

地震体験者からの聞きとりに基づく シールドトンネルの振動性状の検討

Seismic Behavior of Shield Tunnels Based on Group Discussions among
the Professional Workers Who Experienced Earthquakes in and around Tunnels

川島 一彦 (かわしま かずひこ)
建設省土木研究所耐震研究室 室長

杉田 秀樹 (すぎた ひでき)
建設省土木研究所耐震研究室

加納 尚史 (かのう たかし)
建設省土木研究所耐震研究室 (現 建設省郡山国道工事事務所)

1. まえがき

近年都市部を中心に地下空間の利用が積極的に進められつつある。特に、シールドトンネルは、都市トンネルの代表的な施工法として都市機能を支える重要性の高い構造物の建設に利用される場合が多く、その設計に際しては、地震の影響を含めて十分な安全性の検討が必要とされている。

シールドトンネルを含めて、沈埋トンネル、共同溝等の比較的断面の大きい線状地中構造物では、応答変位法および動的解析法を基本とする耐震計算が行われる場合が多い。ところで、橋梁等の構造物では過去に繰返し震災経験があり、こうした震災経験から学んだ教訓と、動的性状や部材の動的強度の予測等に関する研究に支えられて、順次耐震設計法の改訂が重ねられてきている。これに比較すると、断面の大きい線状地中構造物は、その建設の歴史が浅いことや、これらが多数建設されている大都市域に近年大規模な地震が発生していないことから、震災経験はほとんどないのが実情である。したがって、橋梁等の構造物に比較すると、大断面の線状地中構造物では、震災経験を通した耐震設計上の弱点部の洗い出しに関する経験的な蓄積が少ないと言えよう。

このような観点から、過去にある程度以上の規模の地震をシールドトンネル内で体験

した人の経験をとおして、シールドトンネルがどのように振動するかを検討してみることにした。もちろん、体験に基づくため定量的な振動性状の把握には限界があること、また、地震から既にかかなりの時間が経過していること等、振動性状を正しく把握するという観点からは正確さに欠ける点がある。しかし、ある程度の地震が起こった場合にシールドトンネルがどのように振動するかということに関して情報がほとんどない現状では、それが“印象”であり、“正確さを確認できない”としてもやむを得ないものと考えた。

本報告は、昭和47年2月の八丈島近海地震から昭和62年12月の千葉県東方沖地震に至る5回の地震を対象に、シールドトンネル内もしくは立坑で地震を経験した合計12名の体験者から、シールドトンネルの振動性状をできる限りていねいに聞き取り、これに耐震工学的な解釈を加えた結果をとりまとめたものである。

2. 調査方法および調査対象者

「シールドトンネル内で地震を体験したことのあ

表一 1 調査の対象とした地震

No.	地震名	発生日月日	マグニチュード	最大震度および観測所
1	八丈島近海地震	昭和47年2月29日	7.0	V: 八丈島
2	伊豆大島近海地震	昭和53年1月14日	7.0	V: 大島, 横浜
3	宮城県沖地震	昭和53年6月12日	7.4	V: 仙台, 福島, 大船渡, 新庄
4	日本海中部地震	昭和58年5月26日	7.7	V: 秋田, 深浦, むつ
5	千葉県東方沖地震	昭和62年12月17日	6.7	V: 千葉, 勝浦, 銚子

表-2 シールドトンネルの振動性状および地震の影響

地震名	体験者	トンネルの卓越する振動方向	蛇行(波打ち)の有無	特徴的な現象	地震による影響(いずれも軽微)
千葉県東方沖地震	A ¹⁾	横揺れ(トンネル軸直角方向の揺れ) 縦揺れ(上下方向の揺れ)は感じなかった	あり	— ²⁾	止水目地にクラック
	B	横揺れ	はっきりしない		
	C	横揺れ(上下方向の揺れは感じなかった)	なし		
	D	横揺れ	なし		
	E	— ²⁾	— ²⁾		
	F	横揺れ(上下方向の揺れは感じなかった)	はっきりしない		
	G	はっきりしない	はっきりしない		
日本海中部地震	H	— ³⁾	あり ¹⁾		ごく微量の漏水
宮城県沖地震	I	両方向に振動したが、どちらかという上下方向の揺れ	あり	リング継手から間欠的な出水 — ³⁾	継手の樹脂コーキングの外れ — ³⁾
	J	— ³⁾	— ³⁾		
伊豆大島近海地震	K	両方向に振動したが、どちらかという上下方向の揺れ	あり		
八丈島近海地震	L	振動が小さくはっきりしない	振動が小さくはっきりしない	ボルトが「ギシギシ」きしむ音が聞こえた	

