

柔構造を保有するトンネルの挙動に関する考察

砂金 伸治¹・真下 英人¹・日下 敦¹

¹正会員 独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
E-mail:n-isago@pwri.go.jp

近年、地山条件が不利な状況でのトンネルの施工事例が増加しているが、現在のトンネル構造において過大な外力の作用に伴う変形が生じる場合は、その変形等に対してトンネル構造が追従することができない。本研究では、過大な外力や変形に対して追従できるような吸収機構を持つ柔なトンネル構造を想定し、模型実験を通じてその基本的なメカニズムの解明を試みた。

その結果、吸収機構をトンネルが持つことにより、構造に発生するひび割れの位置や発生荷重に影響が及ぼされること、発生するひずみが構造全体では緩和される傾向があること、また地山の特性によってその効果の発現が異なることを実験的に明らかにした。

Key Words : tunnel, large deformation, support, compressible elements, model test

1. はじめに

近年、膨張性の地山に挙げられる、地山条件が不利な状況でのトンネルの施工事例が増加している。このような場合、トンネル構造に作用する外力に対して地山の変形を許容し、作用する外力を「いなす」ことによる対応と、生じる変形を抑制するために支保構造の剛性を高くする対応があり、現在は後者による方法が多く採られていると考えられる。一方、大規模地震の発生時にはトンネル構造に過大な外力が作用し、覆工コンクリートの崩落等の被害が発生した事例^{1)~2)}も見られ、被害発生メカニズムの解明がなされてきている^{3)~4)}。覆工の崩落現象が生じる理由の1つとして、地山の変形とトンネルの変形に差が生じていることが考えられる。このように、現在のトンネル構造は地山等から過大な外力が作用して変形を生じる場合、それに対して構造自体の挙動が追従することができないため、トンネルが構造として荷重を受け持っているといえる。

しかし、トンネル構造が変形や外力に追従できるといったことが可能となれば、トンネル構造が破壊する時点での変形量または外力を大きく確保出来ると見なせる可能性がある。我が国のようなトンネル数が多く、かつ、厳しい施工条件・自然条件下において、より安全なトンネル構造を構築するためには、施工性、安全性、地山の挙動といった種々の観点に加え、経済性にも留意しなければならないといった課題はあるものの、1つの方策として現在のトンネル構造のあり方を見直すことが考えら

れる。

筆者らは過大な変形や外力に耐えうるトンネル構造を構築する場合に、現在の剛性を高めて対応する「剛な」トンネル構造に対し、構造的になるべくシンプルな形で過大な変形や外力に追従できるような機構を持つ「柔な」トンネル構造を考え、それぞれの変形性能や耐荷力といった力学的特性の差異や挙動のメカニズムの解明を模型実験を通じて検討を行っている⁵⁾。本稿では模型地山や吸収機構について、新たに検討を行った結果について報告する。

2. 実験方法

(1) 実験の概要

本研究では写真-1に示す土木研究所の二次元載荷試験装置⁶⁾を使用し、過大な外力が作用すると想定した場合

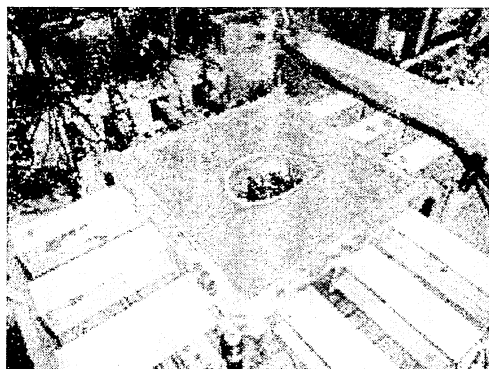


写真-1 二次元載荷試験装置の概要と実験状況

のトンネル構造の挙動に関して検討を行った。実験土槽の中央部にトンネル構造を模擬したモルタル製の供試体(以下、トンネル供試体)を設置し、その外側に地山を模擬した所定の材料(以下、模型地山)を配置し、さらに装置に蓋をかぶせた後に、反力フレームの1面からジャッキにより载荷を行った。

(2) 模型地山

模型地山は標準砂または貧配合モルタルの2種を使用した。標準砂による土槽の作製は、標準砂を空中落下させて行い、投入した砂の密度を管理した。実験における密度は $1.36\sim 1.43\text{g/cm}^3$ であった。貧配合モルタルによる土槽の作製は表-1の配合をもとに4日間の養生の後に実験を行った。

(3) トンネル供試体

表-2にトンネル供試体を使用したモルタルの配合、図-1に概略の寸法を示す。トンネル供試体は2車線トンネル相当断面の概ね1/20の大きさと形状を模擬し、アーチ部は単心円とした。また、アーチからインバートに対するすり付け部分の増厚は施していない。なお、本研究では図-1内に斜字で示すようにトンネル供試体の右側のスプリングラインの部分を0度とし、反時計回りに角度を定義した。トンネル供試体は、別途強度管理や供試体の特性を把握するための一軸圧縮試験用のテストピースを作製し、脱型や実験は所定の強度として概ね 18N/mm^2 に達した以降で実施した。

