

孔内傾斜計による計測結果から見た トンネル掘削に伴う地山の挙動

成田賢・松山泰治・堀伸三郎

A CONSIDERATION OF GROUND BEHAVIOR IN RESPONSE TO EXCAVATION OF THE TUNNEL, OBTAINED FROM THE BOREHOLE INCLINOMETER MEASUREMENT

Masaru NARITA, Taiji MATSUYAMA and Sinzaburo HORI

Abstract

Measurements were taken with an inclinometer in a borehole drilled near a tunnel to determine ground behavior in response to excavation of a tunnel whose overburden was shallow. Figure 1 shows examples of these measurements, taken in Aso, Ichiu, Yamasaki Katakasu and Saoka Tunnels. In all five cases, the ground in which the tunnels were excavated consists of alternating layers of Mesozoic Cretaceous sandstone and shale (Shimanto zones). The inclinometer borehole measurements results show that the combined ground surface settlement measurements (Figures 15 and 23), the laboratory displacement measurement results (Figures 6 and 25), the state of excavation (Figures 10, 14 and 22) all correlate well with one another. These measurement results may be regarded as providing a quantitative description of the ground as the tunnel is excavated.

Displacement patterns, obtained from the borehole inclinometer measurements and the analysis of direction of displacement made it possible to distinguish between general displacement resulting from ground relaxation and displacement that could lead to landslides or ground collapse (Figures 10 and 14). This serves as information useful in safety control. In addition, the borehole inclinometer measurements were very helpful in quantitatively identifying ground displacement behind the tunnel facing (Figure 26), which also constitutes a means of safety control.

1 まえがき

山岳トンネルの建設において、土被り厚が薄い区間を掘削するに当って、偏圧の発生や地すべり、斜面崩壊、地盤沈下などを誘発し、トンネル掘削技術上の問題となるばかりでなく、周辺地に被害を与える場合がある。したがって、事前の地質調査によって、上記のような区間についての問題点を抽出し、その対応策を検討し、その対策工を実施することが多くはなっているが、トンネル掘削時における地山の挙動は複雑で、必ずしも十分な対

応となっていないことはしばしば経験することである。そこで、トンネル掘削に伴って発生する変形について、微小変形の段階から、変形の量、範囲などを把握し、地山の挙動特性を明らかにするとともに、その状況に応じた対応策を迅速に講じることが必要となってくる。

筆者らは、近年、高知県下で掘削されたトンネルにおいて、施工管理の一部として役立てるために、土被り厚の薄い区間について、計測の一部として孔内傾斜計を用いて地山の変位を計測し、その結果から地山の挙動を明らかにした。

2 計測概要

計測を実施した個所は、図-1に示すように、四万十帯の地域にある吾桑トンネル、市宇トンネル、山崎トンネル、片粕トンネルおよび佐岡トンネルの土被り厚が薄い区間である。

計測に用いた孔内傾斜計は、アメリカのSINCO社製の高精度傾斜計で、その仕様は表-1に示す通りである。

孔内傾斜計の計測孔は、トンネル側壁位置より3m~5m離れたところに設置し、地表からのボーリング終了後、直ちに計測用ケーシングパイプ(外径50%)を挿入する。このとき、計測用ケーシングパイプの溝(計測時に孔内傾斜計の車輪のガイドレールとなるもので、計測方向を規制することになる)の一对をトンネルの軸方向に直交するようにした(したがって、溝の他の一对はトンネルの軸方向に平行することになる)。ケーシングパイプ挿入後、ボーリング孔壁とケーシングパイプとの空気をグラウト材で充填し、地山と一体化するようにした。グラウト材としては、普通ポルトランドセメント、硝石灰、水の重量配合比が1:1:2のセメントミルクを使用した。

グラウト材が充分固化し、ケーシングパイプと地山が一体化した後(グラウト実施後約14日)に初期値の測定を行なう。そして、トンネル切羽が計測孔より30m以上

離れている場合には、3日~7日に1回程度の計測頻度とし、切羽が計測孔より30m以内である場合には、1日~2日に1回の計測頻度を原則とした。

孔内傾斜計による計測結果は、一般に、孔底を不動点とした累積変位グラフとして表わす。この累積変位グラ

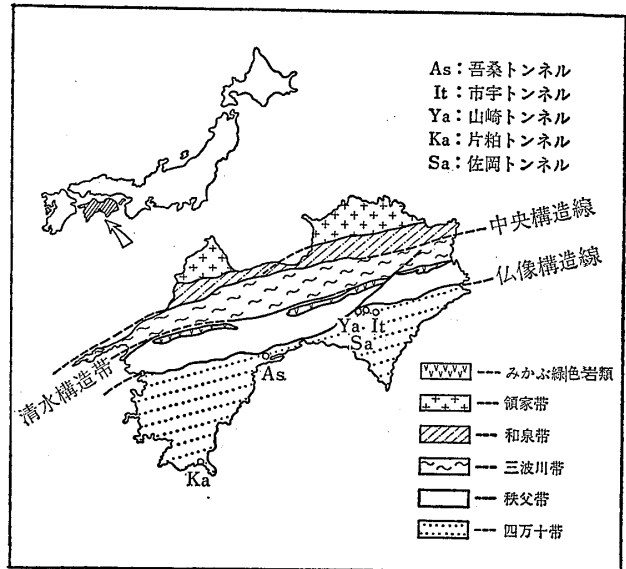


図-1 四国地方の地質構造図および計測地点位置図
Fig. 1 Location and geotectonic map in Shikoku district.

表-1 孔内傾斜計の仕様
Table 1 Specification of borehole inclinometer.

		仕 様	寸 法・重 量
高 精 度 傾 斜 計 50325J	プ ロ ー ブ	測定範囲 ±30° 車輪間隔 50cm	寸 法 φ=2.5cm ℓ=67cm 重 量 1.5kg
	指 示 計	表 示 デジタル 表 示 値 2.5Sinθ 表 示 範 圍 0~±1.9999 電 源 バッテリー内蔵	重 量 2.7kg
	ケ ー ブ ル	抗 張 力 300kg	外 径 φ=1.0cm 重 量 0.1kg/m
	総 合	分 解 能 1/100mm 精 度 ±0.2%FS 適 用 温 度 -20°C~+50°C	
ケ ー シ ン グ	材 質 アルミJIS H4100普 A6063SS T-5による 曲 り 2mm/1000mm ネ ジ レ 1°/300mm	引張り強さ 16kgf/mm ² 以上 耐 力 11kgf/mm ² 以上 単 位 重 量 0.622kg/m 単 位 長 さ ℓ=3.0m	

フに示される変位（地中変位と呼ぶ）の形態的特徴については、四国地方の地すべり地における孔内傾斜計による計測結果に基づいて、堀・成田・井上（1982）によって、図-2に示すように、単すべり面型、複すべり面型、傾動型、複合型の4タイプに分類されている。そして、これらの形態が、地すべり地の地質状況と密接に関係している可能性を指摘している。この区分名は、地すべりを意識した名称であって、トンネルの場合には不適當であるので、図-2のように、「せん断型」、「傾動型」、「複合型」と呼ぶことにした。

変位方向は、トンネル直交方向（A軸）変位とトンネル方向（B軸）変位を合成して求めた。

トンネルの内空変位の計測には、SINCO社製のテープエクステンソメータを使用した。その仕様は表-2に示す通りである。

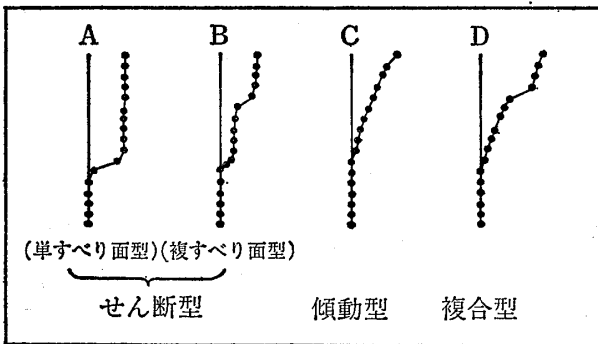


図-2 孔内傾斜計で見られる地中変位の形態（堀，成田，井上；1982）
 Fig. 2 A form of landslide deformation pattern from inclinometer measurement results (by Hori, Narita, Inoue ; 1982).

3 計測地の状況および計測結果

3-1 吾桑トンネル

吾桑トンネルは、国道56号吾桑地区にある延長598 mの道路トンネルで、道路改良に伴い昭和55年1月から掘削されたものである。地質は砂岩頁岩互層よりなり、砂岩が卓越する。層理面の傾斜は70°~80°を示し、斜面に対して高角度の流れ盤構造となっている。

掘削は上部半断面先進工法で高知方より行なわれた。しかし、掘削が坑口より約30m進行した段階で、坑口上方斜面に弧状にクラックが発生し（図-3参照）、最大30cmの地表沈下を起し、支保工が変形、座屈した。そこで、対策工として押え盛土を施工し偏圧を軽減したのちに縫い返しが行なわれた。

下半掘削は須崎方から行なわれ、上記変状区間の掘削時には、2.25mを掘削するごとにインバートまで含めたコンクリート打設を行ない早期の断面閉合処置がとられた。

孔内傾斜計による計測は、この下半掘削時に実施したものであり、孔内傾斜計による計測とともに、上半覆工コンクリート内空の変位測定をも実施した。図-3に計測位置を示す。図-4に変状区間の地質断面図を示すとともに、孔内傾斜計による計測結果をも記してある。

孔内傾斜計による計測の変位形態はせん断型であるが、深部の方がより大きく変位した中抜け現象が見られる。このせん断型の変位形態の屈曲点は、ほぼ層理面と一致しており、この層理面に規制されて、中抜け的な変位が生じたものといえる。図-5によって明らかなる

表-2 テープエクステンソメータの仕様 (SINCO-518115)

Table 2 Specification of tape extensometer.

