

拡幅掘削時のトンネル構造と 地山挙動に関する実験的考察

砂金 伸治¹・井上 洸志²・日下 敦³・小出 孝明⁴・巽 義知⁵

¹正会員 東京都立大学 都市環境学部 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

E-mail: nisago@tmu.ac.jp

²正会員 東日本高速道路(株) (〒221-0013 横浜市神奈川区新子安 1-2-4) (元首都大学東京)

E-mail: k.inoue.ai@e-nexco.co.jp

³正会員 国立研究開発法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

E-mail: kusaka@pwri.go.jp

⁴正会員 三井住友建設(株) (〒104-0051 東京都中央区佃 2-1-6) (元土木研究所)

E-mail: tkoide@smcon.co.jp

⁵正会員 国立研究開発法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

E-mail: tatsumi-y173bt@pwri.go.jp

近年, 既設トンネルの断面を拡幅する必要性が高まっている. しかし, 現状での拡幅時の設計方法や施工方法は個々の工事で独自に検討されており, 特に定められた手法がなく, より合理的な拡幅時の設計法等の確立が求められている. 以上の背景を踏まえ, 本研究では, 既設トンネルを拡幅する際に必要となる支保構造の考え方を明確化することを目標とし, 拡幅掘削時におけるトンネル構造や地山の基本的な挙動を把握するために模型実験を行った. その結果, 本研究では拡幅掘削によるトンネル構造や地山の挙動を把握でき, 地山に塑性領域が存在しない場合と, 既設トンネルのゆるみ領域内を掘削すると考えられる場合の拡幅トンネルの支保の設計は, 拡幅側のトンネルの標準支保パターンを使用することで構造上の問題は少ないことを実験的に明らかにした.

Key Words: tunnel, widening excavation, model experiment, underground stress, support design

1. 序論

近年の車両の大型化や交通量の増大に伴って, トンネル内での車両のすれ違いや歩行者の通行が困難な断面の狭いトンネルが増えてきている. また, 老朽化や地山状態の変化などにより, 覆工コンクリート等に変状が発生し, 覆工を打ち直すなどの改築に迫られるトンネルなど, 既設トンネルを断面拡幅・改築する必要性が高まっている. しかし, 通常のトンネルの掘削におけるゆるみ領域, 作用荷重といった力学的なメカニズムは多く研究されている一方, 既設トンネルの支保構造を含めて地山部分を撤去し, 拡幅した場合における地山の応力再配分等に挙げられる地山に関する挙動, 地表面等を含む周辺へおよび影響, また, 改築されるトンネルに必要なと考えられる構造諸元に関しては不明確な点が多く残されている. そのため, 現状での断面拡幅・改築時のトンネル支保構造は, 新設トンネルの設計方法に準拠した支保構造を採

用している場合が多く, 施工方法や設計方法は個々の工事でも独自に検討されており, 特に定められた手法がないのが現状である. したがって, 既設トンネルが存在することにより, それ自体を先進導坑として想定しうることの効果や, 既設トンネルの掘削によりトンネル周辺部に発生する緩み領域の存在などを考慮した場合の効果など, より合理的な拡幅時の設計法等の確立にあたっての検討が求められている.

筆者らは, 既設トンネルが存在することによる, それ自体の導坑としての効果や, 既設トンネルの掘削によりトンネル周辺部に発生するゆるみ領域の存在などを考慮した, より合理的な拡幅時の設計法等の確立が求められていることから, 既設トンネルを拡幅した後に必要な支保構造の考え方を明確化することを目標とした検討を実施してきている¹⁾²⁾. 本研究では, 拡幅掘削時におけるトンネル構造や地山の挙動を把握するために過去の模型実験結果を用いた数値解析を実施するとともに, 簡

易な模型実験により力学的現象の検討を行った。

具体的には、地中応力が発生している条件下でトンネルの断面を拡張する場合における断面の力学的挙動を把握する目的で、二次元載荷装置を用いた実験によって拡張掘削による地山のひずみを計測し地山の挙動を確認し、その再現解析を行うことで、実験結果の妥当性の確認を行った。引き続き、上述と同様の現象である、重力場においてトンネルの断面を拡張する場合におけるトンネル構造の力学的挙動を把握する現象を実験室レベルでより簡易に再現することを目標に、アルミ棒積層体を地山材料とした二次元模型実験によって拡張掘削によるトンネル構造に作用するひずみを計測しその挙動を確認した。