本研究では、現在の通常の状況で構築されているトンネル構造を「剛な」トンネル構造(以下、剛構造)と称し、剛構造に対して変位や外力への追従を期待する「吸収機構」を配置した「柔な」トンネル構造(以下、柔構造)を考え、剛構造と柔構造の挙動の比較を行った。吸収機構の模擬の方法は、市販の合成ゴム⁹⁾、また、写真-2に示す中空アルミ棒をトンネル供試体に配置することで行った。合成ゴムは大きさが $10\text{mm}\times 20\text{mm}\times 295\text{mm}$ の棒状になるように、また、中空アルミ棒に関しては $10\text{mm}\times 19\text{mm}\times 300\text{mm}$ の筒状になるように準備し、後述する実験ケースに応じて供試体の25度、90度、155度の2箇所または3箇所に挿入した。なお、トンネル供試体と吸収機構は市販の接着剤にて接合した。

(4) 計測項目および方法

本研究ではトンネル供試体のひずみをアーチ部で13箇所の表裏で26点、インバートが存在するケースでインバート部で3箇所の表裏で6点を加えて計測し、また、変位は6箇所で計測を行った。

トンネル供試体に対する载荷は写真-1に示した载荷装

表-1 貧配合モルタルの配合

W/C(%)	単位量(kg/m^3)		
	セメント	水	砂
1.918	55	105.5	1000

表-2 トンネル供試体のモルタルの配合

材齢28日の 目標強度 (N/mm^2)	W/C(%)	単位量(kg/m^3)			
		セメント	水	細骨材	混和剤 (AE減水剤)
18	66.8	352	235	1575	3.52

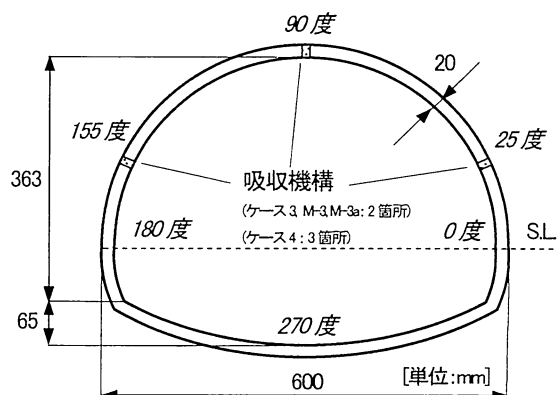


図-1 トンネル供試体の概略寸法



写真-2 吸収機構の模擬(中空アルミ棒と設置状況)

置に蓋をのせた形で実施した。その際の開口部はトンネル供試体よりも小さいため、ひびわれの観察は内面側の観察可能な範囲を直接目視し、ひび割れの発生荷重を記録した。計測機器等の存在で目視が不可能な場合、また、外面側の観察は、実験終了後にひずみの計測結果に基づきひび割れの発生荷重や位置を総合的に判断した。

(5) 実験ケースおよび载荷方法

表-3に本研究で実施した実験ケースの内容を示す。実験ではトンネル供試体に対して鉛直方向から荷重が作用した場合の、剛構造および柔構造に関するひび割れ、変形、ひずみおよび破壊の状況を把握し、その差異を検討した。基本となるケースとして、吸収機構が配置されていないケースを設定した。特にケース1およびケース2に対してはそれぞれ2回実施し、それぞれケース1-1、1-2、またはケース2-1、2-2と称した。ケース1-1およびケース1-2はインバートが存在しないケースで、模型地山の安定を保つために底盤に鋼板を設置して砂が流入しないようにして実験を行った。

3. 実験結果～各材料等の特性

(1) トンネル供試体等の特性

表-4にトンネル供試体の材料特性として実験ケース毎の一軸圧縮強度、ヤング率、ポアソン比および引張強度を示す。引張強度はコンクリートの割裂引張強度試験により算定した。

(2) 吸収機構の変形特性

吸収機構に用いた材料の変形特性について、合成ゴムに対しては10cm四方で厚さ1cmのゴム板を準備し、それに載荷し、応力とひずみの関係を算出した。ここでいうひずみとは合成ゴムの厚さ1cmに対してゴムが収縮した量を、みかけのひずみ量として換算して算定したものである。図-2(a)に本実験で用いた合成ゴムの応力とみかけのひずみの関係を示す。なお、試験はNo.1～3に示す3体で実施した。合成ゴムは載荷するひずみが増加するにしたがって剛性が増加する特徴を持ち、挙動は非線形となる。今回の実験ではトンネル供試体の強度が表-4に示すように概ね18～28N/mm²を対象にしていることから、合成ゴムのヤング率を仮定するならば、モルタルのヤング率の1000分の1程度のオーダーとなるE=20～30MPa程度が一つの目安と考えられる。

中空アルミ棒に対しては上述した写真-2に示した中空アルミ棒のみを準備し、それに載荷し、応力とひずみの関係を算出した。ここでいうひずみとは中空アルミ棒の高さに対して中空アルミ棒が圧縮された変位量を、みかけのひずみ量として換算したものである。図-2(b)に本実験で用いた中空アルミ棒の応力とみかけのひずみの関係を示す。試験は合成ゴムの場合と同様に3体で実施した。中空アルミ棒は比較的小さいひずみまでは応力が増加するが、いったんそこで応力が低下する。これは部材が座屈を生じることによるものと考えられる。また、最終的な破壊に至る際に再度応力が増加する特性がある。応力が座屈を生じる前の20N/mm²程度に達するまでは比較的剛性は高い。中空アルミ棒のヤング率を仮定するならば、モルタルのヤング率の10～20分の1程度のオーダーとなるE=1000MPa程度が一つの目安として考えられる。