測定器	項目	機材名	仕様	
	内空変位		テープエクステンソメータ	張力
テープ				スチール製
測定精度				±0.127
目盛				2/100mm
測点	測定ピン	アイボルト		
	固定ボルト	異形鉄筋	SD32 φ=32mm	
	接着剤	セーフロック RBD203	引抜強度=12~18ton/本 約5時間で所要の引抜強度発生	

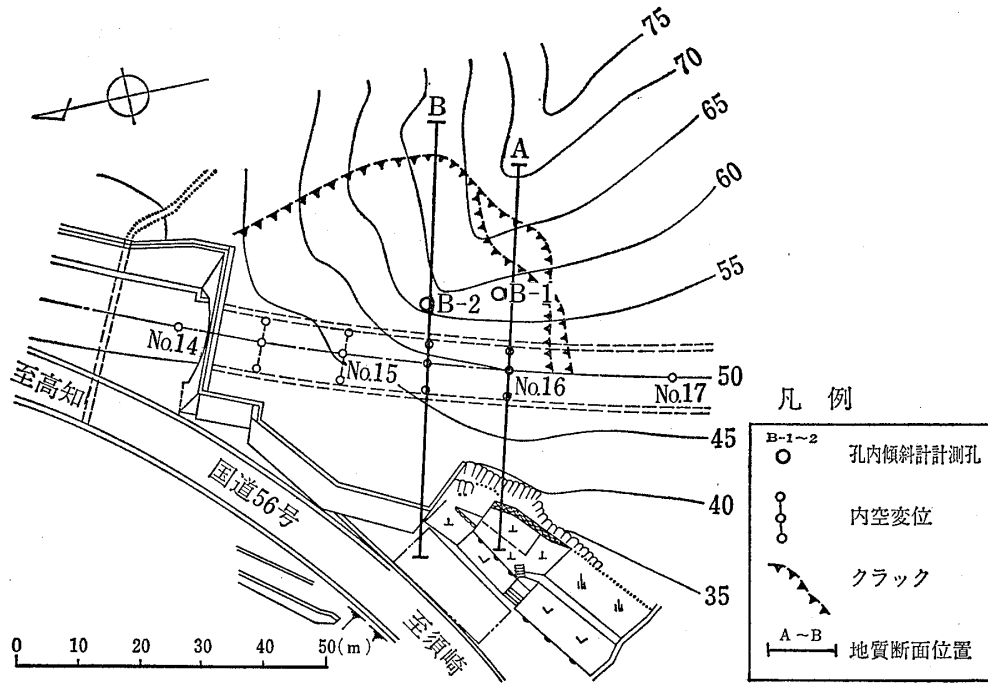


図-3 孔内傾斜計計測位置図 (吾桑トンネル)
 Fig. 3 Locality of inclinometer measurement (ASO tunnel).

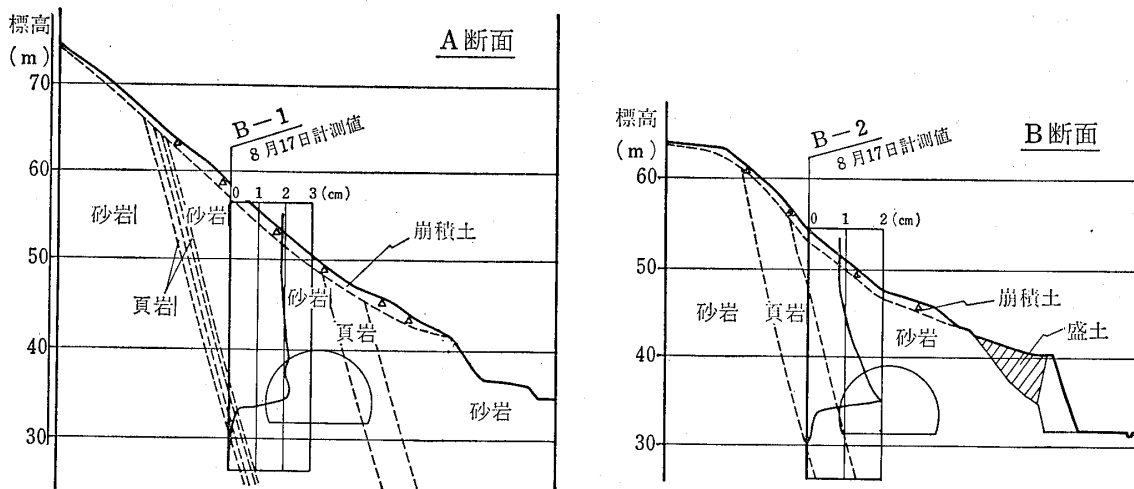


図-4 地質断面図および孔内傾斜計計測結果 (吾桑トンネル)
 Fig. 4 Results of inclinometer measurement and geological section (ASO tunnel).

に、中抜け的な変位がトンネル側壁部で最も大きく現われており、掘削に伴う周辺のゆるみが計測されたものと考えられ、層理面の存在は、このゆるみを促進したといえる。初期の変位形態では、中抜け的なせん断が顕著にみられるが、その後の沈下を伴う変位や表層のすべり的な変位が加わり、中抜けは不明瞭となっている。しかしながら、この計測結果は、掘削時のゆるみからそれに起因する地表までの変位を把えたものと考えら

れ、本報文中の例では、吾桑トンネルの場合だけに認められた形態である。

つぎに、トンネルのスプリングラインにおける内空変位計測結果を、切羽距離と変位量との関係で示すと、図-6の●印のようになる。この計測結果に基づいて、

$$U = A(1 - e^{-\beta x})$$

の形で近似するに当り、最終変位量 A を 21.0mm とする

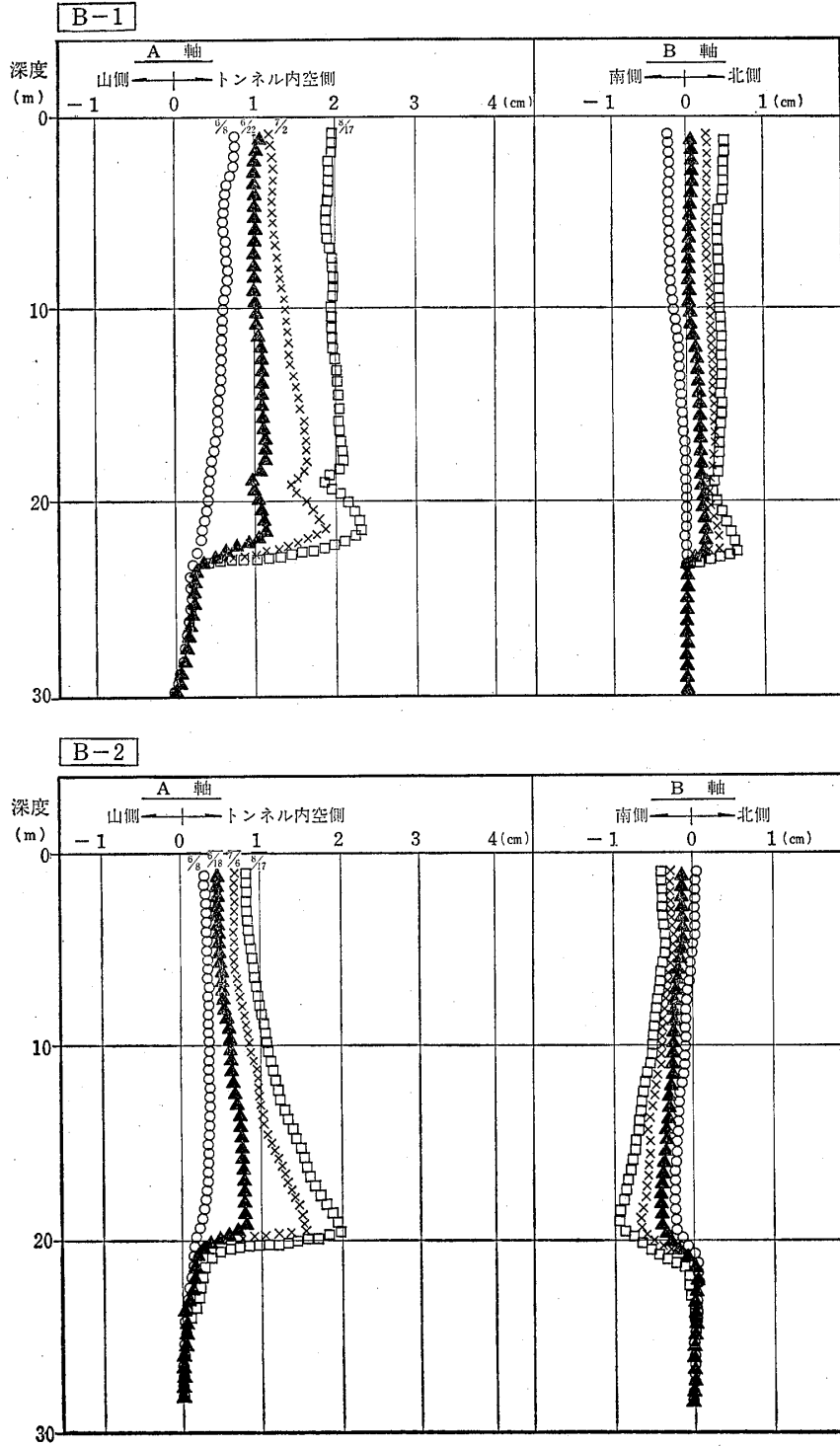


図-5 孔内傾斜計計測結果 (吾桑トンネル)

Fig. 5 Results of inclinometer measurement (ASO tunnel).

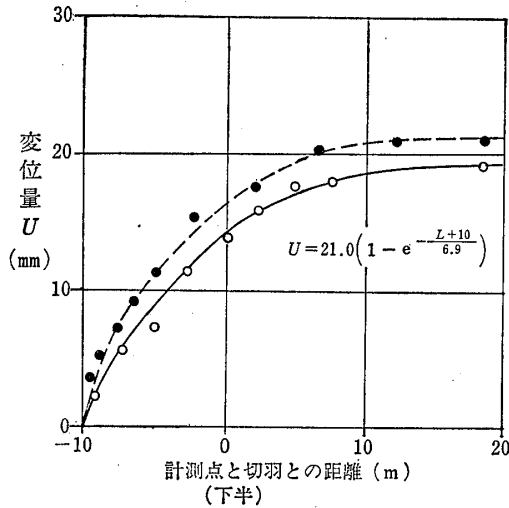


図-6 トンネル壁面水平変位と孔内傾斜計計測結果の関係 (吾桑トンネル)

Fig. 6 Relation between the horizontal convergence of tunnel wall and the results of inclinometer measurement (ASO tunnel).

