

# 発泡スチロール布設による剛性カルバートの鉛直土圧軽減効果に関する現地試験結果

島田忠則<sup>1</sup>・平野毅志<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 四国道路エンジニア株式会社 (〒760-0018 高松市天神前 10 番 5 号)

<sup>2</sup>日本道路公団 中国支社 広島技術事務所 (〒731-0103 広島市安佐南区緑井 2-26-1)

発泡スチロールを用いた剛性カルバートの鉛直土圧軽減工法の現地試験は、昭和 53 年から平成 10 年までに 11 事例 (高速道路 7)、発泡スチロールを用いていない突出型の剛性カルバートの現地試験は 19 事例 (高速道路 11) が報告されている。これらの資料を収集整理して、発泡スチロールを用いていない無処理の場合の剛性カルバートに作用する鉛直土圧の大きさを決定する要因と、発泡スチロールを用いた場合について、発泡スチロールの布設条件と鉛直土圧軽減効果の関係を明確にした。また、今までの調査報告は、発泡スチロールの圧縮沈下と鉛直土圧軽減効果の関係を主に言及していたが、本文においては、それに加えてカルバート裏込め部の圧縮沈下の影響についても着目して検討することにより、カルバート周辺の圧縮沈下と鉛直土圧軽減効果の関係を明確にした。

*Key Words* : culvert, earth pressure, vertical earth pressure reduction, compression settlement of the backfill, compression settlement of the expanded polystyrol

## 1. はじめに

道路盛土が、農道などの幅の狭い道路や水路と交差する場合、通常、盛土の中に鉄筋コンクリート造の横断構造物 (剛性カルバート) を設置する。剛性カルバートの幅や高さ比べて盛土高さが大きい場合には、剛性カルバートがいわゆる突出型の埋設構造物として挙動し、横断構造物には土かぶり厚から算定した土かぶり圧よりも大きい鉛直土圧が作用する<sup>1), 2), 3), 4)</sup>。このため、剛性カルバートの設計に用いる鉛直土圧は土かぶり圧を基本とし、土かぶり厚が大きい場合には、土かぶり厚に応じてこれを割り増した値が用いられる<sup>5), 6)</sup>。

我が国の高速道路網整備の進捗につれ島嶼横断道路の建設が進められるようになり、日本道路公団の建設する盛土の中には 30m を越える盛土も現れてきた。このような高盛土の中の横断構造物を剛性カルバートによって建設する場合には、平野部における 5~6m 程度の土かぶり厚の場合に比べて 2~3 倍程度の壁厚を持ったものが必要となり、そのための建設費は土かぶり厚が 30m の場合には 3 倍程度にまで増大する。

これに対処し、山岳地での高速道路の建設費縮減を図るため、高盛土の場合には、ボックス型の剛性カルバートに代えて、アーチ型の剛性カルバートを採用するなどの工夫を重ねてきた。さらに平成 9 年 12 月から、土かぶり厚がカルバート幅の 2 倍以上の場合には、ボックス型

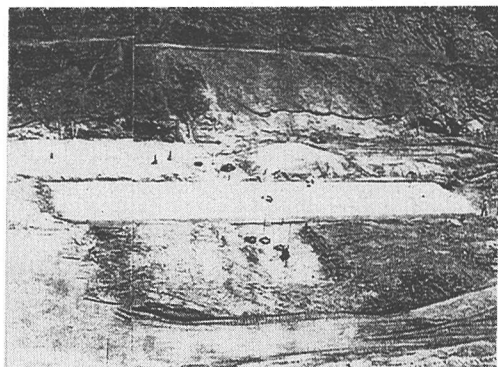


写真-1 発泡スチロールの布設状況 (No. 25)

の剛性カルバートの直上に厚さ 50 cm の板状の発泡スチロールを敷き詰め (写真-1)、これによって剛性カルバートに作用する鉛直土圧を軽減し (図-1)、高速道路建設の経済性を向上させることとした<sup>39)</sup>。

この鉛直土圧軽減工法は、剛性カルバート直上の発泡スチロールが圧縮されることにより、構造物周辺の土中応力分布が変化し、構造物に作用する土圧の挙動が突出型からいわゆる溝型に変わることを応用したものである。基礎地盤上にカルバートを直接設置し、全体をかぶせるような盛土をする場合、裏込め部の盛土の剛性はカルバートに比較して相当小さいため、それが圧縮沈下する際

表1 カルバートに作用する土圧の測定事例の一覧表

測定箇所番号	高速道路関係	鉛直土圧軽減工法	調査期間	カルバート形式及び寸法			盛土材料				鉛直土圧の測定			土圧計		参考文献の部	参考文献No.		
				形式	幅(Bo) (m)	高さ(Ho) (m)	土質	土の単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	鉛直土圧増加 (注)	土かぶり厚 (m)	基礎形式	基礎地盤 (注)	経時変化	掘削方向	掘削方向			水圧土圧の測定	寸法
1	-	-	S30.11~S33.4	アーチ	3.00	3.70	砂	21	I	25.0	直接基礎	D	-	-	2	-	φ120mm	-	1
2	○	-	S39.6~S39.12	コルゲート	2.01	2.01	ローム	13	I	18.8	直接基礎	B	○	-	1	○	φ220×22mm	○	18
3	-	-	S50.9~S51.8	ボックス	3.10	3.93	シルト混り砂	19	I	18.5	直接基礎	D	-	-	3	2	○	-	2
4	-	-	S52.7~S53.10	アーチ	4.60	4.70	砂質土	17	I	18.9	直接基礎	D	-	-	1	○	-	-	19
5	-	-	S52.7~S53.10	ボックス	6.20	4.75	砂質土	16	I	10.6	直接基礎	B	-	-	4	1	○	-	19
6	-	-	S52.7~S53.10	コルゲート	1.51	1.51	砂質土	17	I	20.8	直接基礎	B	-	-	1	○	-	-	19
7	-	-	S52.7~S53.10	アーチ	4.20	3.70	砂質土	19	II	20.3	直接基礎	C	-	-	2	○	-	-	19
8	-	-	S54.11~S56.11	ボックス	3.00	3.50	粘土質シルト	17	I	8.6	杭基礎	A	-	-	3	1	○	-	3
9	-	-	S53.8~S57.3	ボックス	1.90	1.90	風化泥岩	17	I	8.6	杭基礎	A	○	-	3	1	○	-	3
10	○	-	S42.11~S43.5	パイプ	2.48	2.48	凝灰質砂岩	18	I	23.0	直接基礎	D	-	-	3	○	-	-	20
11	○	-	S52.6~S54.2	アーチ	11.00	10.70	ローム質粘土	15	II	18.3	直接基礎	C	○	-	1	○	縦面φ300×40mm 土中φ300×4mm	-	21
12	○	-	S52.5~S54.8	アーチ	10.60	14.13	高含水比粘土 スレーキング泥岩	18	II	17.8	直接基礎	B	○	1	4	○	-	-	22
13	○	-	S60.4~S61.12	アーチ	15.50	15.65	砂質ローム 凝灰質砂岩	15	I	17.3	直接基礎	C	○	-	2	○	φ80×18.2mm	○	23
14	○	-	S63.1~S63.4	アーチ	14.00	11.90	片岩の軟岩	22	II	8.1	直接基礎	C	-	-	2	○	-	-	24
15	○	-	S55.6~S56.8	アーチ	6.30	7.75	凝灰質粘土	20	I	15.2	直接基礎	B	○	-	1	○	φ160×25mm	-	25
16	○	-	S55.5~S56.8	アーチ	10.60	11.49	シラス	20	I	24.9	杭基礎	A	○	-	1	○	φ160×25mm	-	25
17	○	-	S54.3~S55.12	アーチ	11.50	12.07	トンネルズリ質岩	21	III	17.0	直接基礎	D	○	-	1	○	-	-	25
18	○	-	S53.7~S54.8	アーチ	7.80	9.05	シラス	15	II	15.0	直接基礎	C	○	-	1	○	-	-	25
19	○	-	S53.8~S57.3	ボックス	7.60	7.80	粘土質シルト	20	I	25.0	直接基礎	D	-	-	1	-	-	-	26
20	○	○	S53.11~S55.1	ボックス	10.70	7.60	火山灰砂質土	13	I	13.2	直接基礎	D	○	5	2	-	φ160×25mm	○	10
21	○	○	S55.6~S57.10	アーチ	8.40	10.10	火山灰	17	II	23.6	直接基礎	C	○	-	4	○	-	-	11
22	○	○	S61.3~S62.1	パイプ	1.74	1.74	マサ土	20	I	9.6	直接基礎	D	○	-	6	-	縦面φ300×40mm 土中φ300×4mm	-	4
23	-	○	S63.9~H4.7	パイプ	1.95 1.71	1.95 1.71	マサ土	19	I	14.0 15.0	直接基礎	-	○	-	1	○	-	-	27
24	-	○	H1.8~H4.7	ボックス	2.00	2.55	マサ土	19	I	11.3	直接基礎	-	○	-	1	-	-	-	27
25	○	○	S63.12~H2.12	アーチ	4.70	5.05	マサ土 シルト混り砂	20	I	22.0	直接基礎	D	○	-	6	○	縦面φ148×4mm 土中φ300×4mm	○	28
26	○	○	H4.9~H5.11	パイプ	1.72	1.72	シルト質砂	19	I	6.1	直接基礎	D	-	-	-	-	-	-	29
27	○	○	H4.7~H8.10	アーチ	13.00	15.20	マサ土	20	III	18.4	直接基礎	D	○	-	2	○	φ160×25mm	-	30
28	-	○	H5.11~H7.1	ボックス	7.10	7.20	シルト混り砂質土	18	II	20.4	直接基礎	-	○	-	2	-	-	-	16
29	○	○	H7.9~H9	ボックス	7.00	7.00	マサ土	19	II	12.9	直接基礎	C	○	3	3	-	φ92×20.5mm	○	31
30	-	○	H8.1~H9	ボックス	4.70	3.45	マサ土	19	I	61.4	直接基礎	D	○	3	3	○	φ172×25.5mm	○	17