(3) 模型地山の変形特性

実験を行う模型地山の特性を把握するために、トンネル供試体を設置しない状態で標準砂または貧配合モルタルのみの模型地山のみに載荷する形で、ジャッキの載荷面の平均変位と載荷荷重の合計との関係を把握した。図-3(a)～(b)にその結果を示す。試験は標準砂に関してはNo.1～2に示すように2回、貧配合モルタルに関しては1回実施した。

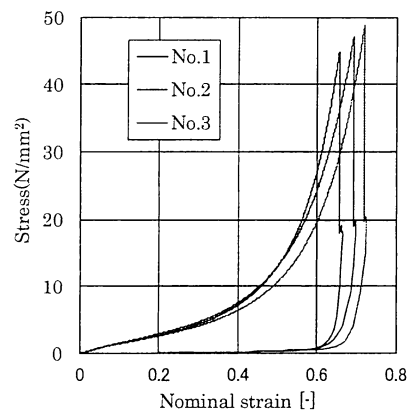
表-3 実験ケース一覧

No.	インバート	吸収機構位置 (材質等)	模型地山材料	荷重
1-1, 1-2	なし	—	乾燥砂	鉛直
2-1, 2-2	あり	—	乾燥砂	鉛直
3	あり	25,155(合成ゴム)	乾燥砂	鉛直
4	あり	25,90,155(合成ゴム)	乾燥砂	鉛直
M-2	あり	—	貧配合モルタル	鉛直
M-3	あり	25,155(合成ゴム)	貧配合モルタル	鉛直
M-3a	あり	25,155(中空アルミ棒)	貧配合モルタル	鉛直

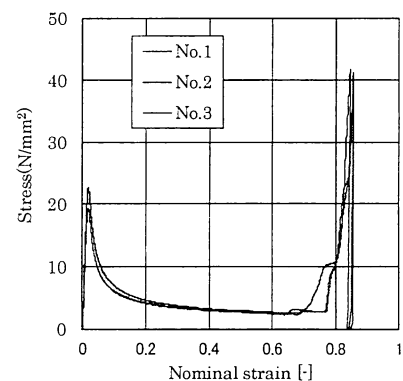
表-4 トンネル供試体の材料特性

ケースNo.	一軸圧縮強度 [N/mm ²]	ヤング率 [kN/mm ²]	ポアソン比 —	引張強度 [N/mm ²]
1-1	27.54	16.89	0.19	1.64
1-2	27.87	16.82	0.20	2.59
2-1	25.08	16.35	0.20	2.16
2-2	25.84	17.39	0.21	2.49
3	21.07	13.58	0.17	1.69
4	21.07	13.58	0.17	1.69
M-2	17.70	14.19	0.20	2.31
M-3	18.95	15.37	0.20	1.96
M-3a	19.78	15.65	0.19	1.95

(注)ケース3, 4は同一の実験実施日のため強度が同一



(a) 合成ゴムの変形特性



(b) 中空アルミ棒の変形特性

図-2 吸収機構の変形特性

これより、変位が小さい段階と大きい段階で模型地山の変形の特性が異なる。また、標準砂と貧配合モルタルの場合でも変形の特性が異なっている。両者とも全体的には曲線状の関係を示すため、一概に直線で近似することは課題があるものの、標準砂に関しては、載荷面の平

均変位が0～15mm程度まで、すなわち載荷荷重の合計が40～70kNに達する程度までは、見かけの変形係数は8～16MPa程度、また、平均変位が20mm以上では、見かけの変形係数は78～94MPa程度を有していたと考えることができ、実験の初期に対する終期の見かけの変形係数は10倍程度の差がある。また貧配合モルタルの場合に関しては、載荷面の平均変位が0～5mmの場合で $E=253\text{MPa}$ 程度、また、平均変位が5～24mmでは $E=133\text{MPa}$ 程度と、実験の初期に対する終期の見かけの変形係数は0.5倍程度の差が生じた。

4. 実験結果～トンネル供試体の挙動

(1) ひずみの変化の傾向

図-4に載荷荷重の合計が300kNの場合のひずみの断面方向の変化の分布を示す。25, 90, 155度の黒線は吸収機構が存在する場合のその位置を示す。

a) 模型地山材料による影響(ケース2およびM-2など)

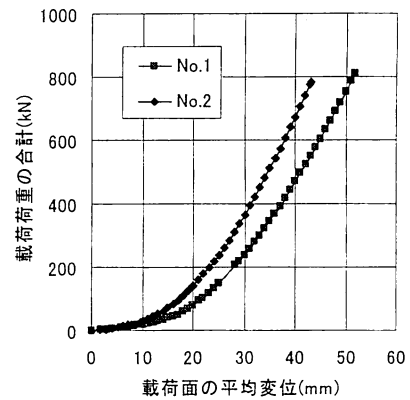
図-4(a)および(b)より、ひずみの全体的な変化の傾向は模型地山を貧配合モルタルにした場合が、標準砂を用いた場合より同一の荷重でばらつきが小さい。貧配合モルタルを用いると標準砂の場合に比較して同一の載荷荷重において生じる平均変位が小さく、ひずみの値が小さくなる可能性があるが、耐荷力を検討するためには地山の材料の影響を考慮した上で検討を行う必要がある。

b) インバートの存在による影響(ケース1および2)