2. 二次元載荷装置を用いた実験

(1) 実験方法

地中応力が発生している条件下でトンネルの断面を拡張する場合における断面の力学的挙動を把握する目的で二次元載荷装置を用いて拡張を模擬した実験を行った²⁾。図-1に実験の概要図を示す。実験では装置内に貧配合モルタルを充填して地山を模擬し、小口径の円形の掘削に続く形で大口径の円形を拡張する形で掘削を行い、各掘削時の地山内のひずみの分布や載荷重等を測定して拡張掘削による地山の挙動を把握した。地山には荷重として、載荷装置上方に設置した3本の油圧ジャッキにより一定の荷重(20kN×3台=60kN)を作用させ地山の条件を模擬した。

(2) 実験ケース

実験ではトンネルを模擬した直径180mmの円形を掘削することに続けて、直径300mmの円形となるように掘削する方法と、一度に直径300mmの円形を掘削する方法の2通りの掘削方法を各2回の計4ケース行った。表-1に実験ケースを示す。

(3) 実験結果

実験結果の代表例として図-2にCase3、Case4の掘削前の初期作用ひずみ分布の結果を示す。比較は載荷装置中心から半径220mmの円周上のひずみの値を検討することで行った。これより、載荷装置上方に設置した3本の油圧ジャッキにより一定の荷重(20kN×3台=60kN)まで載荷して実験を行ったが、初期のひずみにばらつきがみられている。これは、模擬地山を掘削する際に地山が相応に自立させる必要があったことから荷重を低めに設定したことが関連していると考えられる。一方で、地山は概ね弾性挙動を示す状態であったと考えることもできる。以降のひずみの変化を考慮すると本実験では地山

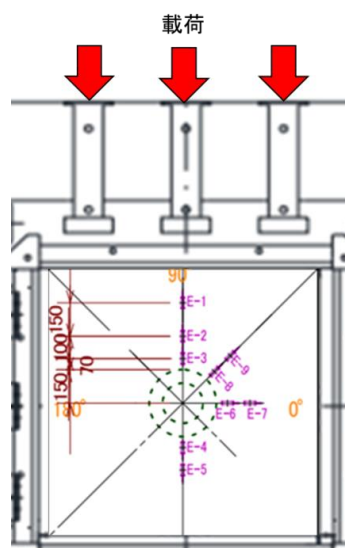


図-1 実験概要図

表-1 実験ケース

	掘削方法		地盤強度	掘削時荷重 (3台合計)
	φ180mm	φ300mm	N/mm ²	kN
Case 1	1回目	2回目	0.578	60
Case 2	-----	1回目	0.630	60
Case 3	1回目	2回目	0.677	60
Case 4	-----	1回目	0.345	60

が概ね弾性挙動を示す状態であったと考えられる。

図-3にCase3、Case4における半径320mm円周上の増分ひずみの結果を示す。ひずみの値は両ケースで明確な差がなかった。このことは、既設の空洞がある状態で地山を掘削する場合、既設の地山が弾性範囲の挙動を示していると思えることができ、塑性領域の影響が小さいと考えられる条件下では、新たに拡張する空洞によって、緩み領域が大きく広がることは考えにくく、その掘削後の断面積を有する新設トンネルにおいては、もともとその断面積を有するトンネルに対して適用される標準支保パターンを使用すれば構造上の問題は少ないと考えられる。

3. 有限要素法(FEM)による二次元載荷装置を用いた実験の評価

(1) 解析モデル

前章で述べた実験を再現するために有限要素法により数値解析を実施した。

図-4に用いたモデルの全体図とその寸法に関して示す。地山の解析モデルには平面ひずみ要素を用いた。また、解析に用いた諸元は前章の実験による値を参考に設定した。表-2に地山の解析物性値を示す。載荷点における荷重と変位の関係が実験結果と解析値で概ね等しく

なるように、平面ひずみ要素のパラメータである弾性係数 E 、ポアソン比 ν 、粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ の物性値をトライアルで設定した弾塑性解析を行った。なお、本研究で行った二次元載荷装置を用いた実験において、重力による影響は無視できるため、平面ひずみ要素の単位体積重量は 0kN/m^3 とした。