と,

$$U = 21.0 \left(1 - e^{-\frac{L+10}{6.9}} \right)$$

と表わされ、図中の破線のようになる。この内空変位の実測値と破線で示した計算値をくらべるとき、切羽通過前の切羽距離が-5mから-2.5mの区間において急激な変位量の増加を示していることがわかる。

また、上記の内空変位計測点に近接するB-1孔における孔内傾斜計による計測の深度1.0mのところの累積変位量を切羽距離との関係で示すと、図-6の○印のようになる。この深度1.0mところの累積変位量についても、切羽距離が-5mから-2.5mの区間において急激な増加を示している。そして、それ以後における変位量の増加傾向は、内空変位の増加傾向に近似している。このことは、地中変位形態が地質構造に規制されたせん断型で、上半掘削時から変形が継続していることや、上半覆

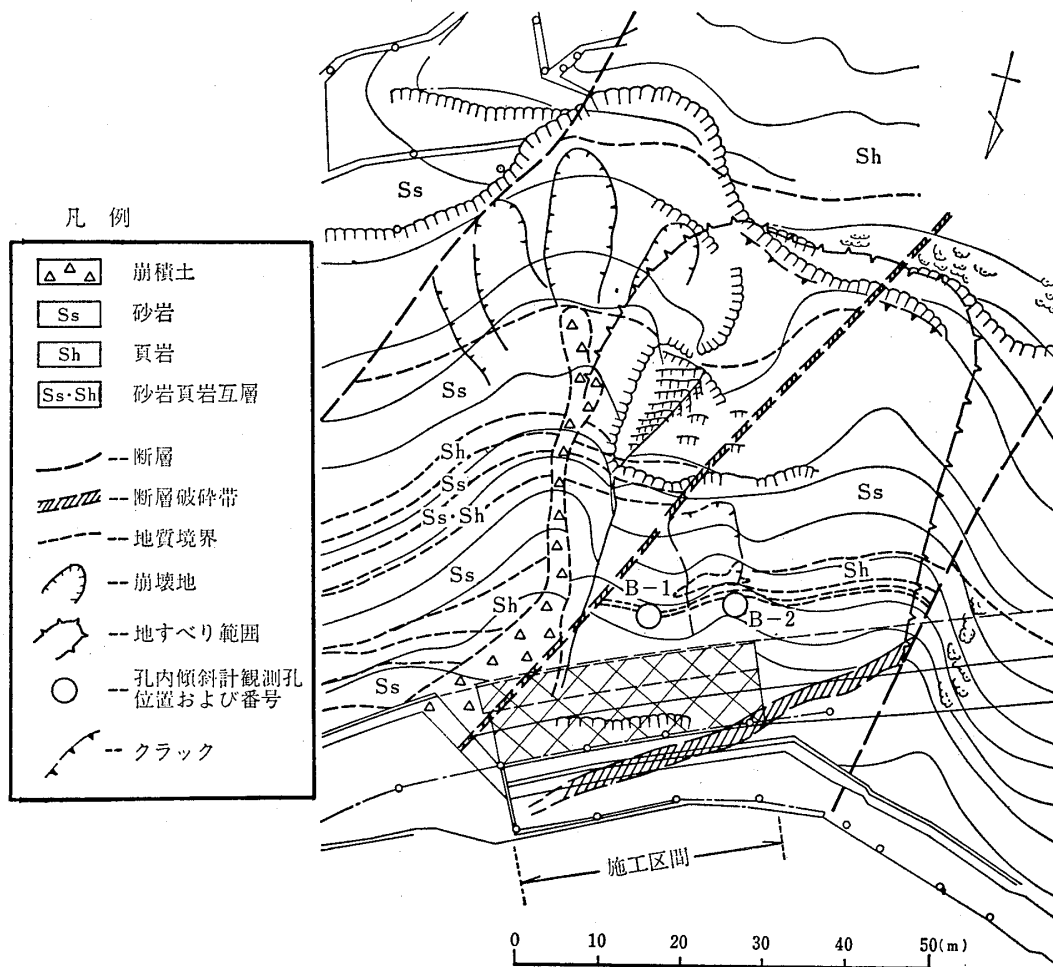


図-7 孔内傾斜計計測位置図 (市宇トンネル)

Fig. 7 Locality of inclinometer measurements (ICHIU tunnel).

工のグラウト注入により覆工コンクリートと地山との一体化が計られていたことに起因すると考えられる。

3-2 市宇トンネル

市宇トンネルは、国道195号に設けられた延長188mの道路トンネルで、道路改良に伴い、昭和54年5月から掘削されたトンネルである。地質は、砂岩および砂岩頁岩互層よりなり、徳島方坑口付近には、トンネル方向とはほぼ平行する断層破砕帯が存在する。徳島方坑口上方斜面は、高さ約50mの崩壊地形となっている。

掘削は高知方坑口より上部半断面先進工法を用いて開始され、徳島方坑口まで30m区間を残す段階で、幅60m、高さ50mの崩壊性土すべりを誘発し、トンネルの支保工や覆工に変状をきたした。地質の再検討結果に基づいて、押え盛土工およびボルト工による地すべり対策工を施工するとともに、地表からの垂直縫地ボルトを打設し、掘削工法をNATM工法に変更し、山側側壁導坑先進上部半断面工法により掘削を再開し、昭和57年1月に貫通した。孔内傾斜計による計測は、徳島方坑口までの30m区間の掘削時に実施した。計測位置は図-7に示す通りであり、計測地点の地質断面図および孔内傾斜計による計測結果は図-8および図-9に示す通りである。

この計測結果によれば、変位形態は、トンネル掘削基面深度付近からの傾動型変位が顕著であり、深度10m付近で傾動傾向が弱まり、それより上部では、再び傾動型変位となっている。

この変位の状況をトンネルの掘削箇所との関係でみる

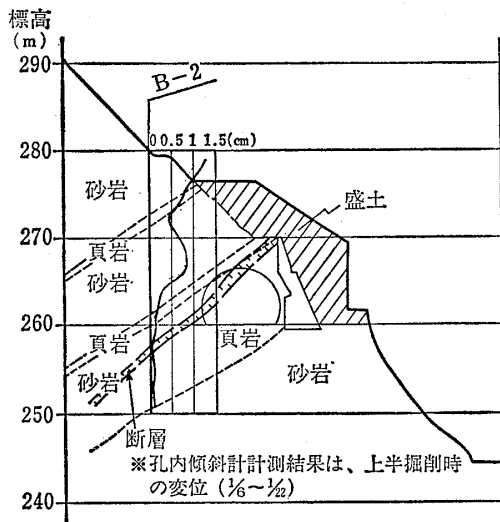


図-8 地質断面図および孔内傾斜計計測結果 (市宇トンネル)

Fig. 8 Results of inclinometer measurement and geological section (ICHIU tunnel).

ために、変位方向を求めた。計測孔とトンネルの切羽の進行との関係位置は、図-10の下部に示す通りであり、地表部付近(深度6.5m)およびトンネル側壁部付近(深度14.5m)の変位方向の移動を、図-10の上部に示してある。この図に示すように、深度14.5mにおける変位方向は、①→②→③、④→⑤→⑥と切羽の進行に伴って進行方向に移動しており、掘削によるゆるみ変位を計測しているとみることができるであろう。ただし、B-2孔における導坑掘削時の変位方向(①, ②, ③)は、切羽に対する方向との間に約30°程度の差が生じている。この差は、計測開始前に下半掘削が行なわれており、その後山側に導坑が掘削されたために、測定開始前の下半掘削までの掘削によるゆるみに規制されたものと考えられる。また、導坑掘削から上半掘削に移行した段階で、変位方向が大きく変化している。これは、掘削断面の大きさの相異に規制されたものと考えられる。一方、深度6.5mにおける変位方向は、切羽の進行方向とは逆の方向を示しており、これを他の地表における変位計測結果と照合すると、地すべり的な斜面崩壊に至る動きと対応しており、掘削の影響により発生した地すべり的な変位を捉えているといえる。

3-3 山崎トンネル

山崎トンネルは、延長87mの道路トンネルで、最大土被り厚20mの段丘下を貫くものである。両坑口には崖堆積物が厚く分布しており、また、段丘上には人家が数軒存在する。したがって、トンネル掘削によって地すべりや斜面崩壊が発生すること、また、地表沈下によって建物に被害を及ぼすことなどが懸念された。

地質は、砂岩および砂岩頁岩の細互層よりなり、仏像構造線に近接しているために、この細互層部は破砕質となっている。

掘削は、両坑口付近を側壁導坑先進上部半断面工法、中間部を上部半断面先進工法で行なわれた。

孔内傾斜計による計測は、トンネル掘削の全期間にわたって実施した(昭和57年8月~昭和58年11月)。計測を行なった位置を図-11に、最大土被り部の地質断面図および孔内傾斜計による計測結果を図-12および図-13に示す。この結果によれば、変位形態は典型的な傾動型であり、これは図-12に示す断面図から明らかなように、偏圧地形を反映しているものと考えられる。

つぎに、各計測孔についての変位方向と切羽の進行との関係を示すと、図-14のようになる。この図の下部に示すように、トンネル掘削が①から⑥まで進行した段階で、反対側坑口からの掘削となった。切羽の進行が①→

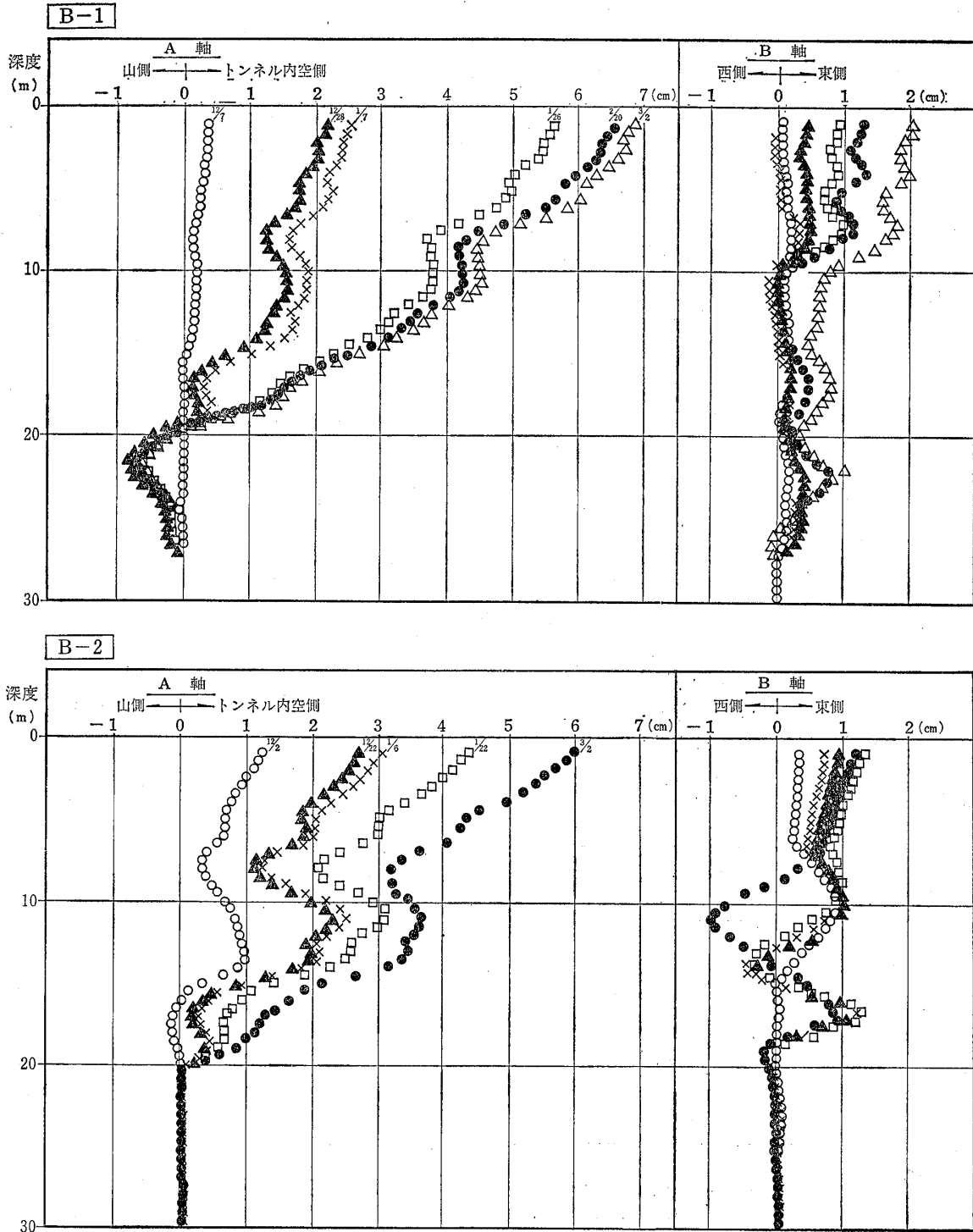


図-9 孔内傾斜計計測結果 (市宇トンネル)
 Fig. 9 Results of inclinometer measurement (ICHU tunnel).