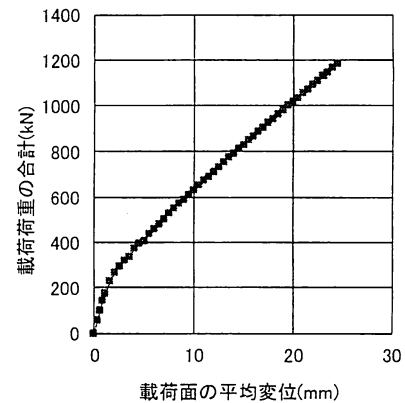
インバートを設置したケース2-1ではケース1-2と比較して15度や165度等の側壁部のひずみが小さくなる傾向がある。これはインバートの存在によりひずみが抑制されたためと考えられる。

c) 吸収機構の存在による影響(ケース2および3, ケースM-2およびM-3)

図-4(a)よりケース2-1の方がケース3よりも各点のひずみの差が大きく表れており、特にその傾向は側壁部で顕



(a) 標準砂の変形特性

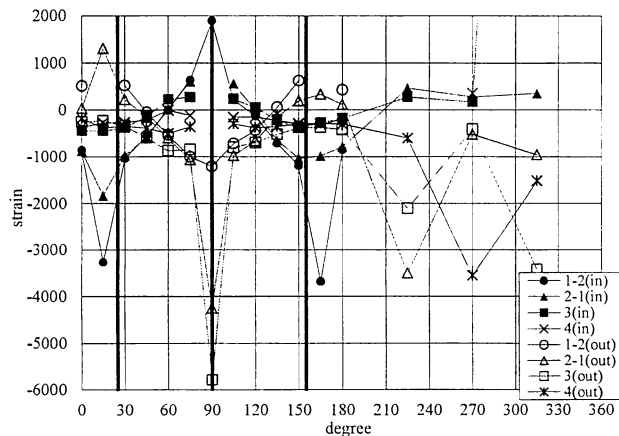


(b) 貧配合モルタルの変形特性

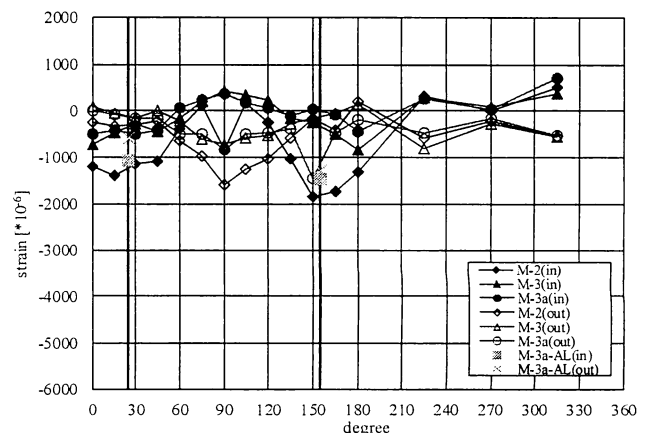
図-3 模型地山の変形特性

著である。ケース3では90度の外側で圧縮ひずみが大きく発生しているものの、内側で引張りひずみが発生していることにより圧縮ひずみが大きく生じる可能性がある。この傾向はケースM-2とケースM-3の場合も同様であった。また、ケース3では側壁部は概ね全圧縮になる傾向があり、これもケースM-3に対して同様の傾向であった。

以上より、側壁に吸収機構がある柔構造の場合は、構造全体のひずみ値が小さくなり、ひずみの発生が緩和される傾向があるとともに、ひずみの正負、すなわち応力状態にも影響を及ぼすと考えられる。ただし、後述する



(a) ひずみ変化(模型地山=標準砂, 300kN)



(b) ひずみ変化(模型地山=貧配合モルタル, 300kN)

図-4 ひずみの断面内での変化(鉛直方向荷重のケース)

ように吸収機構のごく近傍では局所的に供試体が圧縮の限界に達していた現象が見られた部分もあったため、その精査が必要である。

d) 吸収機構の位置による影響(ケース3および4)

図-4(a)より側壁と天端の合計3箇所吸収機構を配置したケース4では天端に近い部分のひずみの値が小さくなっているが、側壁のひずみは大きな差が見られなかった。ケース4は天端に吸収機構を設けるもので実際の構造への適用には議論があるが、ひずみの発生を抑制するという観点では効果があるものと考えられる。

e) 吸収機構の特性による影響(ケースM-3およびM-3a)