図-5 に境界条件および荷重条件を示す。境界条件は、底面を水平ローラー支持、側面を鉛直ローラー支持とし

た。なお、荷重条件は、実験と同様に模擬地山の上部にジャッキによる軸力を等分布荷重として与えた。

本解析では2種類の解析ステップを実施した。それぞれの解析ステップを図-6、図-7に示す。解析ステップ1はいわゆる予め存在した断面を拡幅して施工したケースを再現しているケース（以降「拡幅掘削」と称する）であり、解析ステップ2は1度に通常断面を掘削しているケース（以降「通常掘削」と称する）である。

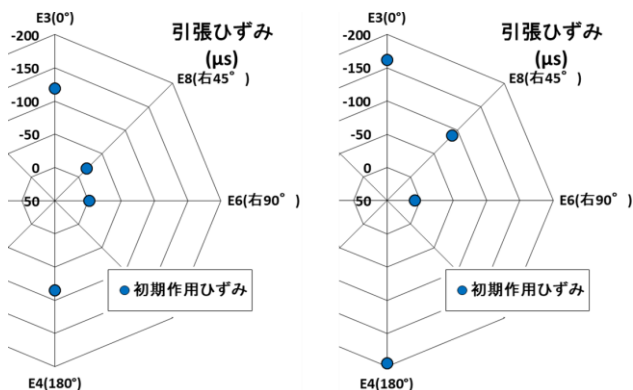


図-2 半径220mm初期作用ひずみ
(左: Case 3 右: Case 4)

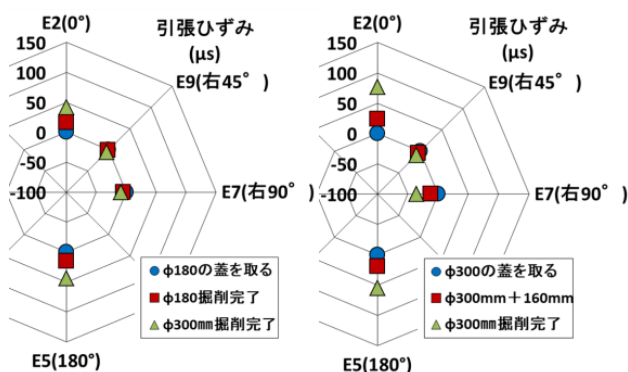


図-3 半径320mm円周上増分ひずみ
(左: Case 3 右: Case 4)

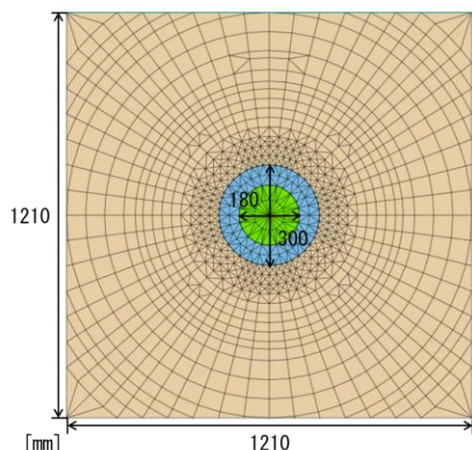


図-4 解析モデル全体図

表-2 地山の解析物性値

弾性係数 (GPa)	E	0.0233
ポアソン比	ν	0.2
単位体積重量 (kN/m^3)	γ	0
粘着力 (kN/m^2)	c	60
内部摩擦角 (deg)	ϕ	30

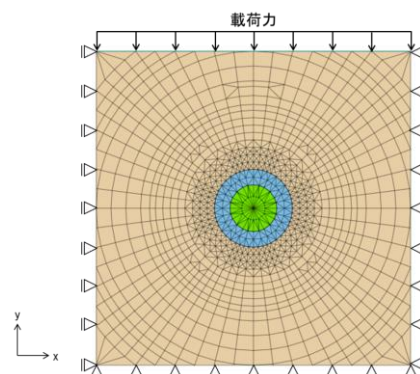


図-5 境界条件および荷重条件

STEP1,2	STEP3	STEP4	STEP5
地山	地山	地山	地山
地山自重計算 変位初期化	地山自重計算 変位初期化	地山自重計算 変位初期化	地山自重計算 変位初期化
	載荷 (60kN)	$\phi=180\text{mm}$ 掘削	$\phi=300\text{mm}$ 掘削