⑥の段階においては、変位方向は切羽の進行方向に移動している（B-2孔、B-3孔）。これに対して、反対側坑口からの掘削となり、切羽の進行が⑦→⑩となった段階においては、変位方向は切羽の進行方向と逆の移動を示している（B-1孔、B-2孔）。これは、最初の掘削によって切羽方向に変位した地山が、斜面傾斜が急であるために、斜面の最大傾斜方向に規制された変位に移行した結果といえることができる。このような現象をふ

まえ、実際の管理面においては、この時点で斜面安定工を実施した。

また、図-12に示した断面にそって、昭和57年12月から翌年の3月にかけて行なった水準測量の結果を図-15に示す。なお、孔内傾斜計による地中変位の変化をも合せ記してある。これによると、トンネル直上において最も著しい沈下を示し、3月4日の⑥の段階で60mmになっており、地中変位曲線には、孔内傾斜計のケーシングパイプにバックリングが発生したことが顕著に示されている。

3-4 片粕トンネル

片粕トンネルは、国道321号にある延長982mの道路トンネルで、その改修に伴って昭和56年度より施工されたものである。掘削は、上部半断面先進工法によって東西両坑口から開始された。西側坑口において、昭和56年度掘削分のうちの坑口から約60mまでを掘削した時、西側坑口の上半アーチ覆工コンクリートに多数のクラックが生ずるとともに、トンネル上方斜面に、落差20~40cmの滑落崖が発生した。

変状が発生した区間は偏圧地形を呈しており、地質は砂岩頁岩互層よりなり、地層の走向はトンネル方向とほぼ平行で、その傾斜は60°~70°の高角度である。そして斜面に対しては、流れ盤構造となっている。

当年度掘削予定の残り30mの区間についても、それまでと全く同じような地形条件であり、したがって同一施工法で掘削を続行することは不利であるため、施工法を

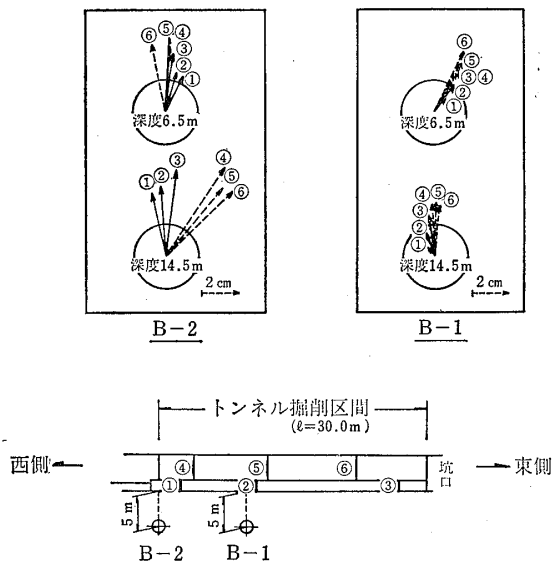


図-10 切羽進行と地中変位方向の関係（市宇トンネル）
Fig.10 Relation between displacement district and the distance from tunnel face (ICHIU tunnel).

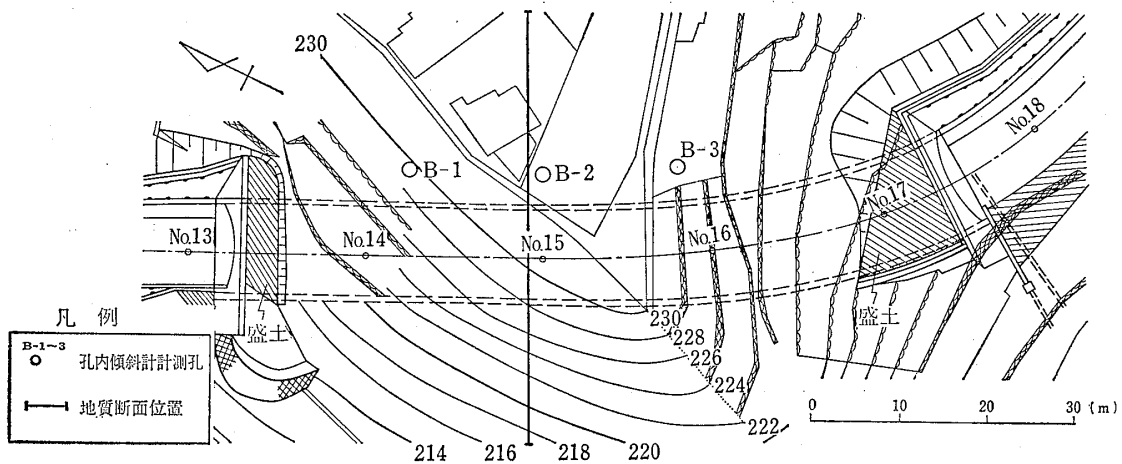


図-11 孔内傾斜計計測位置図（山崎トンネル）
Fig.11 Locality of inclinometer measurements (YAMASAKI tunnel).

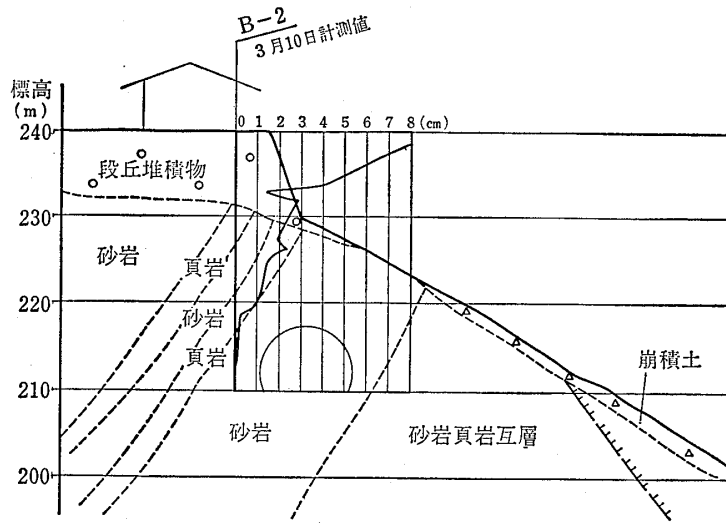


図-12 地質断面図および孔内傾斜計計測結果 (山崎トンネル)

Fig.12 Results of inclinometer measurement and geological section(YAMASAKI tunnel).

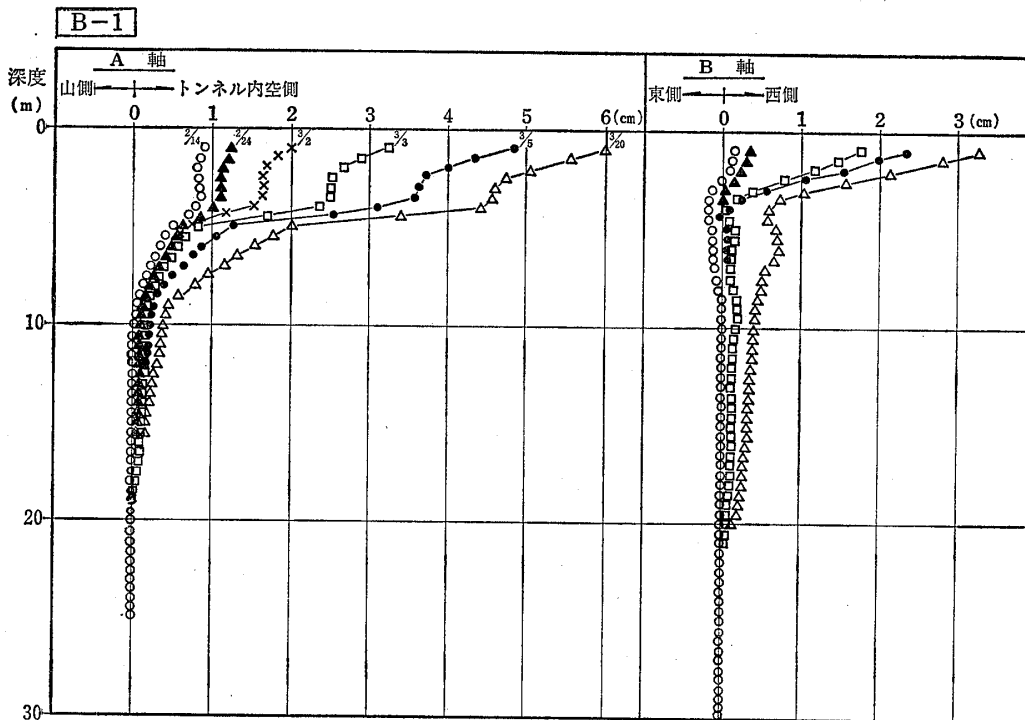


図-13 孔内傾斜計計測結果 (山崎トンネル)

Fig.13 Results of inclinometer measurement(YAMASAKI tunnel).