図-4(b)より側壁に設置した吸収機構の材質を変えたケースM-3とケースM-3aではひずみの変化に顕著な差は見られない。ただし、ケースM-3aで150度部分外側のひずみが大きく、その付近のコンクリートとアルミのひずみは同程度であった。

f) まとめ

地山材料に貧配合モルタルを用いたケースにおいてはひずみが全体的に平滑であり、吸収機構の特性の発現には地山の特性が大きく影響することが考えられる。また、吸収機構が存在する柔構造ではひずみの発生が全体的に緩和される効果があると考えられる。

一方、吸収機構で中空アルミ棒に関してひずみゲージを貼付することが出来たため、座屈が生じる前の時点までの値は参考として比較することが出来ると考えられるが、ひずみはトンネル供試体で計測した近傍の値より若干大きく、局所的にひずみが大きくなる可能性があると考えられ、その点の精査が必要である。

ただし、今回の吸収機構が簡易な手法で接合されていることや、部材全体のひずみの緩和の度合い、および吸収機構近傍のひずみや応力状態についてはさらなる検証が必要である。

(2) ひび割れや破壊の状況

目視で観察できた内面側のひび割れの状況に加え、試験装置の制約から観察できなかった外面側のひび割れの発生については、実験終了後にひずみ等の値をもとに実際のひび割れの発生位置などを検討した。なお、着目した引張ひずみは、引張ひび割れが発生する1つの目安と考えられる 200μ 、圧縮ひずみは圧縮の限界に達する目安として -2000μ および -3500μ とした。特に引張ひび割れについては、実験終了の時点で供試体の観察によって生じたものが、 200μ 程度で発生したものと仮定して考えた。

供試体はケース1-1、1-2およびケース2-1で破壊を生じてジャッキによる载荷が不可能になり、ケース2-2、ケース3およびケース4ではジャッキの最大荷重に至るまで破壊を生じてジャッキによる载荷が不可能となることは

なかった。また、ケースM-2およびM-3で破壊を生じてジャッキによる载荷が不可能になり、ケースM-3aではジャッキの最大荷重に至るまで破壊を生じてジャッキによる载荷が不可能となることはなかった。

図-5(a)～(c)に模型地山に標準砂を用いたケースのうちケース2-2、3および4に関して、観察されたひび割れの発生状況の概要を示す。図-5(a)よりケース2-2では天端およびインバートの内面でひび割れの発生が目視により観察され、ひずみから想定すると側壁部の外面でもひび割れが生じた状態に近いと考えられる。ひび割れの発生順は天端やインバート、その後側壁と推定され、全て曲げ圧縮の状態が発生したと考えられる。最終的には天端と側壁、インバートで圧縮の限界に達している箇所が見られている。また、図-5(b)よりケース3では天端とインバートでのひび割れの発生が観察されたが、吸収機構が存在している側壁では引張に起因すると考えられるひび割れは観察されなかった。ひび割れの発生順は天端・インバートがほぼ同時であり、両者とも曲げ圧縮の状態が発生したと考えられる。ただし、吸収機構の付近で合成ゴムがつぶれてはらみ出す形になり、その部分で供試体が圧縮破壊を生じ、それに伴ったせん断ひび割れが生じていた。最終的には天端とインバートで圧縮の限界に達している箇所が見られている。さらに、図-5(c)よりケース4では引張によるひび割れはインバート部分だけで見られ、それ以外の内面におけるひび割れは荷重が大きくなってからのせん断破壊によるものと考えられるもののみが観察された。

図-5(d)～(f)に模型地山に貧配合モルタルを用いたケースに関して、観察されたひび割れの発生状況の概要を示す。各ケースとも水平方向のひび割れが発生しており、圧縮の限界に達することによって生じたせん断によるひび割れと考えられる。定量的な議論は困難であるが、これらのひび割れが発生した荷重はケースM-2で概ね 300kN 、ケースM-3で概ね $350\sim 400\text{kN}$ 、ケースM-3aで概ね 600kN と考えられ、有害なひび割れの発生が吸収機構の存在により抑制されることが考えられる。また、吸収機構が存在するケースでは、図中に○印で示した圧縮の限界に達している領域が少なくなることが分かる。ただし、破壊は供試体全体にわたっており、その傾向が地山が標準砂の場合と異なることから、地山条件との関連性の検討がさらに必要である。また、吸収機構の特性の違いによるひび割れの発生や破壊に対する差異は見られず、圧縮の限界に達して生じる破壊が吸収機構の付近で局所的に集中して生じることは同一の傾向であった。

以上より、剛構造と柔構造を比較した場合、ひび割れの発生位置が見かけ上変化するとともに、柔構造では有害なひび割れの発生荷重が大きくなることが分かった。

また、吸収機構の近傍で局所的にトンネル供試体が圧縮破壊を生じているが現象が見られたが、それは前述のひずみの変化の傾向とも一致するものである。今後は解析的な検証によりひずみ値の精査が必要である。

(3) 荷重と変形の関係

トンネル供試体の変形性能として、トンネル供試体に対して土槽を介して作用させた荷重と変形の関係について考察した。図-6(a)～(b)にケース1-1～ケース4、図-6(c)～(d)にケースM-2～ケースM-3aにおけるジャッキによる可動壁への載荷荷重の合計値と供試体の鉛直方向の変形量、または水平方向の変形量を示す。鉛直方向の変形量とは天端部(90度)と底盤部(270度)の断面の収縮量を示し、水平方向の変形量とは側壁のうち、側壁の0度と