図-6 解析ステップ1「拡幅掘削」

STEP1,2	STEP3	STEP4
地山	地山	地山
地山自重計算 変位初期化	地山自重計算 変位初期化	地山自重計算 変位初期化
	載荷 (60kN)	$\phi=300\text{mm}$ 掘削

図-7 解析ステップ2「通常掘削」

(2) 解析結果

解析では各ステップ毎で地山内に塑性領域が現れるかについて、ひずみ等の値を比較して検討を行った。その結果、いずれの解析ステップにおいても塑性領域が存在していないことが分かった。したがって、解析ステップ1と解析ステップ2において、塑性域を考慮しても最終的な変位や応力の結果に差は出なかった。このことは前章の実験結果の再現としては、塑性領域が現れておらず、前章の実験結果に基づく考察に妥当性が見い出せることが考えられる。

4. アルミ棒地山を用いた二次元模型実験

前述までの実験および解析は2種類の掘削方法である「拡幅掘削」と「通常掘削」に着目し、それぞれの場合のトンネル構造に発生する断面力等にくわえ、掘削に伴う模擬地山の挙動を比較したものである。しかしながら、荷重が相応の実験において、地山の塑性化を簡便に再現することは制約があるとともに、また、弾性内の挙動であっても、再現性を担保した状態で実験を行う手法の確立が望まれる。そこで本章ではより簡便な手法の検討を通じて、重力場においてトンネルの断面を拡幅する場合におけるトンネル構造の力学的挙動を把握する目的で二次元模型実験を行い、拡幅による構造に生じるひずみの傾向を把握するとともに、模擬地山の挙動を把握することを試みた。

(1) 実験材料

地山材料には、簡便で再現性も期待できることや一般の砂の内部摩擦角に近いこと³⁾などによりアルミ棒積層体を使用した。表-3に使用したアルミ棒の諸元について示す。トンネル模型は、弾性係数が2802N/mm²の硬質塩化ビニル管を用いており、奥行100mm、直径は既設トンネルでは60mm、拡幅トンネルでは89mmで、3/4円に加工したものを用いた。

表-3 地盤材料（アルミ棒）の物性値

材質	アルミ合金
長さ(mm)	100
径(mm)	1.6:3.0
重量比	3:2
内部摩擦角(°)	30
粘着力(N/mm ²)	0
単位体積重量(N/mm ³)	2.15×10^{-5}

(2) 実験方法

実験では図-8に示す2種類の掘削方法「拡幅掘削」および「通常掘削」によるケースを実施し、その結果を比較した。とくに拡幅掘削では、直径60mmの既設トンネル模型を設置し、その模型に巻いたテフロンシートを引き抜くことで内空変位を起こし既設トンネルの掘削を模擬した後、直径89mmの拡幅トンネル模型をアルミ棒地山に押し入れることで断面の拡幅を再現することを試みた。そして、押し入れた直径89mmの掘削を模擬し、掘削時のトンネル模型に作用するひずみを測定することで拡幅掘削によるトンネル構造のひずみの傾向を把握することにした。なお、直径60mmのトンネル模型には0.3mmテフロンシートを4枚で1.2mm、直径89mmのトンネル模型には0.3mmテフロンシートを6枚で1.8mmの内空変位を発生させた。なお、「通常掘削」については直径89mmのトンネル模型を一度に掘削することを模擬して実験を行った。

(3) 実験結果

図-9に拡幅掘削において、拡幅トンネルを押し入れて設置した段階におけるアルミ棒変位の図を示す。図中に示す白線の内側は既設トンネルで発生させた内空変位である1.2mm以上の変位をトンネル中心方向に起こしている。この範囲は既設トンネルの掘削模擬と、拡幅トンネルを押し入れることによって発生したゆるみ領域と考えることができる。

図-10に内空変位を与えるごとの圧縮ひずみの推移を示す。通常掘削の場合では、内空変位を与えるごとに徐々にトンネル模型に作用する地山荷重による圧縮ひずみが減少していき、内空変位が0.9mm以降は圧縮ひずみの減少は緩やかになっていった。

図-11に示す支保工と地山の相互作用の図より、トンネルの安定は地山特性曲線と支保工の特性曲線が交わった点で得られることが示されている⁴⁾。今回の結果においても、ある程度内空変位を与えた段階で支保圧が収束する点があり、そこから内空変位を強制的に与えても圧縮ひずみが増加しなかったと考えられる。一方、拡幅