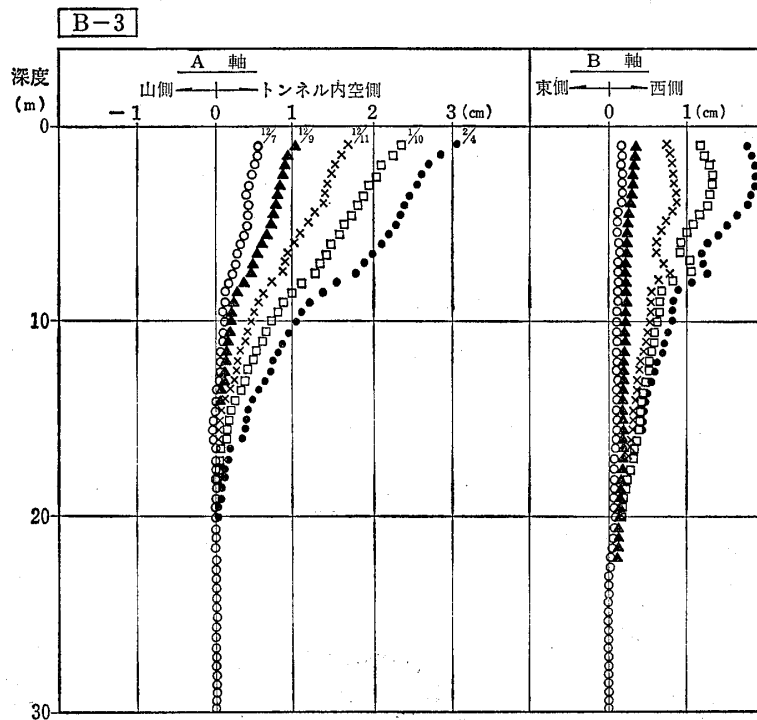
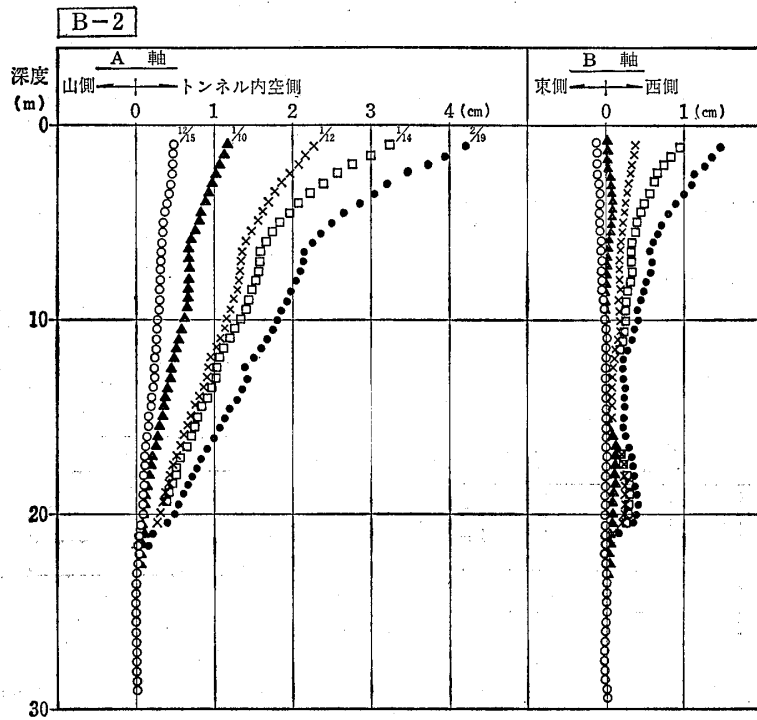
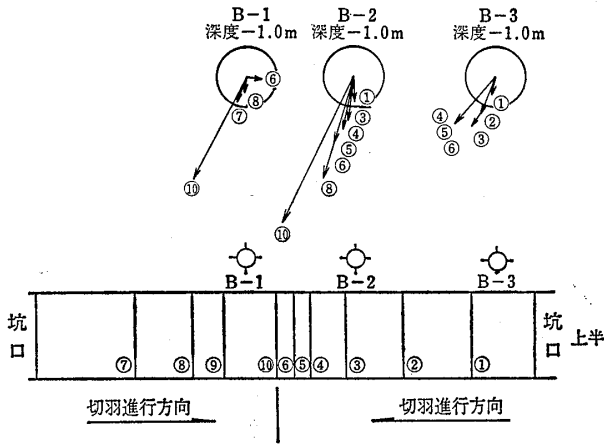


図-13 孔内傾斜計計測結果 (山崎トンネル) (つづき)

Fig.13 Results of inclinometer measurement (YAMASAKI tunnel). (continue)

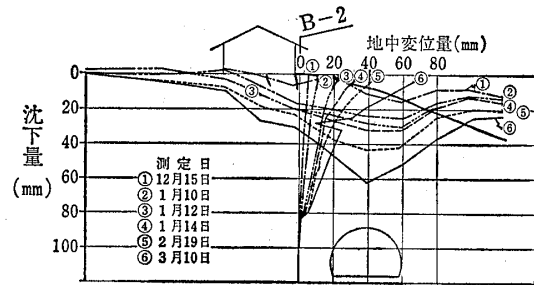
上半断面先進 NATM 工法に変更し、これと同時に、孔内傾斜計によって地中変位を計測し、変状監視をしながら掘削を進めることになった。

計測位置は図一16に示す通りであり、西側坑口から80m地点の地質断面図および孔内傾斜計による計測結果を図一17および図一18に示す。この結果によれば、変位形

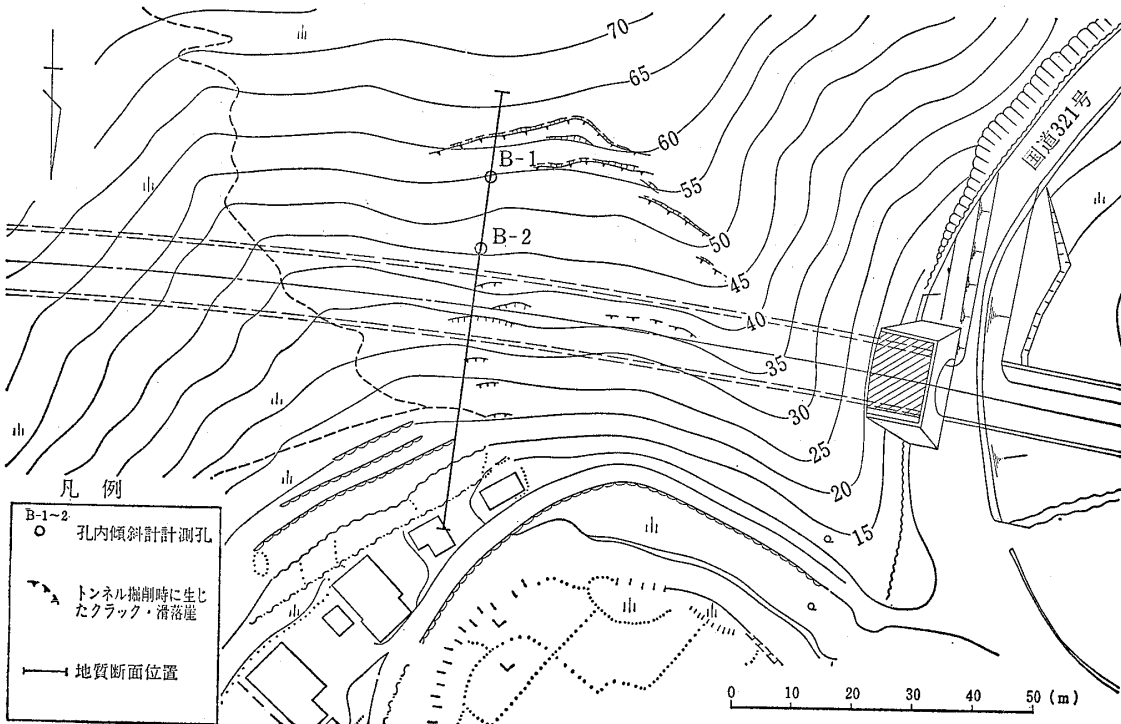


図一14 切羽進行と地中変位方向の関係 (山崎トンネル)
 Fig.14 Relation between displacement district and the distance from tunnel face (YAMASAKI tunnel).

態は、B-1孔においてはせん断型、B-2孔においては傾動型を示している。両孔は、トンネルと直交する同一断面上に位置し、トンネルとの距離によって動きの性質が異なっている。これは、図一1の地質断面図に示すように、トンネル掘削に伴ってゆるみ領域が形成され、トンネル直上の岩盤強度が低下し、その結果、トンネル上方を通るせん断型のすべりが発生したためと解釈できる。すなわち、B-1孔の10m以浅における変位は、地表にクラックが発生していることなどから、地すべりに



図一15 地表面沈下と孔内傾斜計による変位の関係 (山崎トンネル)
 Fig.15 Relation between the subside ground surface and the displacement by inclinometer measurement results (YAMASAKI tunnel).



図一16 孔内傾斜計計測位置図 (片粕トンネル)
 Fig.16 Locality of inclinometer measurements (KATAKASU tunnel).

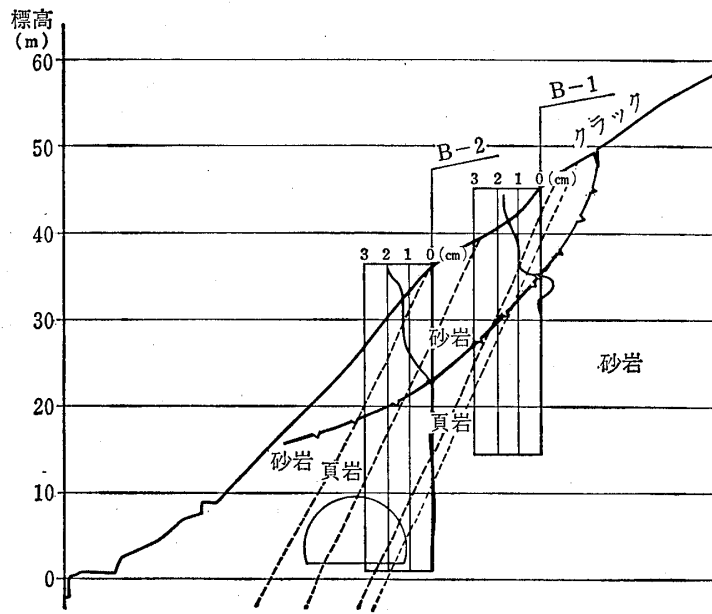


図-17 地質断面図および孔内傾斜計計測結果 (片粕トンネル)

Fig.17 Results of inclinometer measurement and geological section (KATAKASU tunnel).

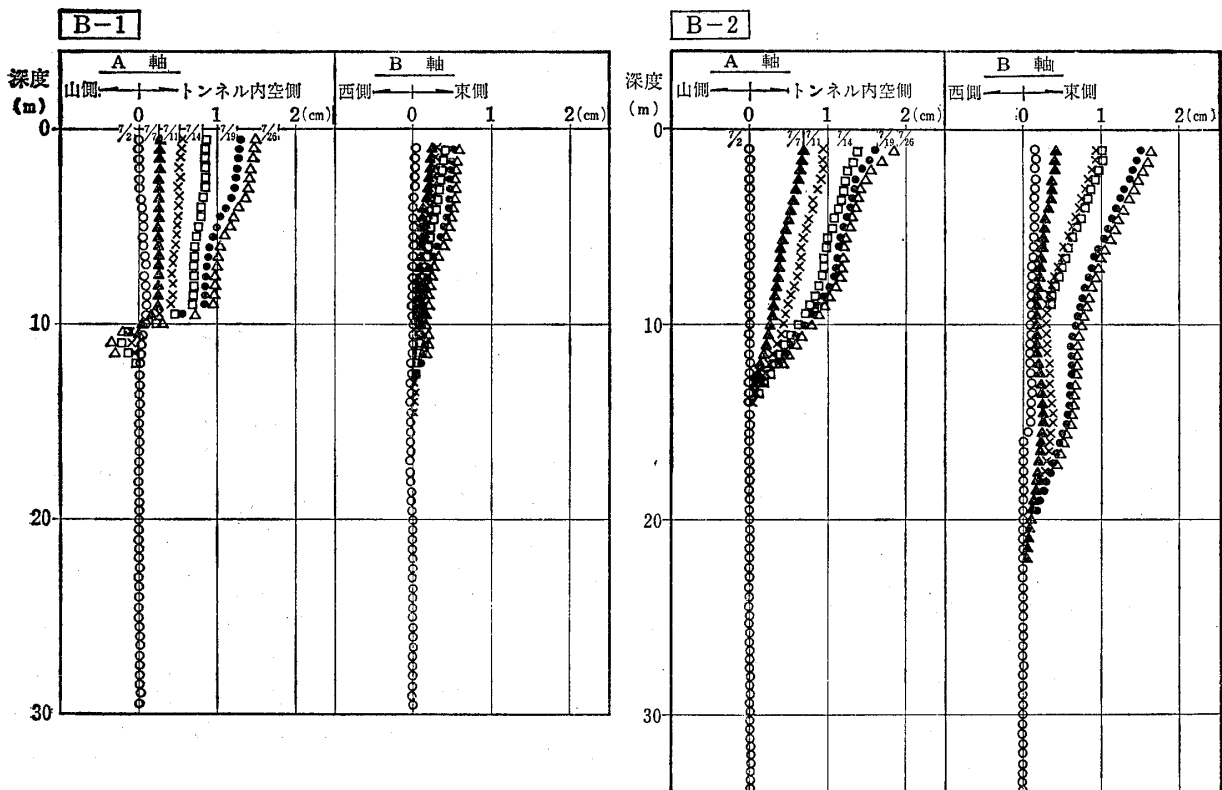


図-18 孔内傾斜計計測結果 (片粕トンネル)

Fig.18 Results of inclinometer measurement (KATAKASU tunnel).