注 1) トンネル内にいた同僚の体験 2) 地上であるため該当しない 3) 立坑内であるため該当しない

る人」という条件で調査ができた地震は、表-1に示す八丈島近海地震、伊豆大島近海地震、宮城県沖地震、日本海中部地震および千葉県東方沖地震の五つである。体験者は表-2に示すように、合計12名である。体験者は、すべてシールドの工事関係者で、地震発生時にトンネル内にいた者が9名、立坑内にいた者が2名、地上にいた者が1名である。ただし、立坑内にいたうちの1名については、同僚2名からの話という形で間接的にトンネル内の振動の様子が調査できたのでシールドトンネル内での地震の体験例は10件ということになる。

体験者を地震別に区分すると、千葉県東方沖地震が7名で最も多く、宮城県沖地震が2名、八丈島近海地震、伊豆大島近海地震、日本海中部地震が各1名である。シールドの種別で区分すると、下水道用が7例で最も多く、電話線用が3例、上水道用および地下鉄用が各1例である。シールドの径としては5m以下のものが9例と大部分を占めるが、5~10mのものが2例、10m以上のものも1例(径10.4m)ある。シールドの材質は、鋼製が5例と最も多く、

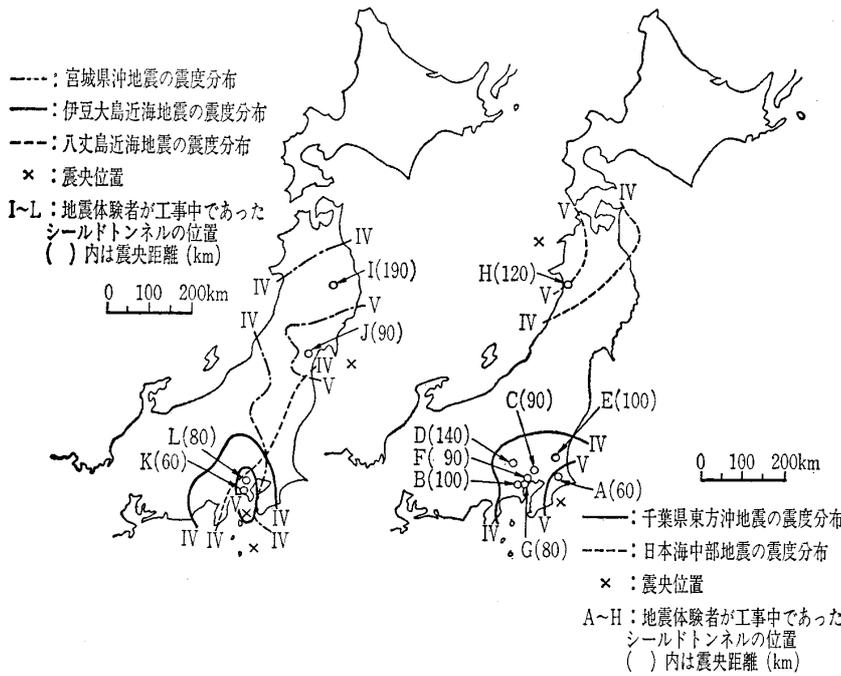
RC製と鋼製の混用が4例、RC製が2例、RC製とダクタイル製の混用が1例である。また、工事段階としては、一次覆工掘進中が6例、一次覆工は完成し二次覆工施工中が5例、発進立坑にシールドマシンを搬入した段階のものが1例である。

12名の体験者には、あらかじめシールドトンネルの振動状況、体験時の施工状況等の概略を用紙に記入して提出していただいた後、昭和63年12月20日に御参集いただき、約2時間にわたって聞き取り調査を実施した。以下に、主要な聞き取り調査結果を地震発生年の新しい順に示す。