180度の収縮量を示している。なお、変形量は断面が収縮する側を正、拡大する側を負としている。

a) 模型地山材料による影響(ケース2およびM-2など)

図-6(a)と(c)より、荷重と変位の関係は傾向は模型地山材料が異なれば変化の傾向が異なる。これより耐荷力等を検討するためには、地山材料の影響を考慮した上で行う必要がある。

b) インバートの存在による影響(ケース1および2)

図-6(a)と(b)より、インバートがないケース1-1およびケース1-2に関しては、他のケースよりも最大荷重が小さく、インバートの設置により載荷可能な荷重が増加することが分かる。ただし、インバートを設置しない方が、作用荷重に対して変形量が小さく、見かけ上構造全体の剛性が高くなる結果となったが、本実験ではケース1-1

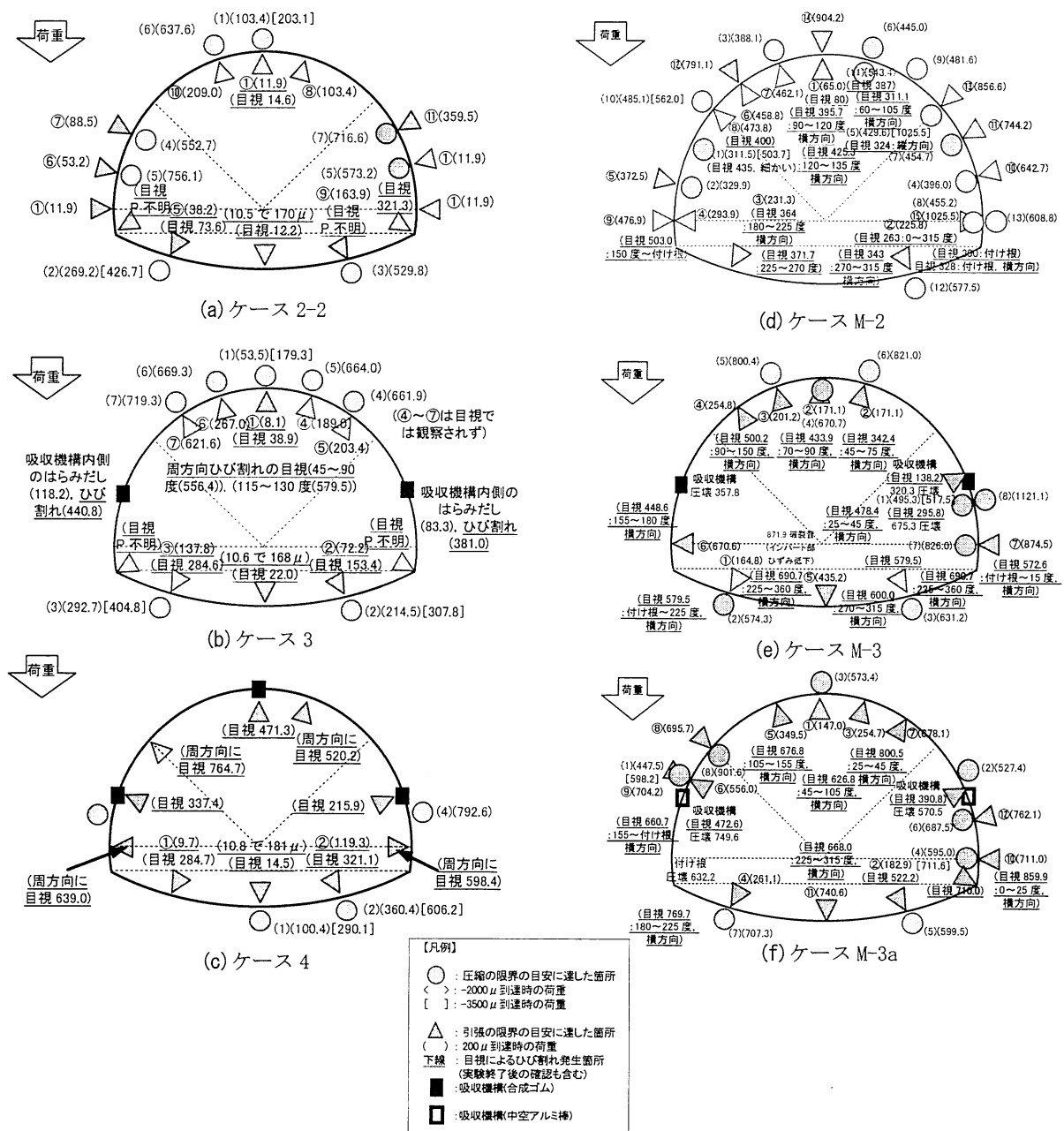


図-5 ひび割れ等の発生状況(鉛直方向荷重のケース)

および1-2で変形量を計測した一面が鋼板であることから、変形量がより小さい値で得られた可能性を考慮する必要がある。インバートがあるケース2-1およびケース2-2に関しては、ケース2-1では供試体が破壊したが、若干強度の高いケース2-2では載荷上限に達しても供試体が完全に破壊しなかった。若干の強度の差が影響していることも考えられるが、作用荷重と変形量の関係は概ね同一であったと考えられる。

c) 吸収機構の存在による影響(ケース2および3, ケースM-2およびM-3)