(注)本文中に記号を注釈

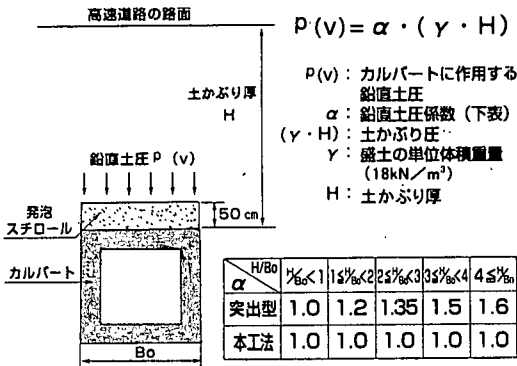


図1 カルバートの設計に用いる鉛直土圧係数の考え方

に裏込め上部の盛土がカルバート上部の土塊にぶら下がるかっこうになる。このため、カルバート上部の土塊には下向きの力が摩擦力として作用する。このような土の挙動を「突出型」という。基礎地盤に溝を掘ってカルバートを設置して土で埋め戻す場合、埋め戻し土の剛性は基礎地盤より小さいため、埋め戻し土の部分が圧縮沈下する際に周辺部にぶら下がるかっこうになる。このため、

埋め戻し土の部分には上向きの力が摩擦力と作用する。このような土の挙動を「溝型」という。

鉛直土圧軽減工法と同様の現象はトンネル掘削における緩み土圧理論<sup>7)</sup>に見ることができ、また、スパングラ<sup>8)</sup>は埋設管の上に麦わらを敷くことによって鉛直土圧が低減できると提案し、ベックも埋設管の直上をゆるく埋め戻すことによって鉛直土圧が小さくなると記述している<sup>9)</sup>。

しかし、発泡スチロールの圧縮性や厚さ、剛性カルバートの幅や高さ、土かぶり厚による土圧軽減効果の定量的な資料は少なく、このことを明らかにするため昭和53年以降室内試験や現場での実証試験を実施してきた。その結果、すでに報告したように、厚さ10cmの発泡スチロールを用いることによって、高さ7mの盛土内に埋設した内径1.5mの鉄筋コンクリート管に作用する鉛直土圧が土かぶり圧の60%程度まで軽減できることが明らかとなった<sup>4)</sup>。また、この結果とそれまでに実施した2事例の結果<sup>10), 11)</sup>を「カルバート設計における鉛直土圧係数の改訂提言」<sup>12)</sup>としてとりまとめ報告するとともに、平成2~4年に高速道路調査会の「カルバートの効率的な設計施工に関する技術検討委員会」<sup>13), 14), 15)</sup>で

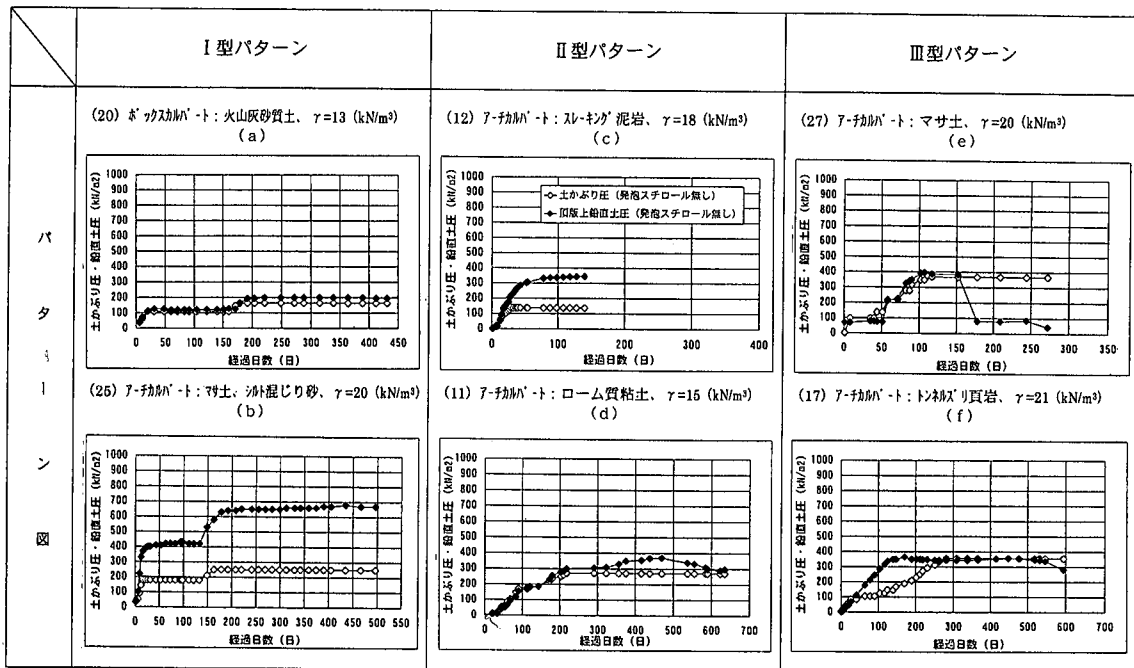


図-2 土かぶり圧と鉛直土圧の経時変化のパターン (無処理)

検討した。その後も、鉛直土圧軽減工法の実証実験を山陽道など4箇所の高速道路建設現場で実施してきた。

本論文では、これらの高速道路建設現場で得た18事例の実測結果に加え、大江ら<sup>16)</sup>、相良ら<sup>17)</sup>の実施した現地試験の報告をはじめとする12事例の実測結果も参考に、土圧軽減効果を確保する要件について検討した結果を報告する。

## 2. 調査概要

カルバートに作用する土圧の測定事例30の内訳は、表-1のとおりである。高速道路関係は18事例、その他は12事例である。鉛直土圧軽減工法を採用しない場合(以下無処理と示す)は19事例、鉛直土圧軽減工法の場合は11事例である。カルバートの形式はアーチカルバート14事例、ボックスカルバート10事例、パイプカルバート4事例、コルゲートメタルカルバート2事例である。カルバートの形式別の最大寸法(幅 $B_0$ ×高さ $H_0$ )は、14.0m×11.9mのアーチカルバートであり、最小寸法は直径1.5mのコルゲートメタルカルバートである。