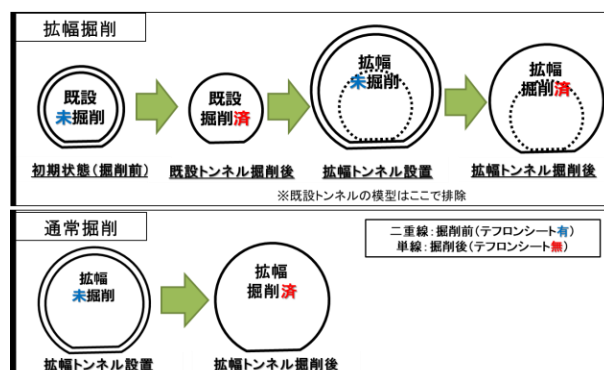


図-8 実験方法

掘削の場合では、直径 89mm のトンネル模型を押入れた段階でトンネル模型に作用する圧縮ひずみは既に減少しており、その後、内空変位を与えることによって起こる圧縮ひずみの減少はなく、そのひずみの値は通常掘削の場合と明確な差異はなかった。つまり、既設トンネルの

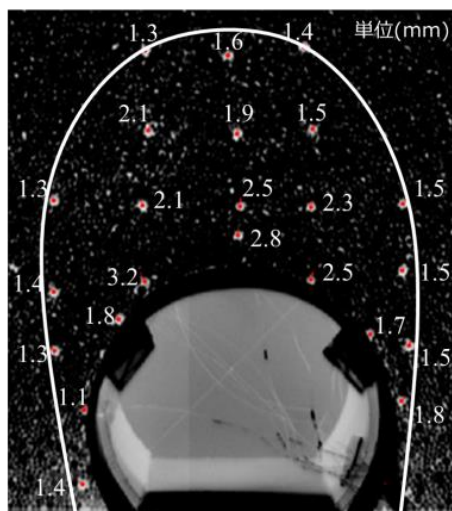


図-9 拡幅トンネル設置時アルミ棒変位
(拡幅掘削)

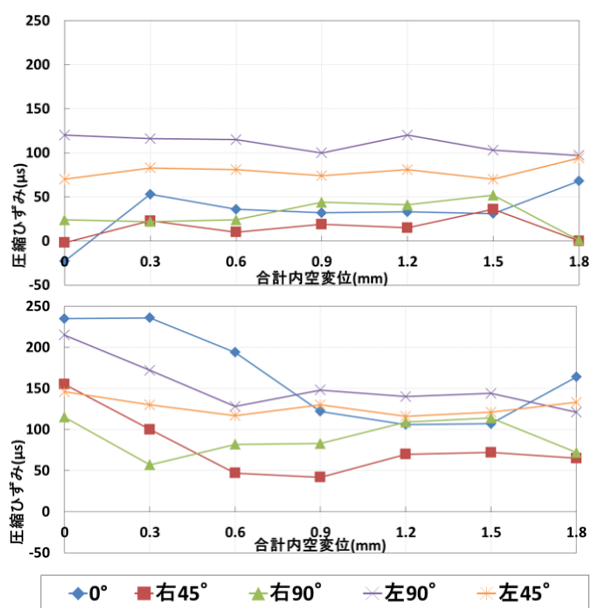


図-10 圧縮ひずみの推移
(上: 拡幅掘削 下: 通常掘削)

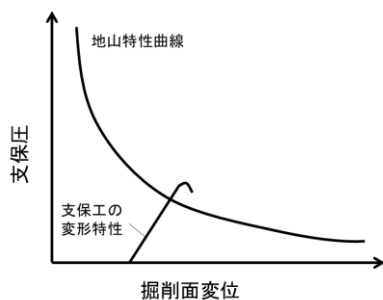


図-11 支保工と地山の相互作用

掘削によるゆるみ領域の発生によって、拡幅トンネルの支保構造に働く応力は減少されるが、その減少される値は、その断面積の新設トンネルの掘削により減少される支保構造に働く応力の値と大きな差は生じないと考えられた。

したがって、既設トンネルのゆるみ領域内で拡幅掘削を行う際の支保の規模は、同じ断面の新設トンネルを掘削する際に適用される標準支保パターンを使用すれば構造上の問題は少ないことを異なる実験手法によって明らかにした。