よるものであり、B-2孔の10m以深の変位は、トンネル掘削による直接的なゆるみを反映した変位を計測したものである。

3-5 佐岡トンネル

佐岡トンネルは、国道195号の改築に伴って施工された延長150mの道路トンネルである。このトンネルは、段丘面下を通っており、最大土被り厚が18mと薄く、そのうえ土被りの約10mが未固結段丘堆積物よりなっている。また、段丘上には数軒の民家が存在し、地表沈下による家屋への影響が、設計段階から懸念されていた。

掘削は、昭和57年12月に高知側坑口から、側壁導坑先進上部半断面工法で開始されたが、側壁導坑が約70m進行した段階で、段丘上の家屋に変状が発生した。そのため、導坑および上半断面の施工をNATM工法に変更して施工した。

地質は、砂岩および砂岩頁岩の細互層と、それを覆う層厚約10mの未固結段丘堆積物とよりなる。地層の走向は、トンネル方向にほぼ平行し、傾斜は50°~60°で、斜面に対して受け盤状構造となっている。また、トンネルとゆるく斜交する方向を持ち、破碎帯を伴う断層が存在する。

孔内傾斜計による計測は、トンネル掘削期間中を通じて実施された。図-19に計測位置を示し、計測位置を含むトンネルに直交する方向(図-19のA-A', B-B', C-C')の地質断面図および孔内傾斜計による計測結果

は、図-20および図-21に示す通りである。上記のように、地質が複雑に変化していることもあって、変位形態としては、せん断型、傾動型、複合型の各タイプが見られる。B-2孔で得られたトンネル施工基面より深い部分における屈曲点は、トンネルとゆるく斜交する低角度断層面の位置と一致しており、地質構造に規制されたゆるみの進行によって、せん断的な変位が生じたものと見ることができる。B-3孔においては、深度12~14m付近において、変位形態の変化が認められ、ケーシングパイプのねじれと解釈できる変位も計測されている。

つぎに、変位方向と切羽の進行との関係を示すと図-22のようになる。このうち、B-1孔における変位方向は、切羽の進行方向に移動し、よい対応を示しているが、B-2孔およびB-3孔の変位方向は、変位量が少ないうちは、切羽の進行方向に対応しているけれども、切羽の進行に伴って(切羽が計測点から遠ざかる)変位量が増加してくると、その対応性は認められなくなる。この理由として、B-2孔の場合は、ある程度の変位が進行した段階から、図-20(C)に示す位置にある断層に規制された方向に、変位方向が移行したものと考えられる。また、B-3孔の場合は、最終変位方向⑩が斜面の傾斜方向と一致しており、斜面の傾斜方向に規制された変位に移行したものと考えられる。

また、図-20に示す3つの断面にそって実施した水準測量の結果を図-23に示す。この図中には、孔内傾斜計による地中変位を記入してある。これによると、B-1

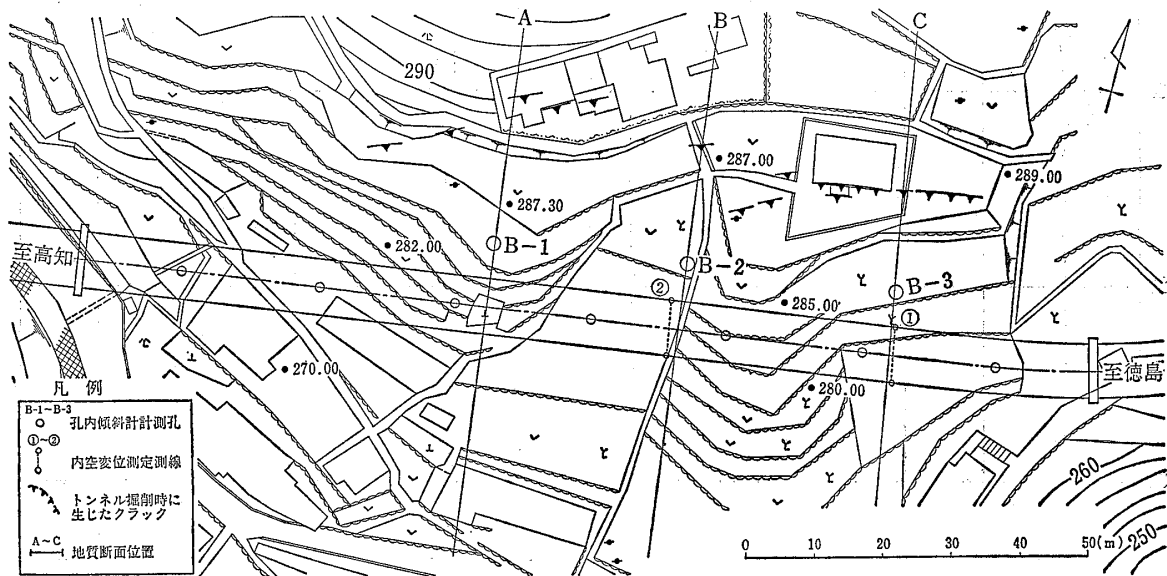


図-19 孔内傾斜計計測位置図(佐岡トンネル)

Fig.19 Locality of inclinometer measurement (SAOKA tunnel).

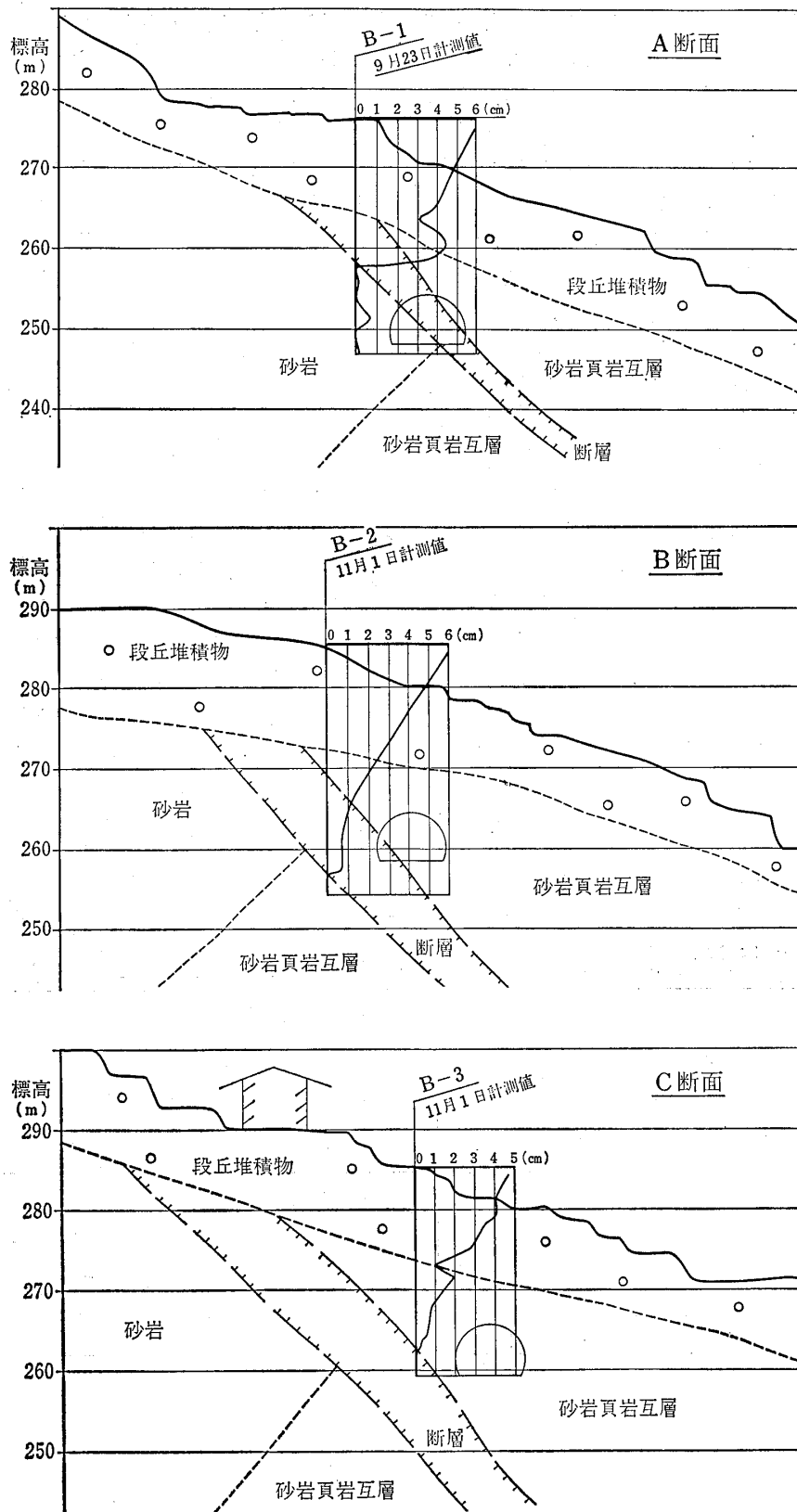


図-20 地質断面図および孔内傾斜計計測結果 (佐岡トンネル)

Fig.20 Results of inclinometer measurement and geological section (SAOKA tunnel).

