0D$ の時（ケース4）においても中壁部を含め2つのトンネルが一体となって破壊の様子が観察された。また、すべり線の形状については、土被りが浅いトンネルで $B=0.5D, 0.25D$ のものと比べると、地表面に近づくにつれて破壊領域が狭くなる様な形状となっている様に思われる。中壁部を剛体に置換した場合（ケース6）においても、中壁の直上部が破壊し、地山材料が双方のトンネルに流れ込んでくる様に崩壊していることが分かる。外側のすべり線においても2つのトンネルを包み込む様なすべり線が表れた。また、地表面沈下においても中壁直上部が最も沈下が大きかった。

5. 考察

双設トンネルにおける相互の影響について、壺内ら⁸⁾は底面摩擦実験を行い、トンネル幅 B を $0.6D$ 以上にすれば、2つのトンネルが独立した形でグランドアーチを形成するとし、杉本ら⁵⁾はエネルギー論を用いて $B=1.7D$ 以下になると双設トンネルとしての安定性を論じなければならないとしており、さらに今田¹²⁾は地山の強度が十分であればトンネルの中心間隔が $2D$ 以上になると、つまり $B=1D$ 以上になると、単独トンネルと考えてよいとしている。しかし、本実験の結果が示すように、双設トンネルにおける相互の影響度は、単純にトンネルの離間距離だけの問題でなく、土被りにも影響されるもの⁷⁾である。ここで、これまでに示した実験における崩壊形態の種別を比較するために各ケースでのトンネル幅と土被りの関係をトンネル径で無次元化したものを図-7に示す。ただし、ここでは新たに崩壊の形態を求めるために実施した追加実験の結果も併記した。図-7において、●はそれぞれのトンネルが互いに影響を及ぼさずことなく単独で崩壊したことを示す。また、■は2つのトンネルが互いに影響を及ぼし合い、全体が一体となって崩壊したケースである。また、▲は崩壊の状況がその中間的なものであったことを示す。これによれば、 B/D と H/D の関係において、双設トンネルが崩壊する形態を二分する遷移領域が存在することが分かる。即ち、ある地盤材料内に双設トンネルを建設する際、支柱幅、土被り、トンネル径の関係がこの遷移領域よりも右側にあれば、トンネル掘削による応力集中により、トンネル周辺（特に中壁部周辺）から破壊が進行し、結果的に双設トンネル全体が一体となって崩壊する現象が起こると考えることができる。また、この実験は実際の覆工を有しないトンネルで実施したものであるから、覆工を有するトンネルの場合は、変形に伴う覆工からの反力が存在するため、遷移領域が現在よりも右側（即ち、応力的にはより厳しい領域）にシフトすることが予想される。従って、図-7に示された遷移領域は、与えられた地盤材料に対して設計的には最も安全側の遷移領域を与えていると考えることができる。