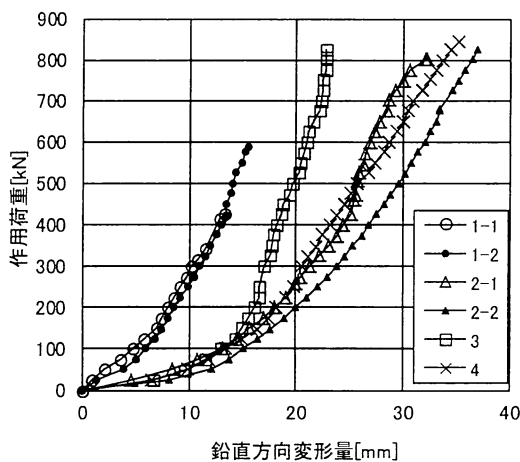
図-6(a)より吸収機構を左右側壁のみの2箇所有しているケース3に関しては、ケース2-1やケース2-2と比較して同一の荷重で変形量が小さくなっている。表-4よりトンネル供試体の強度や剛性がケース3ではケース2-1やケース2-2よりも小さくなっている。一方で図-6(a)の荷重と変形の関係からケース3ではケース2-1やケース2-2よりも同一の荷重で変形が生じない、すなわち、見かけ上の剛性が高いと考えられる。この傾向は模型地山が貧配合モルタルである図-6(c)からも同様であり、ケースM-3ではケースM-2よりも同一の荷重で変形が生じないことが分かる。これより、吸収機構の存在は、変形を吸収させ

る効果や、有害な変位を生じさせない効果がある可能性が考えられる。ただし、作用荷重が大きくなった段階では荷重と変形の曲線の傾きに差が見られず、図-3(a)や(b)に示した模型地山のみで実施した荷重と変形の傾きとほぼ同一の傾向をとることから、模型地山の特性の影響を受けている可能性もある。以上より、本実験結果のみから耐荷力について定量的な評価を行うことは困難であるが、吸収機構の存在による有害な変位の発生を抑制するといった定性的な効果は確認されたと考えられる。

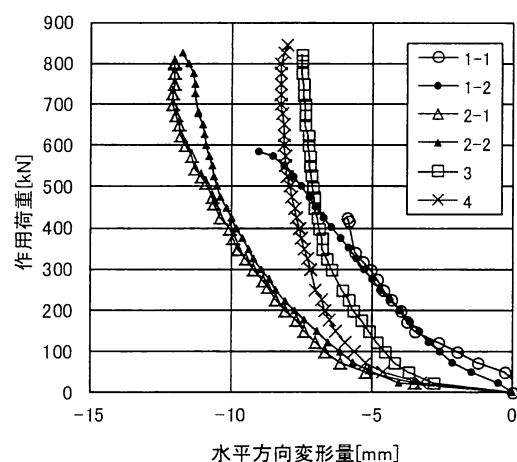
また、図-6(b)より水平方向の断面の収縮は、吸収機構を有するケース3は吸収機構がないケース2-1およびケース2-2と比較して、同一の荷重で変形量が小さくなる結果が得られた。同様に図-6(d)の荷重と変形の関係からケースM-3ではケースM-2よりも同一の荷重で変形量が小さい。鉛直方向荷重の作用により本来はアーチ部より側壁の部分へ伝達される力が吸収機構によって減じられることにより供試体が広がる方向での変形が小さくなり、有害な変形が生じないことが推察される。

d) 吸収機構の位置による影響(ケース3および4)

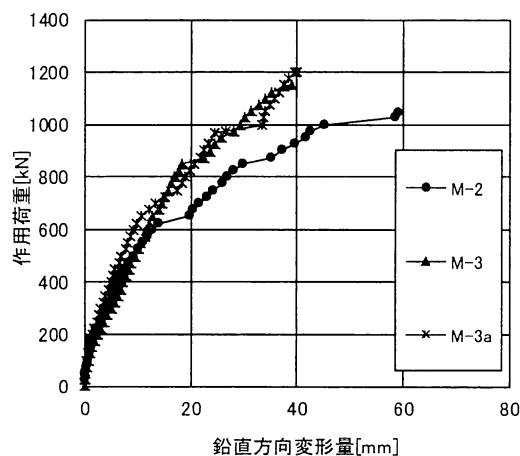
図-6(a)より吸収機構を3箇所有するケース4では、ケース2-1やケース2-2と比較して大きな差が見られない。



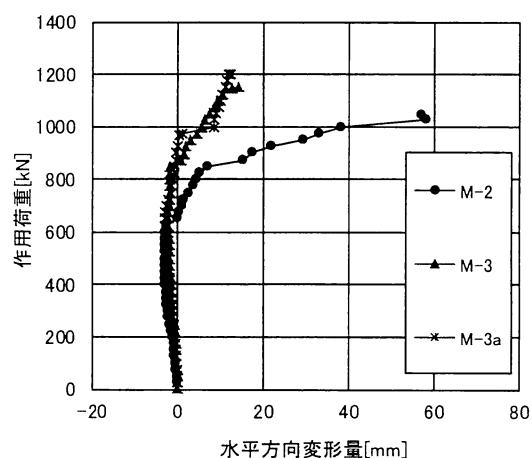
(a) 鉛直方向変形量(模型地山=標準砂)