裏込め部および盛土に使用した材料は、粘性土6事例、砂質土20事例、スレーキングしやすい岩(乾湿繰り返しにより土砂化する岩)1事例、不明3事例である。盛土材料の主たる単位体積重量は18~21kN/m<sup>3</sup>である。この単位体積重量は、高速道路の場合それぞれの現場の密度

管理図から、カルバート周辺で使用されている盛土の全材料の密度を平均してもとめた値である。カルバートの土かぶり厚は約4~61mである。

カルバートの基礎形式は、直接基礎27事例、杭基礎3事例である。基礎地盤は、杭基礎にした軟弱地盤のケース(A)が3事例あり、カルバート直下の基礎地盤の変形係数と裏込め部のそれを比較した場合、不良地盤の置き換えによってその差が相当大きいケース(B)が5事例、カルバート底面は深く掘削して良好な地盤上にあるが裏込め部は表層の不良地盤のためその差が相当大きいケース(C)が6事例、両者がだいたい同じケース(D)が12事例、不明が4事例である。

カルバートに作用する鉛直土圧を測定しているのは29事例である。ボックスカルバートについては横断方向に土圧計を設置し、鉛直土圧の変化を測定したものが6事例ある。パイプカルバートについては縦断方向に土圧計を6個設置し鉛直土圧の変化を測定したものが1事例ある。また、鉛直土圧の経時変化を観測したものが19事例ある。カルバートに作用する水平土圧を測定しているのは16事例である。土圧の計測に用いた計器類は表-1のとおりである。鉛直土圧軽減工法の現地試験における土圧計の設置位置を後述の表-2に示す。アーチカルバートやパイプカルバートの鉛直土圧は頂版部での測定値である。ボックスカルバートの鉛直土圧は後述するように、頂版部横断方向に数点測定したケースもあるが、アーチなど他の構造形式と比較検討する場合は中央部での

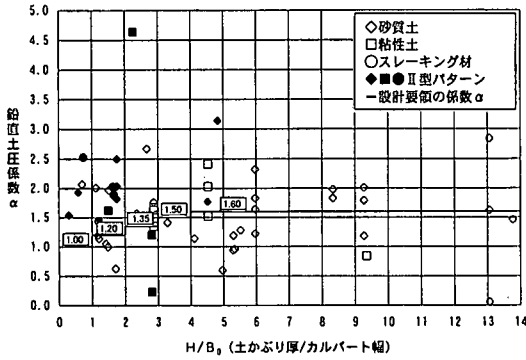


図-3 H/Bo と鉛直土圧係数  $\alpha$  の関係 (無処理)

測定値を用いた。無処理の場合も同様である。カルバート裏込め部の圧縮沈下量を測定したものが9事例である。

### 3. 無処理の場合の土圧

#### (1) 鉛直土圧

##### a) 経時変化のパターン

カルバートに作用する鉛直土圧の経時変化を計測した19事例について、横軸に経過日数、縦軸に土かぶり圧および鉛直土圧をとって整理すると3パターンに分類できる。図-2はその一例である。I型パターンは、盛土が完了すると鉛直土圧の増加も終わる一般的なパターンで11事例ある。II型パターンは、盛土完了後も鉛直土圧が増加するパターンで6事例ある。このパターンは、盛土材料の土質が粘性土やスレーキングしやすい岩のものにみられる。砂質土の中でもII型パターンの鉛直土圧の挙動を示すものがあるが、これは、別に報告したごとく、カルバート裏込め部の盛土の含水比や締固めの程度などに関係していると判断される。また、裏込め部の盛土材や締固めは良くても、基礎地盤が軟弱層の場合、カルバート直下を良質材で置き換えたり、杭基礎にしたケースでII型パターンの鉛直土圧の挙動を示す場合がある<sup>38)</sup>。なお、II型パターンの鉛直土圧の挙動を示すもののうち、図-2(d)のごとく、計測中に鉛直土圧が土の応力の再配分などによって減少し、ある一定値に落ち着いているケースもある。III型パターンは、盛土中または完了後に鉛直土圧が減少するパターンである。このパターンの鉛直土圧の挙動を示すものは2事例である。2事例とも盛土材料などは良く、カルバートが基礎地盤の支持力不足等によりわずかに不等沈下したことが原因と判断される。

##### b) H/Bo と鉛直土圧係数 $\alpha$ の関係

図-3は、横軸にH/Bo (カルバートの土かぶり厚/カ

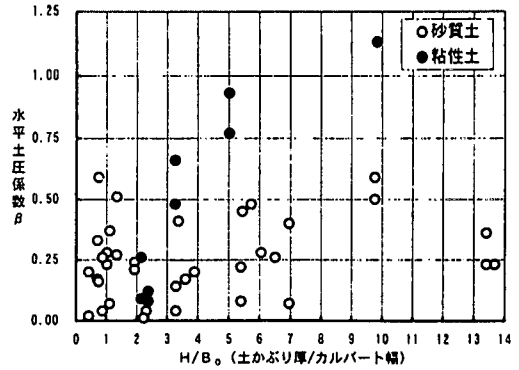


図-4 H/Bo と水平土圧係数  $\beta$  の関係 (無処理)

ルバートの幅)をとり、縦軸に鉛直土圧係数 $\alpha$ をとって、その関係をみたものである。同一事例で鉛直土圧をカルバート縦断方向に複数計測している場合はすべてプロットしている。また、ボックスカルバートにおいて鉛直土圧を横断方向に複数計測している場合は、ボックス中央部の計測値のみをプロットしている。アーチカルバートやパイプカルバートは頂部で計測した鉛直土圧のみをプロットしている。

I型パターンについては、最終土かぶり厚で計測した鉛直土圧をカルバート直上の土かぶり圧(土かぶり厚 $\times$ 土の単位体積重量)で割った値を鉛直土圧係数 $\alpha$ としてプロットしている。II型パターンについては、最終土かぶり厚のときに計測した鉛直土圧の最大値を土かぶり圧で割った値を鉛直土圧係数 $\alpha$ としてプロットしている。なお、鉛直土圧の経時変化を計測してなくても、最終のH/Boで鉛直土圧係数 $\alpha$ が増加している場合はII型パターンとし、増加してない場合はI型パターンとしている。III型パターンについては、計測した最大の鉛直土圧を土かぶり圧で割った値を鉛直土圧係数 $\alpha$ としてプロットしている。図中、階段状に示す太線は高速道路の場合のカルバート設計に用いる鉛直土圧係数の設計値を示したものである。また、土質別に記号をかえて(砂質土( $\diamond$ ), 粘性土( $\square$ ), スレーキング材( $\circ$ ))プロットした。I型、III型パターンは白ぬき( $\diamond$ ,  $\square$ ,  $\circ$ )で示し、II型パターンは黒塗り( $\blacklozenge$ ,  $\blacksquare$ ,  $\bullet$ )で示した。この設計値と実測の鉛直土圧係数を比較すると、鉛直土圧係数の実測値は設計値の周辺に分布するのではなく相当広範囲に分散している。この分散の状況はカルバートの形状・寸法や盛土の単位体積重量の違いにはそれほど影響していない。実測の鉛直土圧係数が設計値よりも大きい値を示すのは、鉛直土圧の増加パターンがII型パターンを示す場合に多い。