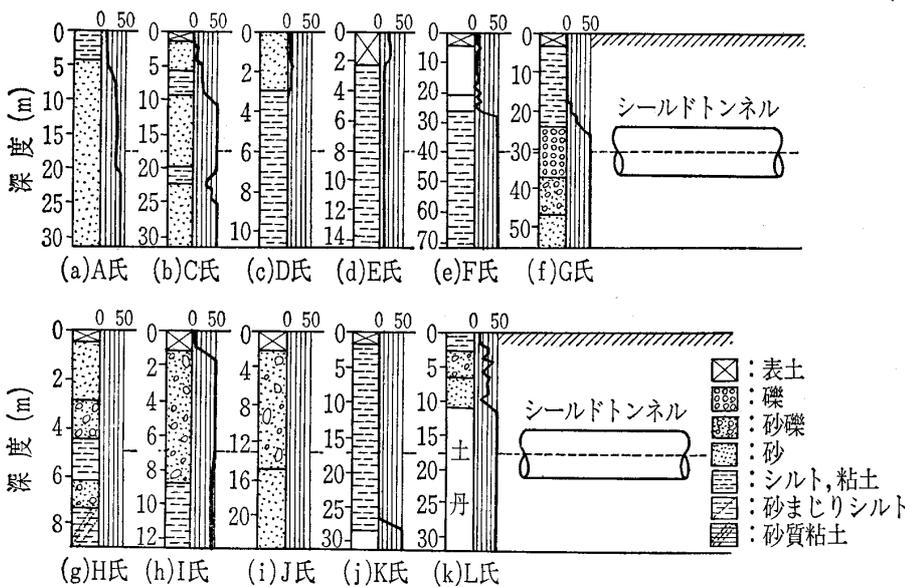
3. シールドトンネル内地震体験者に対する聞き取り調査結果

3.1 千葉県東方沖地震

調査できた5地震のうち、最も最近の地震で、記憶も鮮明であると同時に、最も多数の体験者が得られた千葉県東方沖地震から、シールドトンネルの振動状況を見てみよう。図-1は、体験者が工事中であったトンネルの位置と震源位置および震度の分布



図一 体験者が工事中であったシールドトンネルの位置、震源位置および震度分布



図二 シールドトンネル周辺の地盤条件

を示したものである。

まず、震度Vの千葉県印旛郡酒々井町馬橋で千葉県東方沖地震を体験したA氏は、径2.15mの下水道用シールドトンネルの一次覆工の施工が完了し、シールドマシンの解体に取りかかっている段階で地震に遭遇した。トンネルは大部分が鋼製であるが、地盤条件の悪い300m程度の区間にはRCセグメントを用いていた。地盤条件は図一2(a)に示すとおりであり、トンネルは地表面下17mのN値30程度の砂質地盤中に位置している。

A氏自身は地上にいて、あたかもパイプロンマ

ーを打つような激しい縦揺れ（上下方向の揺れ）を感じたという。しかしトンネル内にいた2名の同僚は、縦揺れはほとんど感じず、トンネルがゆっくり横方向（トンネル軸直角方向）に蛇行するのを目撃している。トンネル内の振動の程度としては、何かにつかまらなければ立ってられないというほどではなかったという。

なお、後述するように、今回の調査では多数の体験者が横揺れ（トンネル軸直角方向の揺れ）を目撃しているが、トンネルが軸方向に振動したという明確な報告は少ない。これは、トンネル内で地震に遭遇した場合には、一般にトンネルの壁に向き合う方向ではなく、トンネル軸を見通す方向に立つ場合が多い。このため、横揺れをより目撃しやすいためではないかと考えられる。

A氏の話によれば、RCセグメント部のうちの約120mの範囲では、施工段階で目地からにじむ程度の漏水があった。このため止水措置としてモルタルを詰めてあったが、地震後に点検すると、ほとんどすべての目地でモルタルにクラックが生じていたという。

震度IVの地域で地震を体験した人は6人いる。まず、東京都大田区で径8.05mの下水道用シールド

トンネル（RCセグメント および鋼製セグメントの混用）内にいたB氏は、一次覆工が完了し、二次覆工を半分程度施工した段階で地震に遭遇した。突然大きな横揺れを感じ、振動振幅は20~30cmにも感じられたという。トンネル全体がすべての方向に動いているようで、特にはっきりしたトンネルの蛇行は認められなかった。「生き埋めになるのではないか」というほどの恐怖感を感じたが、その割には地震後の点検では漏水等の異常は認められなかった。