孔の②と③の間およびB-2孔の①と②の間に示されているように、地中変位の増加が著しいときには、沈下量の増加も著しく、地中変位と沈下とは、よい対応を示している。さらに、B-3孔においては、沈下量が増加するにしたがって、ケーシングパイプのバックリングが顕著になる傾向が認められる。ここで、地中変位の形態と沈下曲線の形態を比較すると、B-1孔においては、沈下曲線形態が広い範囲にわたって沈下量の大きい舟底状となっており、この場合の地中変位形態は、せん断型を示している。一方、B-2孔においては、沈下曲線形態がトンネル天端付近にピークを持つすりばち状を呈しており、この場合の地中変位形態は傾動型となっている。

さきに述べたように、側壁導坑を約70m掘削した段階で、工法をNATM工法に変更し、図-24に示すように、それぞれの導坑のスプリングラインにおける内空変位の計測を行なった。その結果を切羽距離との関係で示すと図-25のようになる。これらの値を用い、近藤(1979)の2倍時変位法に基づいて、最終変位量および変位曲線を求め、さらに、切羽面が計測断面を通過してから、計測開始時までにおける初期変位量を求めた。

図-26は、内空変位計測点に近接している計測孔における孔内傾斜計による計測結果を、深度1.0mまでの累積変位量として切羽距離との関係で示したもので、さき

に示した内空変位量をも併記してある。地中変位は、切羽が内空変位計測点に到達する10m前の段階から急速に増大し、切羽通過後20m~30mの段階で収束している。これに対して、内空変位は、切羽が計測点の近くにある間(切羽距離が5mくらいまで)にきわめて急激に増加し、切羽距離10~15mで収束しており、変位が収束する切羽からの距離は、地中変位の方が約2倍程度長くなっている。このことは、ここに示した地中変位が深度1.0mまでの累積変位であり、広い範囲への切羽の影響をとらえていることに起因しているものと考えられる。

4 まとめ

以上述べたように、吾桑トンネル、市宇トンネル、山崎トンネル、片粕トンネルおよび佐岡トンネルは、いずれも四万十帯の砂岩頁岩互層中に掘削されたもので、土被り厚が薄く、トンネル掘削に当っては側壁に偏圧を与えるような地形区間にある。各トンネルに関する地形・地質、掘削工法、孔内傾斜計による計測数などの状況は表-3の通りである。

孔内傾斜計による計測結果得られた地中変位形態は、基本的には傾動型である。しかし、層界面や断層などの地質分離面が、トンネル掘削の影響範囲に卓越して存在している場合は、これらに規制された変位が、せん断型

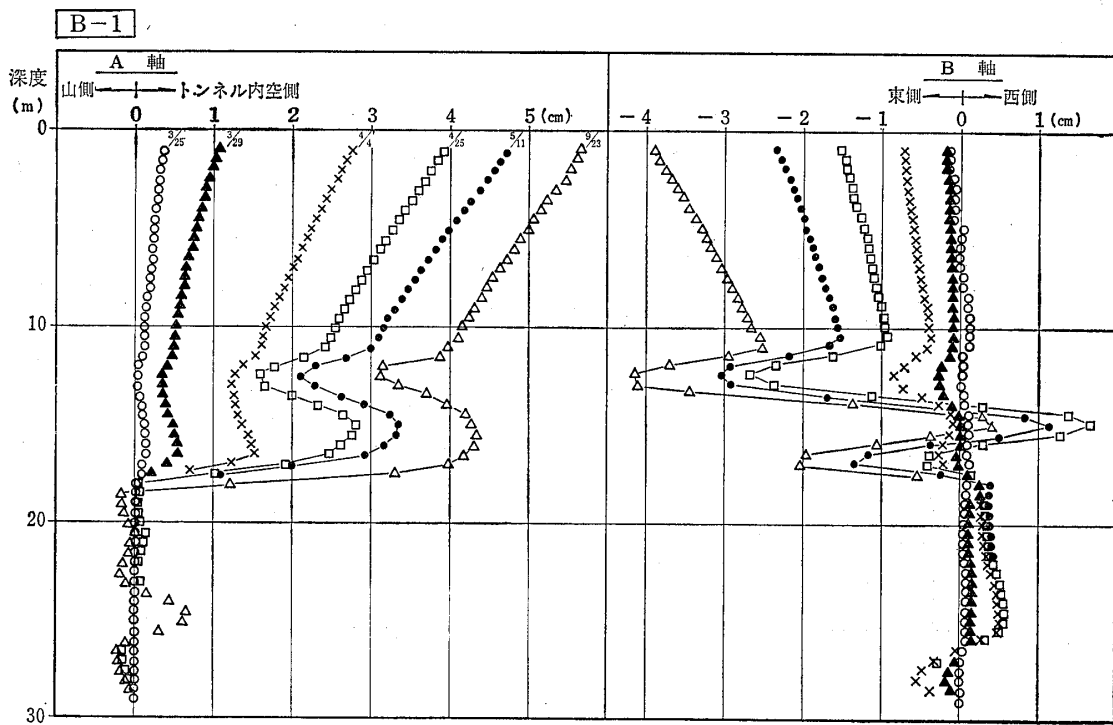


図-21 孔内傾斜計計測結果 (佐岡トンネル)
Fig.21 Results of inclinometer measurement (SAOKA tunnel).

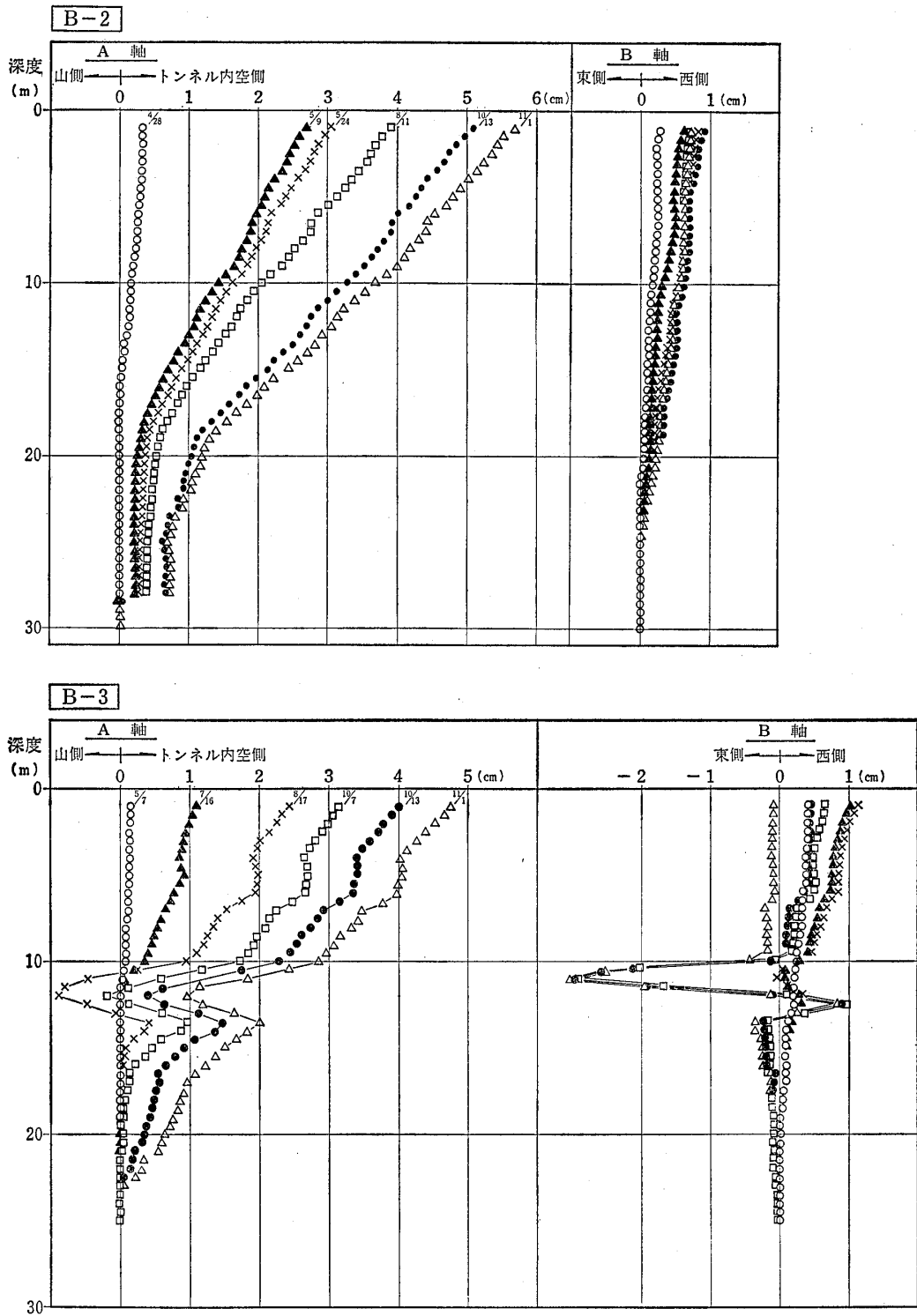


図-21 孔内傾斜計計測結果 (佐岡トンネル) (つづき)

Fig.21 Results of inclinometer measurement (SAOKA tunnel). (continue)

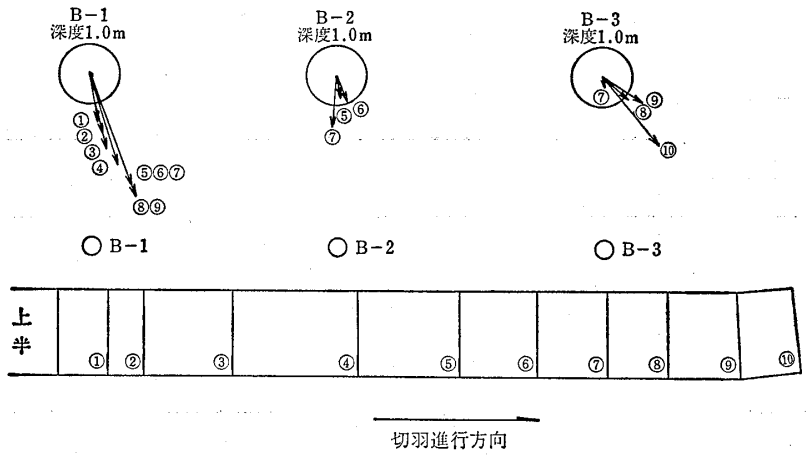


図-22 切羽進行と地中変位方向の関係 (佐岡トンネル)
 Fig.22 Relation between displacement district and the distance from tunnel face (SAOKA tunnel).