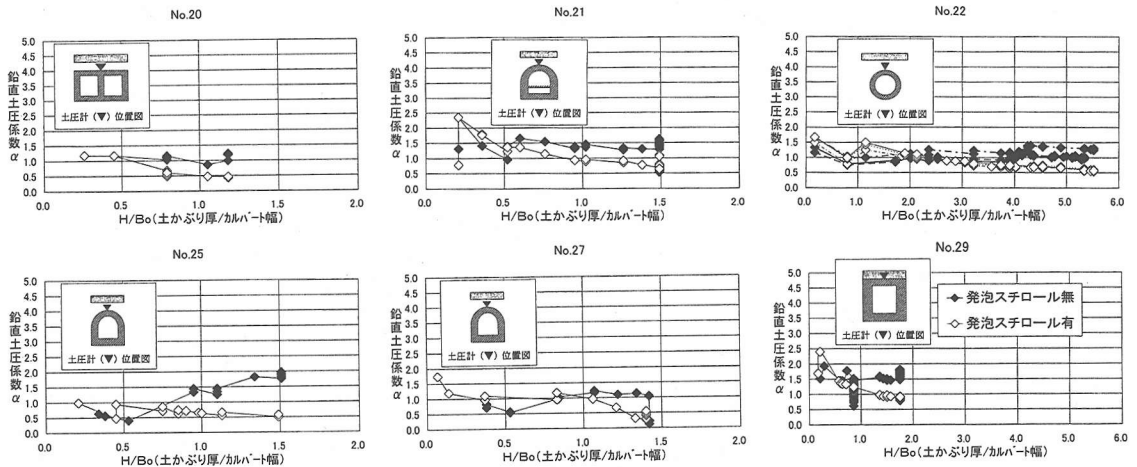


図-5 H/Bo の変化と鉛直土圧係数  $\alpha$  の関係

## (2) 水平土圧

カルバートに作用する水平土圧は16事例で計測している。アーチカルバートの場合、壁に直角に土圧計を設置し斜圧を測定したケースもあるが、本項ではこれを含めずアーチカルバート壁に水平に作用する土圧のみを対象とした。水平土圧は、鉛直土圧の経時変化のような3パターンに分類される傾向はなく、ほとんどの場合、盛土が完了すると水平土圧の増加も終わっている。

図-4は、横軸にH/Boをとり、縦軸に水平土圧係数 $\beta$ をとって、その関係をプロットしたものである。ここで、水平土圧係数 $\beta$ は計測した水平土圧を土かぶり圧で割った値である。水平土圧係数 $\beta$ の実測値はほとんどが0.5以下である。水平土圧係数 $\beta$ が0.5以上となるのは裏込め部の盛土材料が粘性土の場合が主となる。これは、高速道路のカルバート設計に用いる水平土圧係数 $\beta$ を0.3と0.5の両方の値で部材応力を検討し、大きい方の応力で部材を設計する考え方の妥当性を裏付けるものである。ただし、水平土圧係数 $\beta$ が小さ過ぎる場合の設計の考え方は今後さらに検討する必要がある。

## 4. 鉛直土圧軽減工法の場合の土圧

### (1) 概要

表-2に11事例の現地試験の概要を示す。高速道路関係7事例、その他4事例である。カルバートの形式は、ボックスカルバート5事例、アーチカルバート3事例、パイプカルバート3事例である。カルバートの形式別の最大寸法( $B_0 \times H_0$ )は13.0m $\times$ 14.9mの

アーチカルバート、最小寸法は直径1.7mのパイプカルバートである。裏込め部および盛土に使用した材料は、粘性土1事例、砂質土10事例である。使用した盛土材料の主たる単位体積重量は18~20kN/m<sup>3</sup>である。カルバートの土かぶり厚は6.7~61.0mである。カルバートの基礎形式の状況はすべて直接基礎である。基礎地盤は、ケース(C)2事例、ケース(D)6事例、不明3事例である。

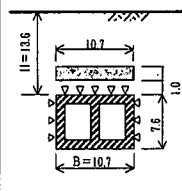
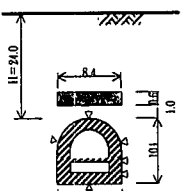
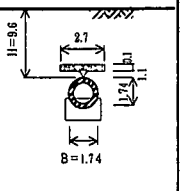
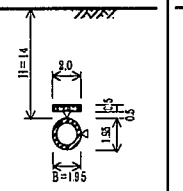
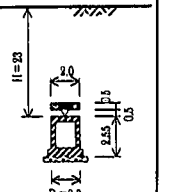


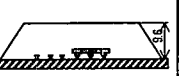


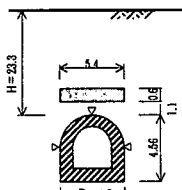
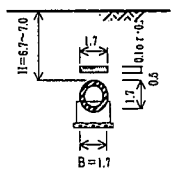
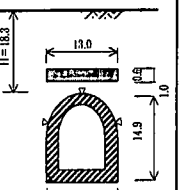
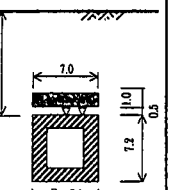
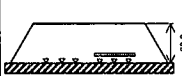

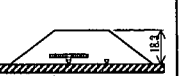
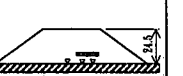
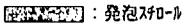
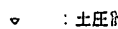
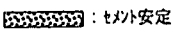
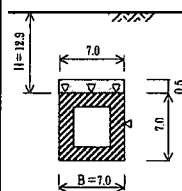
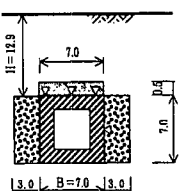
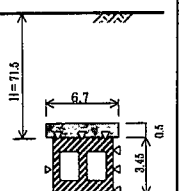
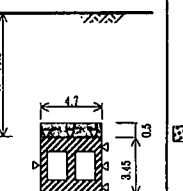
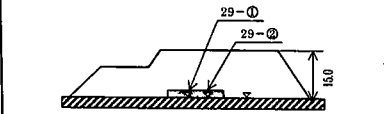
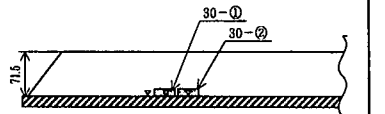
使用した発泡スチロールの密度、厚さ、設置幅、設置高さは次のとおりである。密度は0.012t/m<sup>3</sup>(記号でD-12と示す。以下同じ)1事例、0.016t/m<sup>3</sup>(D-16)4事例、0.020t/m<sup>3</sup>(D-20)4事例、0.025t/m<sup>3</sup>(D-25)1事例、0.030t/m<sup>3</sup>(D-30)1事例である。厚さは10cm2事例、20cm1事例、40cm1事例、50cm4事例、60cm3事例、100cm1事例である(No.7のパイプカルバートの現地試験で10cm、20cmの厚さを比較したため合計が12となっている)。設置幅は、カルバート幅 $B_0$ と同一のケースが10事例、 $B_0$ より広いケースが2事例(No.30のボックスカルバートの現地試験で $B_0$ 、 $B_0+2m$ の設置幅を比較したものとNo.22の $B_0+1m$ )である。設置高さは、カルバートより0.5~1.1m程度土を盛った上に布設したケース9事例、カルバート直上に布設したケース2事例である。

### (2) 鉛直土圧

#### a) 土かぶり厚と鉛直土圧係数の関係

図-5は、高速道路で実施した現地試験について、横軸にH/Boをとり、縦軸に鉛直土圧係数 $\alpha$ をとって、無処理の場合のカルバート上面の鉛直土圧係数(◆)および発泡スチロールを布設した場合(以下土圧軽減と

表-2 鉛直土圧軽減工法の現地試験の概要一覧

個所番号	20	21	22	23	24
形状・寸法	 <p>土質：火山灰砂質土 単位体積重量：13 (kN/m<sup>3</sup>)</p>	 <p>土質：火山灰 単位体積重量：17 (kN/m<sup>3</sup>)</p>	 <p>土質：マサ土 単位体積重量：20 (kN/m<sup>3</sup>)</p>	 <p>土質：マサ土 単位体積重量：19 (kN/m<sup>3</sup>)</p>	 <p>土質：マサ土 単位体積重量：19 (kN/m<sup>3</sup>)</p>
					
免泡スチロール (密度・厚さ・幅)	D-16・40cm・10.7m	D-20・60cm・8.4m	D-12・10cm・2.7m	D-20・50cm・2.0m	D-20・50cm・2.0m
個所番号	25	26	27	28	凡例
形状・寸法	 <p>土質：マサ土, 沖組じり砂 単位体積重量：20 (kN/m<sup>3</sup>)</p>	 <p>鉄筋計で計測 土質：シルト質礫 単位体積重量：19 (kN/m<sup>3</sup>)</p>	 <p>土質：マサ土 単位体積重量：20 (kN/m<sup>3</sup>)</p>	 <p>土質：9% 沖組り礫質土 単位体積重量：18 (kN/m<sup>3</sup>)</p>	
					