次に、千葉縣市川市大和町1丁目~南八幡5丁目

報文—2220

メントで一部ダクタイルセグメントを使用)内にいたC氏は、二次覆工コンクリートを打設中に地震に遭遇した。地盤条件は図—2(b)に示すとおりであり、トンネルは地表面下15~16mのN値50以上の洪積砂質地盤中に位置している。縦揺れはほとんどなく、やはり大きな横揺れを感じたが、蛇行は認められなかったという。地震後の点検では、二次覆工の一部に円周方向のヘアークラックが見つかった。クラックは、リング間継手に相当する位置に生じたようであるが、これが地震によるものであるかどうかは定かではない。

同様に、埼玉県秩父市花畑で径3.35mの下水道用シールドトンネル(RCセグメントで一部鋼製セグメントを使用)内で地震に遭遇したD氏は、最初に「ドン」という突き上げられるような縦揺れを感じ、その後は小刻みな横揺れから次第にゆっくりした横揺れに変わって行くのを体験している。地盤条件は図—2(c)に示すとおりであり、トンネルは地表面下6~7mのシルト質土層中に位置している。地震による漏水は生じなかったが、地震後の調査ではリング継手およびセグメント継手のボルトが何箇所かで緩んでいることがわかり、増締めを行った。ただし、ボルトの緩みが地震によるものかどうかは定かではない。

茨城県水戸市千波町で径2.55mの下水道用シールドトンネル(鋼製セグメント)の立坑付近の地上で地震に遭遇したE氏は、強い横揺れを感じ、防火用のドラム缶から水が「ばしゃばしゃ」飛び出すのを目撃している。トンネルは、二次覆工の打設中で、ちょうどある区間では脱型して3時間程経過した段階であったが、ここに円周方向のクラックが3箇所発生した。地盤条件は図—2(d)に示すとおりであり、トンネルは地表面下7.8~8.6mのN値10程度のシルト、粘土層中に位置している。脱型の1~2日後であり、乾燥収縮によるクラックが発生する段階ではないため、地震によって生じたものと考えられる。

東京都江東区木場3丁目~墨田区菊川3丁目で径3.15mの電話線用シールドトンネル(RCセグメント)内にいたF氏は、一次覆工を650m程度掘進している段階で地震に遭遇した。地盤条件は図—2(e)に示すとおりであり、トンネルは地表面下31~

44mのN値50以上のシルト、粘土層中に位置している。発進立坑から300m程度の地点から切羽に向かって歩いている最中に、突然ゆっくりした横揺れを感じ、ふらつくような感じであったという。縦揺れはほとんど感じなかった。

東京都中央区富沢町で径4.5mの電話線用シールドトンネル(RCセグメントおよび鋼製セグメント)内にいたG氏は、一次覆工を掘進中に地震に遭遇した。はっきりとした振動方向は定かではないが、「ふらふら」するような振動を感じたという。地盤条件は図—2(f)に示すとおりであり、トンネルは地表面下31mのN値50以上の礫層中に位置している。

3.2 日本海中部地震

日本海中部地震では、図—1に示すように、震度IVとVの境界あたりに位置する秋田県秋田市土崎港で、シールド工事が行われていた。シールドは径2.55mの下水道用(鋼製)であり、地表面下5mの位置を掘進中であった。地盤条件は図—2(g)に示すようにシルト、粘土である。到達立坑内で地震に遭遇したH氏は、初めにゆっくりした横揺れを感じた。最初は地震であることはわからなかったが、地震と気付いてからは大急ぎで作業階段を昇って地上に出た。この際、階段を昇るのが困難な状況であったという。トンネル内にいた同僚の話では、トンネルが波打つように揺れていたとのことである。

地震後の点検で、微量の漏水が発見された。これらはすべて地震前に止水措置を施した箇所であることから、間違いなく地震の影響によると考えられる。

3.3 宮城県沖地震

宮城県沖地震では、図—1に示すように、震度IVの岩手県盛岡市と震度Vの宮城県仙台市の2箇所体験者がいた。まず、盛岡市で径2.95mの下水道用シールドトンネル(RCセグメント)内にいたI氏は、一次覆工が完了し、二次覆工を打設し始めた矢先に地震に遭遇した。地盤条件は図—2(h)に示すとおりであり、トンネルは地表面下6.7~8.5mのN値50以上の砂礫層中に位置している。孔壁の両側に取り付けた蛍光灯や電線類が左右で異なる揺れを生じたことから、トンネルが蛇行したのがわかったという。揺れの方向としては、横方向よりも縦方向の方が大きかったと体験している点が興味深い。