本検討では、地山に塑性領域が発生していない、または発生していてもその影響が小さいと考えられる場合に成立すると考えられる結果と考えられる。ただし、本検討は断面の大きさと塑性領域の関係に依存すること、また、そもそも地山の強度が相応に存在せず、緩み領域が掘削によって助長される場合においては別途検討が必要であると考えられる。加えて、支保工と地山の相互作用を地山特性曲線の考えによって検討する場合、拡幅掘削を行おうとする地山が特性曲線上でどのように示されるかの検討が必要であると考えられる。

5. 結論

本研究では、既設トンネルを拡幅する際に必要となる支保構造の考え方を明確化することを目標とし、模型実験を通じて、拡幅掘削時におけるトンネル構造や地山の基本的な挙動を把握することを試みた。以下に本研究の結論を示す。

- 二次元載荷装置を用いた実験から、塑性領域が存在しないような条件下では、拡幅トンネルの支保構造は、その掘削後の断面積を有する新設トンネルに適用される標準支保パターンを使用すれば構造上の問題は少ない可能性が考えられることが明らかになった。言い換えれば、このような条件下では、既設トンネルが存在することにより、親切側のトンネルに施工する支保を軽減させられる効果があるかどうかは、さらなる検討が必要であると考えられる。
- アルミ棒地山を用いた二次元模型実験から、テフロンシートを引き抜きにより内空変位を与えることで、地山材料として用いたアルミ棒地山がトンネル中心方向に変位し、掘削の再現が可能であることが確認でき、それにより「通常掘削」と「拡幅掘削」の影響の検討の可能性を見いだすことができた。
- 既設トンネルのゆるみ領域の範囲内で拡幅掘削を

行うと判断できる場合の支保の規模は、同じ断面の新設トンネルを掘削する場合に適用される標準支保パターンを使用すれば構造上の問題は少ない可能性があることが分かった。

本研究の結果、掘削による支保構造に発生する応力の推移には差異を生じる可能性があるが、通常掘削と拡幅掘削の最終的な支保構造に働く応力の値に大きな差はなく、拡幅掘削を行う際の、安全側の検討に対して一定の示唆を与えられと考えられる。一方で、著しく塑性化した領域を掘削する場合、また、先行掘削にともなう3次元的效果による影響に関してさらなる検討が必要であると考えられる。また、アルミ棒積層体地山を用いた実験における拡幅掘削の再現の整合性に関しては、今後も実験の再現性を含め、さらなる検討が必要である。

参考文献

- 1) 小出孝明, 日下敦, 吉岡知哉, 砂金伸治: トンネル更新時の拡大掘削における支保構造に関する解析的検討, トンネル工学報告集, 第28巻, 1-45, pp.1-5, 2018.
- 2) 小出孝明, 日下敦, 巽義知, 砂金伸治: 既設トンネルの断面を拡大する掘削における周辺地山の挙動に関する実験的検討, 第74回土木学会年次学術講演会概要集, 2019.
- 3) 村山朔朗: 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, No.11B, pp.123-138, 1968.
- 4) 今田徹: 山岳トンネル設計の考え方, 土木工学社, pp.64-65, 2010.

(2020.8.7 受付)

EXPERIMENTAL CONSIDERATION OF TUNNEL STRUCTURE AND GROUND BEHAVIOR IN WIDENING SECTION

Nobuharu ISAGO, Koshi INOUE, Atsushi KUSAKA, Takaaki KOIDE and Yoshitomo TATSUMI

In recent years, the necessity of widening the cross section of the existing tunnel has been increasing. However, the current design and construction methods at the time of widening are individually studied in each construction work, and there is no specific method, and it is required to establish a more rational design method at the time of widening. . Based on the above background, the purpose of this study is to clarify the concept of the support structure required for widening the existing tunnel, and to grasp the basic behavior of the tunnel structure and ground during widening excavation. For this purpose, a model experiment was conducted. As a result, in this study, the behavior of the tunnel structure and the ground due to widening excavation can be grasped, and the design of the support of the widening tunnel when there is no plastic region in the ground and when excavating in the loose area caused by excavation of the existing tunnel, It was clarified that there were few structural problems by using the standard support pattern of the tunnel on the widening side.