免泡スチロール (密度・厚さ・幅)	D-16・60cm・5.4m	D-16・10or20cm・1.7m	D-16・60cm・13.0m	D-20・100cm・7.0m	 : 免泡スチロール
個所番号	29		30		 : 土圧計   : 土質安定
形状・寸法	①	②	①	②	
	 <p>土質：マサ土 単位体積重量：19 (kN/m<sup>3</sup>)</p>	 <p>土質：マサ土 単位体積重量：19 (kN/m<sup>3</sup>)</p>	 <p>土質：マサ土 単位体積重量：19 (kN/m<sup>3</sup>)</p>	 <p>土質：マサ土 単位体積重量：19 (kN/m<sup>3</sup>)</p>	
					
免泡スチロール (密度・厚さ・幅)	D-25・50cm・7.0m	D-25・50cm・7.0m	D-30・50cm・4.7m	D-30・50cm・6.7m	

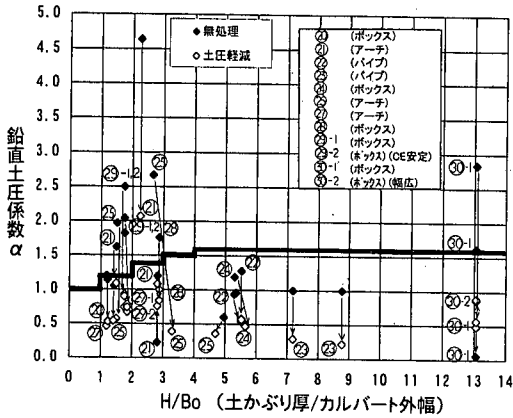


図-6 H/Boと鉛直土圧係数αの関係

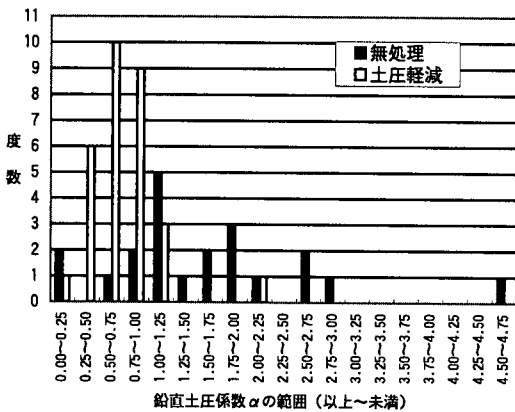


図-7 鉛直土圧係数αの度数分布

示す)の鉛直土圧係数(◇)の関係を個所ごとにプロットしたものである。図-5に示すごとく、カルバートの形式に関係なく、無処理の場合は、ほとんど鉛直土圧係数αが1.0より大きい値で推移するのに対し、土圧軽減の場合は、鉛直土圧係数αが1.0より小さい値で推移しているものが多く、鉛直土圧軽減の効果が確認できる。

**b) 最終土かぶり厚と鉛直土圧係数の関係**

図-6は、横軸にH/Boをとり、縦軸に鉛直土圧係数αをとって、最終土かぶり厚におけるH/Boと無処理と土圧軽減の場合の鉛直土圧係数αの関係をプロットしたものである。図中の階段状に示す太線は高速道路の場合の設計値を示す。

図-7は、無処理と土圧軽減の場合のカルバートに作用する鉛直土圧係数αの度数分布を整理したものである。図-6, 7から明らかなように、カルバートの形式に関係なく、無処理の場合はほとんど鉛直土圧係数αが1.0より大きい値を示すのに対し、土圧軽減の場合は1.0より小さい値を示しているものが多く、発泡スチロール

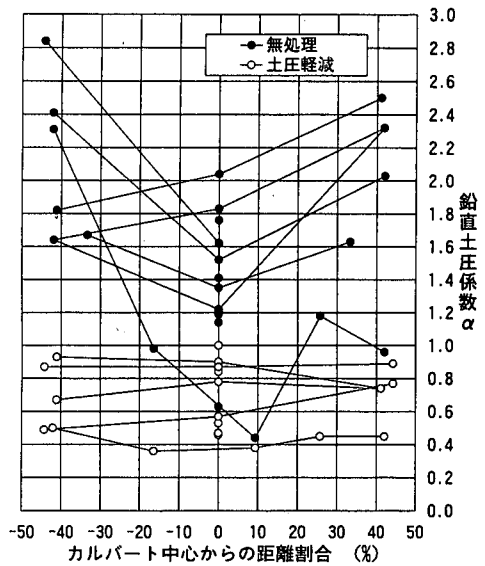
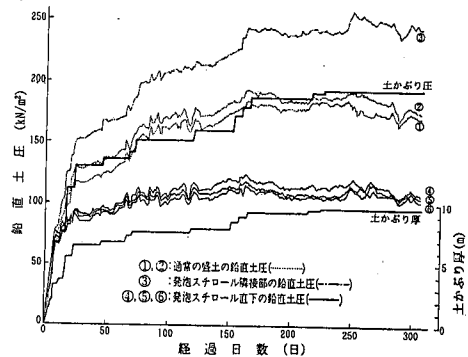
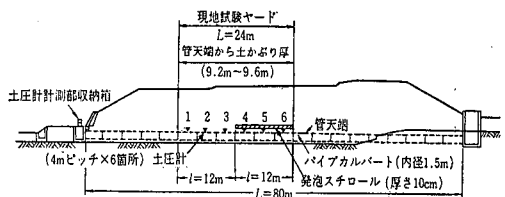


図-8 ボックスカルバート横断方向の鉛直土圧係数



(a)土かぶり厚および鉛直土圧の経日変化



(b)パイプ縦断面図

図-9 パイプカルバート縦断方向の鉛直土圧

の布設による鉛直土圧軽減の効果が明確に表われている。

**c) ボックスカルバート横断方向の鉛直土圧係数**

図-8は、横軸にボックスカルバートの中心からの距離割合(%)をとり、縦軸に鉛直土圧係数αをとって、カルバート上面に発泡スチロールを布設した場合とそうでない場合の、各ボックスカルバートの横断方向の任意の計測点での鉛直土圧係数αの値をプロットしたものである。ボックスカルバートの中心からの距離割合(%)とは、

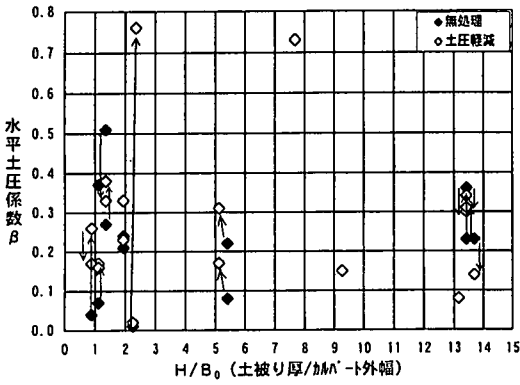


図-10 H/Bo と水平土圧係数  $\beta$  の関係

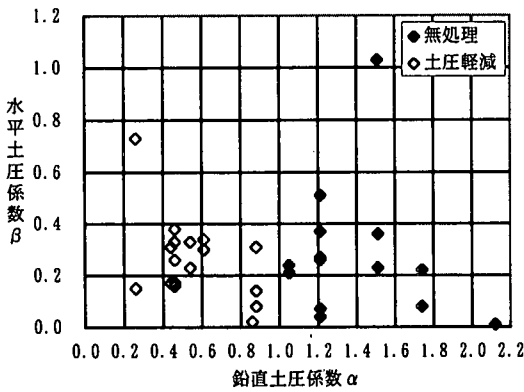


図-11 鉛直土圧係数と水平土圧係数の関係

ボックス横断方向の土圧計のカルバート中心からの距離をボックス幅  $B_0$  で割った値である。カルバート端部で50%となる。右側を④、左側を③とした。

無処理の場合は、カルバート端部付近の鉛直土圧係数  $\alpha$  が 1.0 より大きくかつ中央部より大きくなる凹部の状況を示している。土圧軽減の場合は、鉛直土圧係数  $\alpha$  が 1.0 より小さくなっておりかつ比較的平準化した鉛直土圧係数の分布状況となっている。

#### d) 鉛直土圧の分散

図-9(a)は、No. 22 のパイプカルバートにおける無処理と土圧軽減の場合の鉛直土圧の変化の状況を見たものである。図-9(b)の縦断面図に示すごとく、土圧計を4mピッチで6個所設置しており、発泡スチロールの布設端部から土圧計③までの最短距離は2mである。この土圧計③の鉛直土圧は、土圧計①、②に比較して約1.4倍の値となっている。これは発泡スチロールの直下の管に作用すべき鉛直土圧の一部が、端部ではパイプの横断方向だけでなく縦断方向にも分散したためである<sup>9)</sup>。