I氏の回答でさらに興味深いのは、特定のリング

継手からトンネル内に水が間欠的に「ピッピッ」と飛び出てきたという点である。地下水の出水はトンネルの両側で発生しており、これが左右交互に生じたか同時に生じたかについてははっきりしないが、合計5～6回続いたという。仮に、出水が左右交互に生じたのであればトンネルは鉛直軸回りに曲げ変形したことになり、左右同時に生じたのであればトンネルは軸方向に引張り変形したことになる。いずれにしても、耐震工学上極めて興味深い体験と言えよう。地下水は、リング継手の樹脂コーキングが外れた箇所から浸入してきたものである。出水が間欠的に生じた時間間隔（周期）については、「はっきりしないが、10秒といった長い時間ではなかった」とのことであるから、10秒程度の長周期ではないが、それでも比較的ゆっくりした間隔であったと見ることができる。

次に、仙台市の東部にあたる宮城野2丁目で発進立坑内にいたJ氏は、シールドマシンの発進準備をしている段階で地震に遭遇した。地盤条件は図—2(i)に示すとおりであり、トンネルは地表面下13mの砂礫層中に位置している。初めに「尻餅をついてしまうような」強い縦揺れが2回あり、立ち上がった段階で横揺れが始まったという。

3.4 伊豆大島近海地震

図—1に示すように、神奈川県横浜市港北区で径3.35mの上水道用シールドトンネル（鋼製）内にいたK氏は、一次覆工の掘進中に切羽付近で地震に遭遇した。地盤条件は図—2(j)に示すとおりであり、トンネルは地表面下17mのN値0～1という極軟弱な地盤中に位置している。トランシットにつかまらなければならないような強い振動であった。また、トンネルはかなり長い周期でゆっくりと蛇行しており、横方向の蛇行に比べて縦方向の蛇行の方が大きかったという。地震後の点検では特に異常は認められず、圧気のための空気量が増減することもなかった。

3.5 八丈島近海地震

東京都調布市調布ヶ丘で径2.55mの下水道用シールドトンネル（鋼製）を掘進中に、L氏は八丈島近海地震に遭遇した。地盤条件は図—2(k)に示すとおりであり、トンネルは地表面下18mのN値50以上の土丹層中に位置している。断層からかなり離れて

いるために、トンネルの振動自体はそれほど大きくなかった。ちょうどぞきこんでいたトランシットのレベルの気泡が揺れたためトンネル内に目を移したところ、ケーブル等が揺れており、地震とわかったという。

興味深いのは、ボルトのきしむ音が「ギシギシ」と30秒程度にわたって聞こえたという点である。ボルトのきしみ音は、特定の箇所だけでなく、トンネル全体にわたって生じたという。これは、ちょうど当日の作業が終了してトンネル内が静かだったため、現在でも強く耳に残っているという。なお、圧気がかかっていたこともあり、地震後の点検では漏水等の異常は認められなかった。

4. シールドトンネルの地震時振動性状

以上に示した聞き取り調査結果を全体を通して見ると、中には他の体験者と異なるものもあるが、おおむね一つの方向を指しているように考えられる。

(1) トンネルの卓越振動方向

表—2に示すように、シールドトンネル内にいなかった3名を除く9名のうち5名（9名の母数に対して56%）は横揺れが強かったと感じており、横揺れと縦揺れがあったがどちらかという縦揺れの方が強かったと感じた体験者が2名（同、22%）いる。残り2名（同、22%）については、いずれが強かったかはっきりしない。横揺れを強く感じた5名のうち3名は、縦揺れをほとんど感じていない。どちらかという縦揺れの方が強かったとする体験者2名と、縦揺れをほとんど感じなかった体験者3名が、全く相反する体験をしたことになる。

このような相違はあるが、大勢としては、シールドトンネルは横揺れが卓越すると見てよいようである。なお、トンネル軸方向の振動については、これを視認しにくいこともあり、はっきりとこの方向に振動したという聞き取り結果は、今回の調査では得られていない。