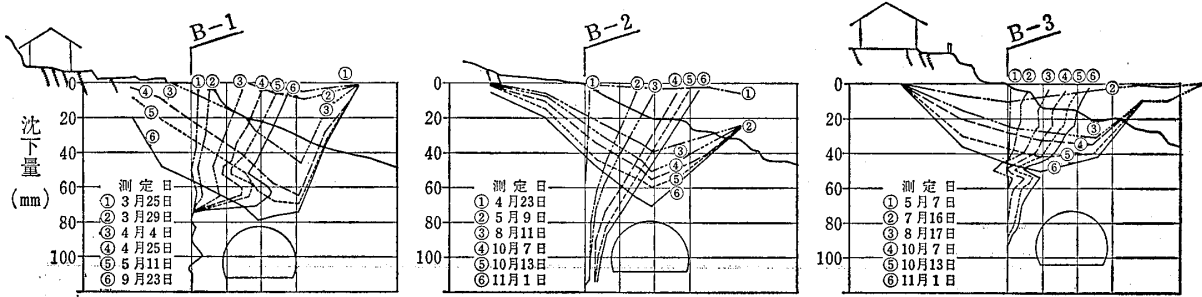


図-23 地表面沈下と孔内傾斜計による変位の関係 (佐岡トンネル)
 Fig.23 Relation between the subside ground surface and the displacement by inclinometer measurement results (SAOKA tunnel).

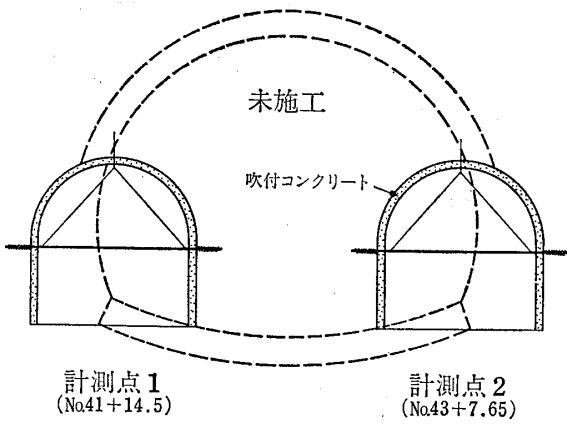


図-24 トンネル壁面水平変位測線 (佐岡トンネル)
 Fig.24 Horizontal displacements of tunnel wall (SAOKA tunnel).

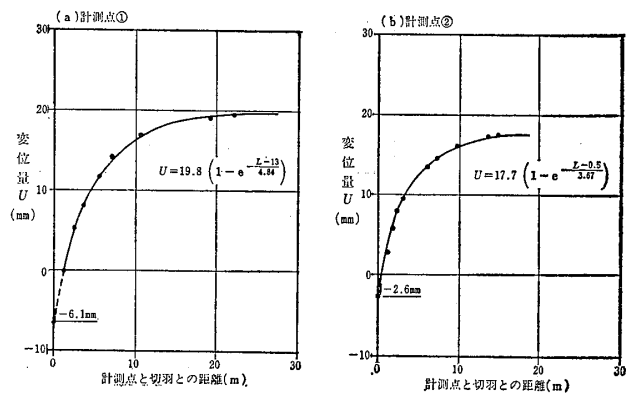


図-25 切羽距離と内空変位量の関係
 Fig.25 Relationship between the distance from tunnel face and the horizontal convergence of tunnel wall

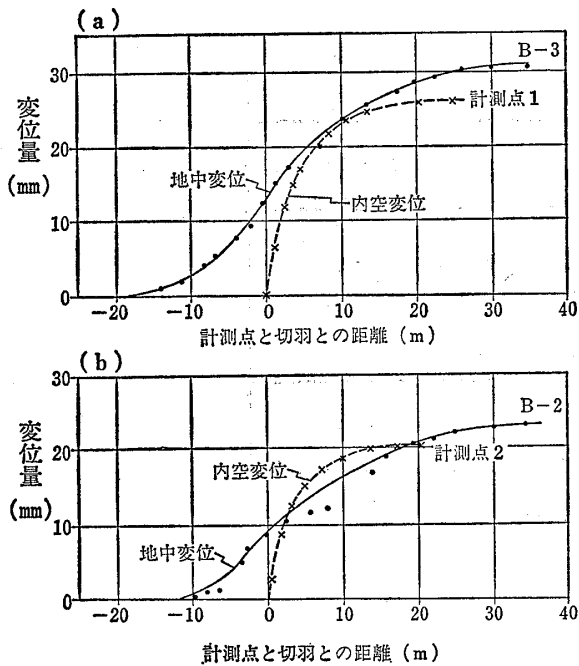


図-26 トンネル壁面水平変位と孔内傾斜計計測結果の関係 (佐岡トンネル)

Fig.26 Relation between the horizontal displacement of tunnel wall and the results of inclinometer measurements (SAOKA tunnel).

という形態をとって重畳して現われる。そして、このせん断型の出現は、片粕トンネルの例のように、地すべりに移行する可能性が大きいものと考えられる。

地中変位の方向は、切羽の進行に伴って、切羽の進行方向に移動する傾向が一般的に読みとれる。しかし、山崎トンネルの例にみられるように、地形あるいは地質構造などに規制された変位が卓越してくると、この変位の方向を示すようになり、施工管理上、重要な情報といえる。

山崎トンネルと佐岡トンネルにおいて求められた地表面の沈下曲線の形状をみると、地下曲線が舟底状のときに、地中変位形態はせん断型を示し、すりばち状のときに傾動型を示している。一般に、横断方向沈下形状は正規分布曲線に従うとした予測式が提案されているが、これは地中変位形態が傾動型を示す場合に該当するものと考えられる。しかし、せん断型の変位形態が現われた場合、地質構造などによって規制されるような形で、沈下範囲が不定形状に広がる可能性が大きいことが予想される。これについては、事例が少ないので確かなことはわからないが、地中変位形態に着目することによって、初期の段階において、沈下形状を推定する手がかりとすることが考えられる。

表-3 トンネル状況一覧表

Table 3 A list of each tunnel condition.

トンネル名 ()※1	吾桑トンネル (下半断面)	市宇トンネル (上半断面)	山崎トンネル (上半断面)	片粕トンネル (上半断面)	佐岡トンネル (川側導坑)	佐岡トンネル (上半断面)
孔内傾斜計 変位 深度1.00mまでの 累積変位量	18mm (No.16測線)	13mm (No.104+10)	32mm (No.15+0)	B-1 20mm (No.150+0)	15mm (No.43+5.0)	14mm (No.43+5.0)
内空変位量 (スプリングライン)	20.5mm (No.16測線)	—	—	—	20mm (No.43+7.65)	14mm (No.43+8.43)
観測期間	S56.6月1日 } S56.7月24日	S56.1月7日 } S56.1月24日	S57.12月15日 } S58.1月14日	S58.7月2日 } S58.7月26日	S58.7月15日 } S58.8月11日	S59.4月28日 } S59.5月22日
トンネル掘削 工法	上部半断面先 進工法(送り)	山側導坑先進 NATM	両坑口付近側 壁導坑先進工 法(送り) 上部半断面先 進工法(縫地)	上部半断面先 進 NATM	側壁導坑先進 NATM	側壁導坑先進 NATM
土被り厚 ※2	11m	9m	20m	15m	14m	12m
測線上斜面 横断傾斜	38°	40°	15°	41°	20°	20°
地質 ()…斜面に対 する構造	砂岩・頁岩互層 (流れ盤)	砂岩・頁岩互層 (受け盤)	段丘堆積物 砂岩 (受け盤)	砂岩・頁岩互層 (流れ盤)	段丘堆積物 砂岩頁岩互層 (受け盤)	同左

※1 測定時の掘削加背割

※2 観測測線とトンネルEとの交点

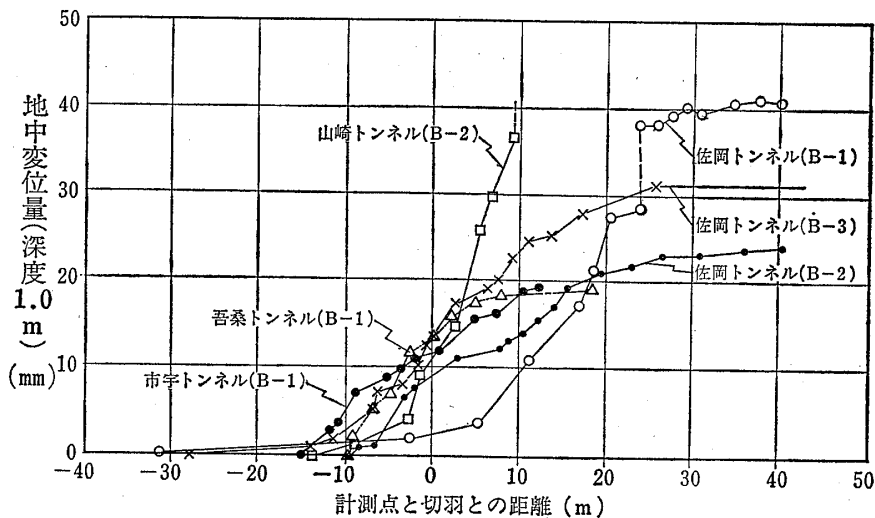


図-27 切羽距離と孔内傾斜計による変位の係関

Fig.27 Relation between the displacement by inclinometer measurements and the distance from tunnel face.

図-27は、吾桑トンネル、市宇トンネル、山崎トンネル、佐岡トンネルにおける地中変位計測結果を、切羽距離との関係によって示したものである。この図から明らかのように、土被り厚が薄い場合には、切羽が到達する以前において全変位量の50%あるいはそれ以上の変位量に達するものもあり、切羽が到達するまでの変位にも充分注目する必要がある。このように、トンネル内部において計測する方法では不可能な、切羽が到達する前からの地山の挙動を把握できることは、孔内傾斜計による変位計測の利点といえる。

孔内傾斜計によって得られた地山挙動は、トンネル掘削によって生ずる施工基面から地表までの種々の変位を含むものであるが、変位形態や地中変位方向などに着目し、地形、地質状況などと総合して考察することによって、計測された変位の持つ意味を解明することが可能であると考える。

5 謝辞

この報文の基礎データである孔内傾斜計による変位計測に当っては、建設省四国地方建設局土佐国道工事事務所、ならびに高知県土木部道路課、南国土木事務所および土佐清水土木事務所の関係各位からいただいた御懇切

な御指導に対し感謝するとともに、執筆に当っては、計測結果の使用の御許可をいただいたことに対し御礼申し上げる次第である。

参考文献

- 榎並谷哲夫・市原正宏・宮崎勝年(1983)：崩壊型地すべり部におけるトンネル坑口対策について 第15回日本道路会議論文集
- 堀伸三郎・成田賢・井上芳幸(1982)：孔内傾斜計測定結果から見た地すべりの挙動 応用地質調査事務所年報 No.4
- 池本正英(1985)：偏圧地形を掘る——国道321号片粕トンネル——トンネルと地下 Vol.16 No.4
- 近藤達敏(1979)：NATM工法における変位予測手法 応用地質調査事務所年報 No.1
- 岡林章・北岡俊雄・堀伸三郎・成田賢・松山泰治(1984)：トンネル施工管理の一手法としての孔内傾斜計測定結果の利用 第19回土質工学研究発表会講演集 P.1387~1388
- 桜井春輔(1982)：トンネル工事における変位計測結果の評価法 土木学会論文報告集 317号