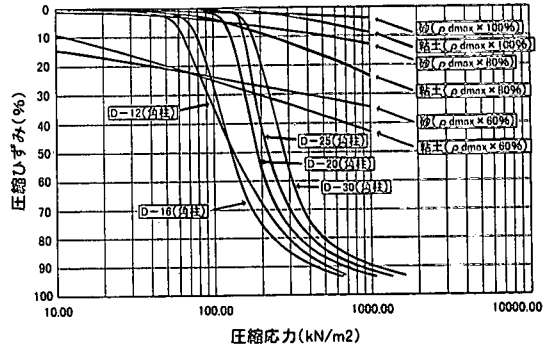


図-12 発泡スチロールと盛土材の圧縮特性の比較

### (3) 水平土圧

図-10は、横軸に  $H/B_0$  をとり、縦軸に水平土圧係数  $\beta$  をとって、無処理の場合のカルバート側面の水平土圧係数(●)および土圧軽減の場合の水平土圧係数(◇)の関係をプロットしたものである。発泡スチロールを布設した場合、無処理の場合よりも水平土圧係数が増加しているケースが13事例、逆に減少しているケースが7事例となっている。

図-11は、横軸に無処理の場合と土圧軽減の場合の鉛直土圧係数をとり、縦軸にそれぞれの場合の水平土圧係数をとって、両者の関係をみたものである。鉛直土圧係数の大きさと発泡スチロールの布設の有無による水平土圧係数の増減には相関はみられない。図-10, 11 から明らかのように、水平土圧係数  $\beta$  は発泡スチロールの布設の影響を受けていないと判断される。

## 5. カルバート周辺の圧縮沈下

### (1) 発泡スチロールと盛土材の圧縮特性の比較(室内試験)

#### a) 発泡スチロールの圧縮特性

図-12は、横軸に圧縮応力( $kN/m^2$ )をとり、縦軸に圧縮ひずみ(%)をとって、各密度の発泡スチロールと盛土材(砂質土及び粘性土)の値をプロットし比較したものである。発泡スチロールの形状寸法は  $10 \times 10 \times 10$  cmの角柱である。砂質土及び粘性土については、最大乾燥密度  $\sigma_{max}$  と( $\sigma_{max} \times 80\%$ )と( $\sigma_{max} \times 60\%$ )の締固め状態でのモールド(直径15 cm×高さ10 cm)につめた試料である。これらの一次元圧縮試験(載荷速度1.0%/min)の値をプロットした。

図-12に示すごとく、発泡スチロールの圧縮特性は、その密度によって圧縮応力が50~180  $kN/m^2$ の範囲で弾性変形を示した後に降伏点に達し、わずかの圧縮応力の増加で圧縮ひずみが大きく進行する性質を有している。

発泡スチロールの圧縮特性が、供試体の形状寸法、載



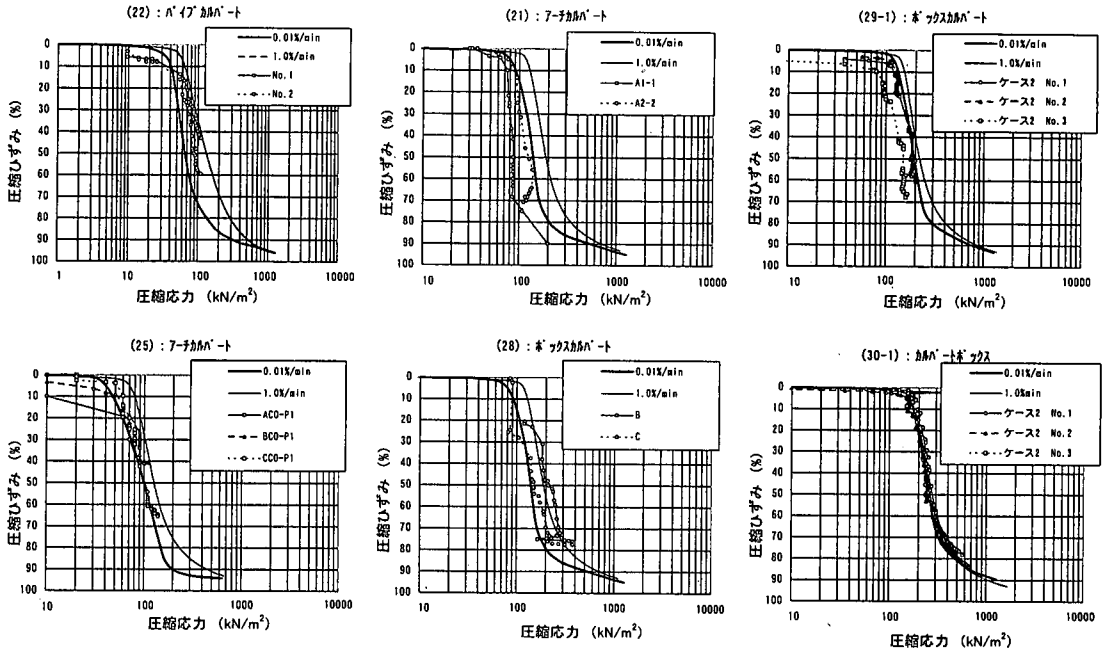


図-13 発泡スチロールの室内と現地の圧縮特性の相違

荷速度、供試体の側方拘束の有無、凍結の影響などによってその結果に違いがあるかどうかを比較した。別に報告したように、供試体の形状寸法は角柱(10×10×10cm)と円柱(直径10cm×高さ20cm)の2種類について、各密度ごとの一次元圧縮試験(載荷速度は1.0%/min)の結果を比較したが結果に大差は無い。載荷速度1.0%/minと0.01%/minの結果を比較すると、載荷速度が遅い方が所定の応力に対して圧縮ひずみが大きくなるという傾向にある。この傾向は高密度のものほどその差は小さい。供試体の側方が拘束されている場合とそうでない場合では、側方拘束されている方が所定の応力に対して圧縮ひずみが小さい傾向にある。発泡スチロールが厳冬下でどのような性状を示すかを確認するために凍結試験機で発泡スチロールを-20℃の状態に4日間さらした供試体(10×10×10cm)を一次元圧縮試験(載荷速度1.0%/min)したが、常温下での結果と大差はない<sup>37)</sup>。

#### b) 盛土材の圧縮特性

図-12に示すごとく、盛土材の圧縮特性は盛土の材質や締固め程度によって異なるが、一般的には発泡スチロールのような明瞭な降伏点を示すことはなく、また、圧縮応力が増加しても、圧縮ひずみは大きく進行することなく漸増する性質を有している。

#### c) 発泡スチロールと盛土材の圧縮特性の比較

図-12に示すごとく、盛土の材質や締固めの程度により、発泡スチロールの剛性が盛土材の剛性より高い(同一応力で圧縮ひずみが小さい)範囲が存在することがわかる。発泡スチロールD-30は圧縮応力が約180kN/m<sup>2</sup>

までは締固め度80%程度の砂質土より剛性が高く、発泡スチロールD-12は圧縮応力が約85kN/m<sup>2</sup>までは締固め度60%程度の砂質土や粘性土より剛性が高くなっている。それ以上の圧縮応力になると砂質土や粘性土の剛性が発泡スチロールの剛性より高くなる。この段階で鉛直土圧軽減効果が発現する。

#### (2) 発泡スチロールの圧縮特性の室内と現地試験の比較

図-13は、横軸に圧縮応力を取り、縦軸に圧縮ひずみをとって、発泡スチロールの密度別に、No. 21, No. 22, No. 25, No. 28, No. 29-①, No. 30-①について、室内と現地試験の結果を描いて、その相違を比較検討したものである。室内試験の結果は、載荷速度1.0%/minと0.01%/min両方の結果を併記した。

室内と現地試験の結果を比較してみると、No. 30-①(D-30)は現地と室内の載荷速度1.0%/minと0.01%/minの結果がともによく一致している。No. 29-①(D-25)は現地が室内の載荷速度0.01%/minの結果より左にくる傾向にある。No. 21(D-20)も同様な傾向にある。No. 28(D-20)は現地と室内の載荷速度1.0%/minの結果がおおむね一致する傾向にある。No. 25(D-16)とNo. 22(D-12)は現地の結果が室内の載荷速度1.0%/minと0.01%/minの間で推移する傾向にある。