(2) トンネルの蛇行

次に、トンネル軸方向に沿う揺れ量の違い、すなわち蛇行が生じたと回答した体験者は、表—2に示すように、本人以外に同僚の体験を含めた10名のうちの4名（10名の母数に対して40%）、生じなかったと回答した体験者は2名（同、20%）、はっきり

報文-2220

しないと回答した体験者が4名(同, 40%)となっている。トンネル軸方向に沿う揺れは、これがあつたとしてもその量が小さければ、一様に振動したと見え、これがある程度大きくなって初めて「蛇行」もしくは「波打ち」と回答されることになる。したがって、これについては、「有つたか」、「無かつたか」を聞けば聞く程、体験者としては「はっきりしない」と答えざるを得ないわけで、蛇行の有つたか無かつたかの割合は重要でないと考えられる。

重要な点は、40%の体験者が「蛇行のようなトンネルの変形を目撃した」と答えている点である。やはり、トンネルは地震時の地盤変形の影響を受けて曲げを受けると考えるべきと思われる。

もう一つ重要な点は、トンネルの変形に関しては、ほとんどの体験者が、「ゆっくり変形した」と答えている点である。これも、地盤の振動を受けてトンネルが変形したことを示していると解釈できる。

(3) その他のトンネルの振動特性

以上のほか、今回の調査の中で最も興味深いのは、I氏が体験したリング継手からトンネル内への間欠的な水の飛び出し(宮城県沖地震)であろう。水の飛び出しが両サイドから交互にあつたのか、それとも同時にあつたのかわからないのは残念であるが、ともかく間欠的な水の飛び出しがあつたということは、トンネルがリング継手部で大きく変形したことを示す確実な事例であるといふことができる。

L氏が体験した八丈島近海地震におけるボルトのきしみ音も興味深い。これも、トンネルが全体として変形を受けたよい証拠であろう。

(4) トンネルに対する地震の影響

5回の地震がトンネルに与えた影響は、いずれもごく軽微なもので、ある意味では地震の影響は無かつたという方が正しいかもしれない。しかし、小さな影響であっても、耐震工学的に重要と思われるのは、リング継手部においてボルトの緩み、目地モルタルのクラック、二次覆工のヘアークラックが生じている点である。これらは、シールドトンネル模型の動的載荷実験¹⁾から明らかにされているように、シールドトンネルにおいては、セグメント本体よりもリング継手部の変形が大きいこと¹⁾、言い換えれば、リング継手の耐震性の検討が重要なことを示し

ている。

5. 結論

地震時のシールドトンネルの振動性状を調査することを目的に、過去の5回の地震によりトンネル内もしくはその近傍で地震に遭遇した12名の体験者から、振動の特徴、トンネルの揺れ方、地震の影響等につき、聞き取り調査を行った。人の感覚を正しく理解し、表現することは大変難しく、微妙なニュアンスを持つ回答の中から著者らが耐震工学的に見て理解しやすい部分だけを取り出したきらいはあるが、本調査から一つの方向として言えそうな点をまとめると以下ようになる。

1) シールドトンネルは、縦方向(上下方向)よりも横方向(トンネル軸直角方向)に振動しやすい。ただし、横方向よりも縦方向により大きく振動した事例もあるようである。また、トンネル軸方向の振動の卓越度については、今回の調査ではわからなかつた。

2) トンネルが波打つように蛇行した例がある。また、間欠的にリング継手からトンネル内に水が飛び出したり、継手ボルトがきしんだ例がある。こうした点からみて、地盤の変形に伴いトンネルにはある程度の変形が確実に生じている。

3) 震度Vを最大とする過去5回の地震では、シールドトンネルに生じた地震の影響は、ボルトの緩み、目地モルタルのクラック、二次覆工コンクリートのヘアークラックといった形でリング継手部に生じている。リング継手部が耐震設計上、まず、注意をしておくべき箇所である。

謝辞

地震体験者からの聞き取り調査を行うに際しては、日本シールドエンジニアリング(株)の豊田敏則部長の御尽力を得た。氏の御尽力がなければ今回の調査が成立しなかつたことを記して厚くお礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 例えば、川島一彦・杉田秀樹・加納尚史：正負交番軸方向荷重を受けるシールドトンネル模型の変形および破壊特性，土木学会論文集，No. 422/I-14，1990。

(原稿受理 1991.11.7)