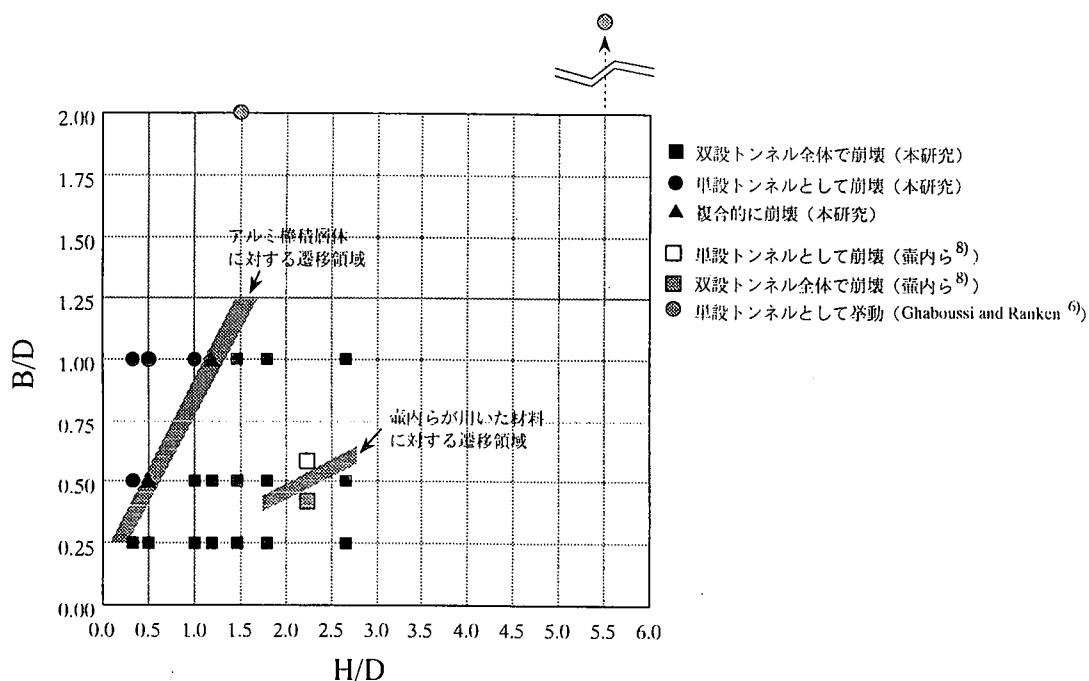


図-7 双設トンネルの崩壊実験における B/D と H/D の関係

ここで、既往の研究の中から双設トンネルの崩壊挙動を検討したもので、支柱幅、土被り、トンネル径のすべての情報が有るものの中からGhaboussi and Ranken⁶⁾と壺内ら³⁾の結果を図-7に併記した。Ghaboussi and Rankenは覆工を有するものと、そうでないものについて行っ双設トンネルの数値解析の結果を総合的に分析した。その結果、H/Dが1.5の場合はB/Dが2.0以上であれば双設トンネルとしての影響は無くなるとし、H/Dが5.5の場合はB/Dがそれ以上でなければならないとした。この結果は、本実験で得たアルミ棒積層体に対する崩壊モードの区分に類似している。また、壺内らは底面摩擦型の装置を用い、単位体積重量 1.9gf/cm^3 、内部摩擦角 37° 、粘着力 0.46kgf/cm^2 の人工材料内に設置した双設トンネル(断面は正方形)の破壊実験を行った。その結果、ある土被りで中壁幅を変化させた時、Bが0.4Dから0.6Dとなるに従い、崩壊の形態が双設トンネルとしての全体破壊から単設トンネルとしての破壊に変化すること指摘している。この場合は、実験に用いた人工材料に対する崩壊モードの遷移領域が図-7に示した位置に存在することが考えられる。

これらの結果と本実験で得られた結果を総合的に比較すると、双設トンネルの崩壊の形態を二分する遷移領域はそれぞれの地盤材料、或いは形状に特有のものとして求めることができ、覆工の応力状態や施工の順序などの詳細な検討を行う際の基礎資料として用いることができることが分かる。

6. おわりに

本報告では、双設トンネルの挙動に関する緒元のうち、中壁幅、土被り、トンネル径の基本パラメータに注目し、無支保の双設トンネルの崩壊実験からその基本的挙動特性に関する実験的検討を行った。その結果、双設トンネルの変形挙動特性は、(中壁幅/トンネル径)と(土被り/トンネル径)の関係において、双設トンネルが崩壊するときの形態を二分する遷移領域が存在することを示し、これがさらに詳細な検討を行う際の参考資料になることに言及した。今後は、このような基本的な実験によって求められた(中壁幅/トンネル径)と(土被り/トンネル径)の関係から崩壊の形態、緩み域の形状、大きさなどに関してさらに詳細な検討を実施する予定である。

参考文献

- 1) Terzaghi, H.: Liner-plate tunnels on the Chicago subway, Proc. ASCE, Vol.68, No.6, pp.862-899, 1942.
- 2) 春山尚、富田忠義、吉村和彦: バイブルーフによる4連めがねトンネルの計測・京葉道路・貝塚トンネル、トンネルと地下、Vol.11, No.9, pp.17-26, 1980.
- 3) 小泉光政、中島康昭: 大断面めがねトンネルの施工・横浜横須賀道路のトンネル、トンネルと地下、Vol.12, No.7, pp.9-18, 1981.
- 4) 伊藤富男、久武勝保: 新設トンネルがそれに平行な既設トンネルの覆工応力に与える影響、土木学会論文報告集、第308号、pp.77-84, 1981.
- 5) 杉本光隆、松本嘉司、西岡隆: エネルギー論に基づく双設トンネルの安定解析、土木学会論文集、第406号、III-11、pp.185-194, 1989.
- 6) Ghaboussi, J. and Ranken, R.E.: Interaction between two parallel tunnels, Int. J. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 1, pp.75-103, 1977.
- 7) 土屋敬、田原昇二: NATMにおける双設トンネルの離隔距離に関する研究、第22回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.396-400, 1990.
- 8) 壺内達也、後藤有志、西岡哲: 近接した双設トンネルの模型実験について、第21回土質工学研究発表会講演論文集、pp.1673-1674, 1986.
- 9) 足立紀尚、木村亮、山口直宏、長田文博: 土砂地山における双設トンネル掘削時の挙動、第24回土質工学研究発表会講演論文集、pp.1695-1698, 1989.
- 10) 櫻井春輔、川嶋幾夫、川端康祝、皿海章雄: 土被りの浅いトンネルの力学的挙動に関するモデル実験、土木学会論文集、No.487, pp.271-274, 1994.
- 11) 丸岡巧: 双設トンネルの力学的挙動に関する基礎的研究、神戸大学大学院自然科学研究科博士前期課程修士論文、1996.
- 12) 今田徹: 岩盤力学入門(11)、トンネルと地下、連載講座、Vol.16, No.12, pp.49-55, 1985.