なお、No. 29とNo. 30の発泡スチロールの圧縮沈下量は、巻込み型変位計を用いて自動計測しているため、圧縮ひずみが0~20%の範囲のデータの信頼性は十分であるが、No. 21, No. 22, No. 25については、層別沈下計を

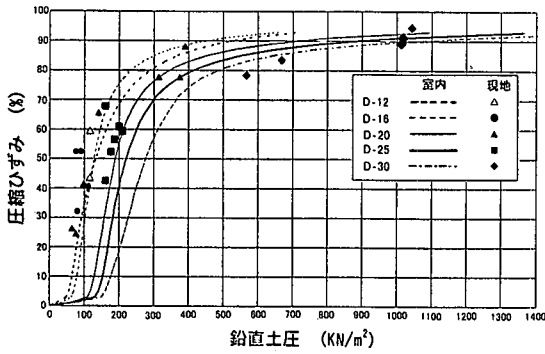


図-14 鉛直土圧と発泡スチロールの圧縮ひずみの関係

用いて手動で計測しているため、盛土の立ち上げ時期に作業が錯綜するなどして、圧縮ひずみ 0~20%の範囲のデータの信頼性に多少精度を欠くところがある。

図-14 は、横軸に鉛直土圧 (kN/m<sup>2</sup>) をとり、縦軸に圧縮ひずみ (%) をとって、図-13 に示す現地試験の最終の鉛直土圧と最終の圧縮ひずみを読みとってプロットしその関係をみたものである。鉛直土圧が大きくなると発泡スチロールの圧縮ひずみも大きくなる傾向にある。最大鉛直土圧 1170kN/m<sup>2</sup> (土かぶり厚さ 61.4m) では、圧縮ひずみは 94% となっている。鉛直土圧が 200kN/m<sup>2</sup> 以下の範囲でみると、圧縮ひずみは 25~70% の範囲で幅広く分布している。圧縮ひずみが大きくプロットされるものは、現地試験の結果が室内の載荷速度 0.01%/min のそれより左にくるケースにみられる。

図-15 は、横軸に発泡スチロールの室内 (載荷速度 1.0%/min) の降伏点の応力 (Py) をとり、縦軸に現地試験における鉛直土圧軽減の開始点をとって、その関係をみたものである。現地試験における鉛直土圧軽減の開始点とは、無処理の場合と土圧軽減の場合の鉛直土圧の増加に違いが見え始めるときの値 (図-9(a) で示すと 70kN/m<sup>2</sup> 前後) をいう。図-15 より、現地において鉛直土圧軽減が開始するときの鉛直土圧と発泡スチロールの室内試験の降伏点の応力は、比較的良好な相関にある。ただし、D-20、D-25 の場合は現地試験の値が小さい傾向にある。この傾向はカルバート裏込め部の圧縮沈下量の大きさに影響を受けている可能性がある。

### (3) カルバート裏込め部および基礎地盤の圧縮沈下

#### a) 測定位置とその結果

表-3 にカルバート裏込め部の圧縮沈下を調査している 9 事例の測定位置とその結果を示す。裏込め部の圧縮沈下は、カルバート側壁から任意の離れた位置でのカルバート天端高さの沈下量を測定したものである。( ) 内の数字は、カルバート裏込め部の圧縮沈下率 (%) を示す。

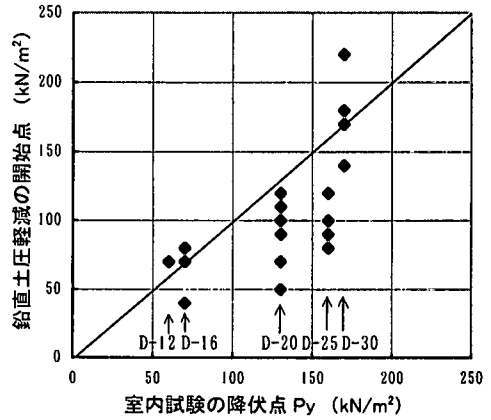


図-15 発泡スチロールの降伏点と鉛直土圧軽減の開始点の関係

ここでカルバート裏込め部の圧縮沈下率  $D/H_0$  (%) とは、カルバート天端高さの所定位置の裏込め部の圧縮沈下量 (D) の値をカルバート高さ ( $H_0$ ) で割った値である。

カルバート裏込め部の圧縮沈下率はおおむね 1~2% である。カルバート裏込め部の圧縮沈下率の最大値は、No. 13 の 4~5% で、土かぶり厚 17.3m で 67.5cm も発生している<sup>23)</sup>。No. 13 の盛土材は砂質土であり、カルバートは基礎地盤が約 5m ルーズな堆積層での施工である。カルバートはルーズな堆積層を掘削して岩盤面に設置されているが、裏込め部はルーズな堆積層を残したまま盛土をしている。このルーズな堆積層の圧縮沈下量が加味され裏込め部の圧縮沈下量が 67.5cm と大きくなったものである。No. 21 も同様な事例である。

No. 20 はボックスカルバートの事例で、不良な基礎地盤 (表層 2.5m までの N 値 3~4、2.5~5.2m 層の N 値 10~16) を置き換えず直接基礎とし、圧縮沈下を予測してカルバートの施工高さを盛土によって上げ越して施工している。このため、カルバート自体が盛土完了時点で約 40cm 沈下している<sup>20)</sup>。裏込め部の圧縮沈下量はこの基礎地盤の圧縮沈下量を含んだものである。

No. 2 はコルゲートメタルカルバートの事例で、コルゲートを囲む裏込め部は盛土全体の圧縮沈下状態からみると突出型を示しているが、盛土中のコルゲートに作用する鉛直土圧係数は 1.0 より小さくなる<sup>18)</sup>。

#### b) 土かぶり圧と裏込め部の圧縮沈下率の関係

図-16 は、横軸に土かぶり圧 (kN/m<sup>2</sup>) をとり、縦軸に無処理と土圧軽減の場合の裏込め部の圧縮沈下率をとって、9 事例の観測値をプロットしたものである。無処理と土圧軽減の場合ともに、土かぶり圧が大きくなると裏込め部の圧縮沈下率は大きくなる傾向にある。土かぶり圧が同じとき、土圧軽減の場合は無処理の場合より裏込め部の圧縮沈下率が大きい<sup>38)</sup>。

表-3 カルバート裏込め部の圧縮沈下の測定箇所および結果の一覧表

<p>No. 2(無処理: ↓) <math>\gamma=13\text{kN/m}^3</math> S=1/250</p>	<p>No. 13(無処理: ↓) <math>\gamma=15\text{kN/m}^3</math> S=1/550</p>
<p>No. 13(無処理: ↓) <math>\gamma=15\text{kN/m}^3</math> S=1/550</p>	<p>No. 20(無処理: ↓), 土圧軽減: ↓ <math>\gamma=13\text{kN/m}^3</math> S=1/350</p>
<p>No. 21(無処理: ↓), 土圧軽減: ↓ <math>\gamma=17\text{kN/m}^3</math> S=1/650</p>	<p>No. 25(無処理: ↓), 土圧軽減: ↓ <math>\gamma=20\text{kN/m}^3</math> S=1/250</p>
<p>No. 29-①(無処理: ↓), 土圧軽減: ↓ <math>\gamma=19\text{kN/m}^3</math> S=1/300</p>	<p>No. 29-②(土圧軽減: ↓) <math>\gamma=19\text{kN/m}^3</math> S=1/300</p>
<p>No. 30-①(無処理: ↓), 土圧軽減: ↓ <math>\gamma=19\text{kN/m}^3</math> S=1/200</p>	<p>No. 30-②(土圧軽減: ↓) <math>\gamma=19\text{kN/m}^3</math> S=1/200</p>