(b) 水平方向変形量(模型地山=標準砂)



(c) 鉛直方向変形量(模型地山=貧配合モルタル)



(d) 水平方向変形量(模型地山=貧配合モルタル)

図-6 供試体の変形量(鉛直方向荷重のケース)

表-4よりトンネル供試体の強度や剛性がケース4ではケース2-1やケース2-2よりも小さいが、図-6(a)の荷重と変形の関係からケース4はケース2-1やケース2-2より見かけ上の剛性が高いと考えられる。ケース3の場合と同様に、吸収機構の存在により変形が吸収される効果や、有害な変位が生じない可能性が考えられるが、模型地山の変形特性の影響を考慮すると、本実験結果のみから耐荷力について定量的な評価を行うことは現段階ではできない。また、図-6(b)より、水平方向の断面の収縮はケース4はケース2-1およびケース2-2に比較して、同一の荷重で変形量が小さくなる結果が得られた。ケース3の場合と同様、鉛直方向荷重の作用により本来はアーチ部より側壁の部分へ伝達される力が吸収機構によって減じられ、供試体が広がる方向の変形が小さくなると考えられる。

e) 吸収機構の特性による影響(ケースM-3およびM-3a)

図-6(c)および(d)より吸収機構の特性が異なるケースM-3とケースM-3aを比較すると、同一の荷重が作用した場合で発生する変位は少なくなることが分かるが、荷重と変形の関係で大きな差が生じているとは考えにくい。

f) まとめ

本実験で実施した形で吸収機構を配置した柔構造では、剛構造に比較して、同一の鉛直方向荷重が作用した場合は、吸収機構を左右側壁の2箇所に配置した場合、同一の荷重の場合においては鉛直方向の変形量が低下する傾向が見られ、その傾向は地山の影響を受けることが推察される。同様に水平方向の変形に関して、変形が抑制される可能性があることが分かる。

5. おわりに

本研究では過大な変形や外力に追従するトンネル構造を構築する場合として、剛構造と柔構造のトンネルを考え、それぞれの基本的な力学的特性および挙動のメカニズムの解明を試みた。その結果、以下の知見が得られた。

(1)吸収機構の配置により、荷重と変形量の関係は異なるものとなる。また、ひび割れの発生位置が変化し、

ひずみも構造全体で緩和される傾向がある。ただし、吸収機構の近傍で圧縮破壊を生じる現象が見られたように、ひずみの集中等が局所的に現れる場合がある

(2)吸収機構の配置により、有害な変形の発生が抑制されることがある。また、同一の荷重において変形量が減少する特性より、吸収機構の存在は変位を吸収する効果があると言える

(3)吸収機構の配置が挙動に及ぼすメカニズムは、地山の挙動による影響を大きく受ける。そのため両者のメカニズムを考慮したうえで効果を判断する必要がある

本研究では吸収機構が存在する場合、すなわち柔構造のトンネルに関する挙動について基礎的なメカニズムを把握したが、荷重の作用方向、吸収機構の考え方やその位置、ひいては施工性等の課題が依然として残されている。今後はこれらの課題を念頭に置きながら、地山材料の影響や吸収機構のメカニズムを加味した数値解析を行うことにより、変形性能や耐荷力に関する検証を行う必要がある。

なお、本研究の一部は科学研究費補助金(21760378)の助成を受けて実施したものである。

参考文献

- 1) 真下英人：新潟県中越地震における道路トンネルの被害，トンネルと地下，第36巻，第11号，pp.55-63，2005.
- 2) 清水満，齊藤貴，鈴木尊，朝倉俊弘：新潟県中越地震による鉄道トンネル被害調査結果．トンネルと地下，第38巻，第4号，pp.49-57，2007.
- 3) 日下敦，真下英人，水川雅之，森本智：地震による山岳トンネルの地震発生メカニズムに関する基礎的研究，トンネル工学報告集，No.18，pp.15-21，2008.
- 4) 朝倉俊弘，志波由紀夫，松岡茂，大矢敏雄，野城一栄：山岳トンネルの地震被害とそのメカニズム，土木学会論文集，No.659/III-52，pp.27-38，2000.
- 5) 砂金伸治，真下英人，日下敦，森本智，角湯克典：過大变形に対応するトンネル構造に関する実験的考察，土木学会トンネル工学報告集第20巻，pp.129～136，2010.

(2012.9.3 受付)

MECHANICAL BEHAVIOR OF TUNNEL STRUCTURE WITH COMPRESSIBLE ELEMENT

Nobuharu ISAGO, Hideto MASHIMO and Atsushi KUSAKA

Numbers of tunnel constructions under unfavorable ground condition have increased recently. Current tunnel structure itself cannot conform with large deformation when the large force from ground occurs and acts on the structure. The mechanical characteristics of the tunnel with the mechanism to assume to conform to the large force and deformation were examined in this study through model test. Consequently, the existence of the mechanism influences on the relation between force and deformation, the position and occurrence load of cracks in structure and the strain over the structure is alleviated.