※ 各 S=1/200 等は図の縮尺を示す

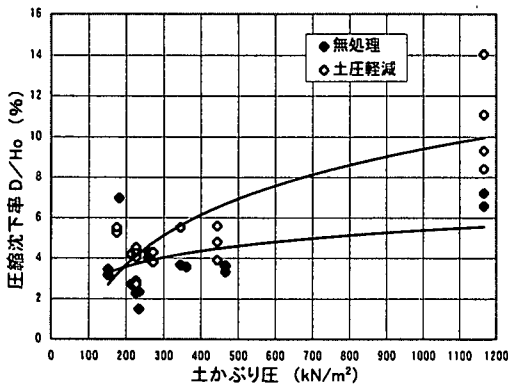


図-16 土かぶり圧と裏込め部の圧縮沈下率の関係

## 6. 鉛直土圧軽減工法の長期安定性

鉛直土圧軽減工法の長期安定性を確認するために、施工後15～18年経過した2箇所の現場(N0.20とN0.21)で追跡調査を実施した。すでに報告したように、発泡スチロールの圧縮沈下が裏込め部の圧縮沈下を上まわる場合、発泡スチロールの圧縮ひずみは63%程度で鉛直土圧軽減の効果が約18年経過しても十分発揮されていること、また、裏込め部の圧縮沈下が発泡スチロールの圧縮沈下を上まわる場合は鉛直土圧軽減の効果は発揮しているものの発泡スチロールの圧縮ひずみが90%に達していることを確認した<sup>36)</sup>。

## 7. 考察

### (1) 発泡スチロールの密度・厚さと鉛直土圧軽減効果の関係

図-17は、横軸に発泡スチロールの密度をとり、縦軸に発泡スチロールを布設した場合の鉛直土圧係数 $\alpha$ をとって、その関係をプロットしたものである。発泡スチロールが低密度の場合は、鉛直土圧係数 $\alpha$ がすべて0.7以下に分布している。高密度の場合は、鉛直土圧係数 $\alpha$ が1.0以上から0.3以下のケースまで幅広く分散している。この図から、発泡スチロールが高密度の場合は、鉛直土圧軽減の効果が発揮されにくいケースがあるが、低密度の場合はそういうことはなく鉛直土圧軽減の効果がよく発揮されているといえる。

図-18は、横軸に発泡スチロールの最終圧縮ひずみ $\varepsilon$ (%)をとり、縦軸にそのときの鉛直土圧係数 $\alpha$ をとって、その関係をみたものである。発泡スチロールの最終圧縮ひずみが大きくなると鉛直土圧係数 $\alpha$ も大きくなる傾向にある。発泡スチロールの圧縮沈下によって生じ

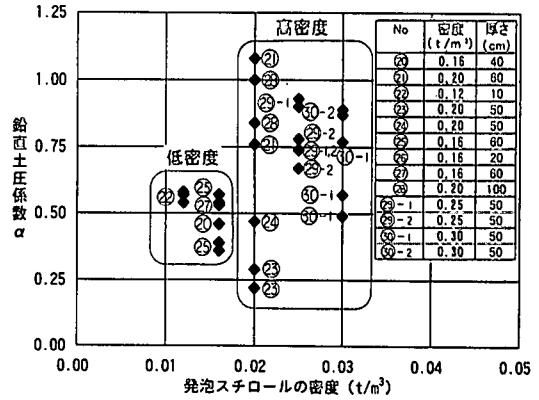


図-17 発泡スチロールの密度、厚さと鉛直土圧係数 $\alpha$ の関係

た構造物周辺の土中応力分布状態が、十分な土かぶり厚を有する堅固な地盤でのトンネル掘削に伴うゆるみのように、その後の土かぶり圧の増加で変化しなければ最終圧縮ひずみと鉛直土圧係数は増加しない。しかし、現状は、土かぶり圧の増加に伴い発泡スチロールがさらに圧縮沈下して土中応力分布状態が変化し、最終圧縮ひずみと鉛直土圧係数が増加するためと判断される。この構造物周辺の土中応力分布状態の変化の程度は、カルバート裏込め部の圧縮沈下の大きさ、発泡スチロールの密度や厚さなどに影響を受けると判断される。

### (2) 発泡スチロールの設置高さ・設置幅と鉛直土圧軽減効果の関係

#### a) 設置高さ

発泡スチロールの設定高さの実施例は、カルバート直上に布設した2事例、50～60cm土を盛った上に布設した4事例、100～110cm土を盛った上に布設した5事例である。すでに報告したように、どの設置高さでも鉛直土圧軽減の効果は発揮されている。カルバートや土かぶり厚の大きさからすると試験範囲程度の設置高さの変化は鉛直土圧軽減効果に影響を与えていない<sup>36)</sup>。

#### b) 設置幅

発泡スチロールの設置幅をカルバート幅( $B_0$ )より大きくした事例は、(No.22)と(No.30)の2事例である。No.30の比較試験からすると<sup>17)</sup>、すでに報告したように、発泡スチロールの設置幅がカルバート幅( $B_0$ )より大きい場合は、設置幅と $B_0$ を同じにしたケースより鉛直土圧軽減の効果が少なくなっている。よって、発泡スチロールの設置幅はカルバート幅( $B_0$ )と同じがよい<sup>34)</sup>。

### (3) 発泡スチロールおよび裏込め部の圧縮沈下と鉛直土圧軽減効果の関係

図-19は、横軸に $H/B_0$ をとり、縦軸に鉛直土圧係数 $\alpha$ と発泡スチロール及び裏込め部の圧縮沈下量をとって、

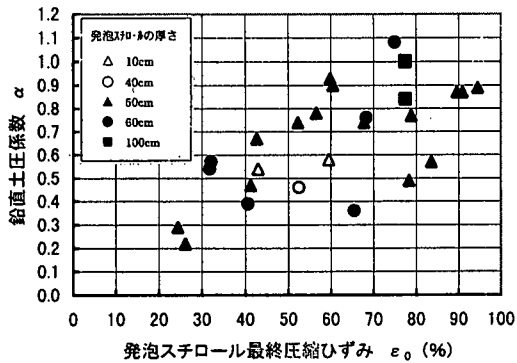


図-18 発泡スチロールの最終圧縮ひずみと鉛直土圧係数  $\alpha$  の関係

No. 21, No. 25, No. 29-①, No. 30-①の4個所の値をプロットしたものである。発泡スチロールの圧縮沈下量(E)が裏込め部のそれ(D)より卓越するNo. 25, No. 30-①は、鉛直土圧係数が0.6以下に軽減しており、十分な鉛直土圧軽減工法が発揮されている。これに対し、裏込め部の圧縮沈下量(D)が発泡スチロールのそれ(E)を上まわるか同等であるNo. 21, No. 29-①の場合は、鉛直土圧係数が0.7以上となっており、鉛直土圧軽減の効果が前者ほどは十分に発揮されていない。

図-20は、横軸に裏込め部の圧縮沈下率(D/Ho)をとり、縦軸に発泡スチロールの圧縮沈下率(E/Ho)をとって、その関係をプロットしたものである。ここで発泡スチロールの圧縮沈下率(E/Ho)はその圧縮沈下量(E)をカルバートの高さ(Ho)で割ってもとめた値である。基礎地盤の圧縮沈下量がある場合は、その値を(D)及び(E)に加算している。

図-20の実線上にプロットされたポイントは、裏込め部の圧縮沈下量(D)と発泡スチロールのそれ(E)が同一であることを意味している。この実線より上部にプロットされたポイントは、発泡スチロールの圧縮沈下量(E)が裏込め部のそれ(D)より大きく、鉛直土圧係数 $\alpha$ は1.0より小さい。また、実線より下部にプロットされたポイントは、発泡スチロールの圧縮沈下量(E)が裏込め部のそれ(D)より小さいことを意味する。これは発泡スチロールを布設したにもかかわらず、カルバートの周辺の盛土の圧縮沈下の実態は、裏込め部の圧縮沈下量(D)が優越している。この実線より下側にプロットされるポイントは、鉛直土圧係数 $\alpha$ が1.0より大きい場合がある。コルゲートメタルカルバート(裏込め部圧縮沈下率1.0%, 垂直方向の圧縮ひずみ2.5%)は、実線の上側にプロットされ鉛直土圧係数は0.8である。発泡スチロールを布設していないNo. 7, No. 8, No. 9, No. 13の場合はx軸上にプロットされ、それぞれの鉛直土圧係数は2.45, 1.97,

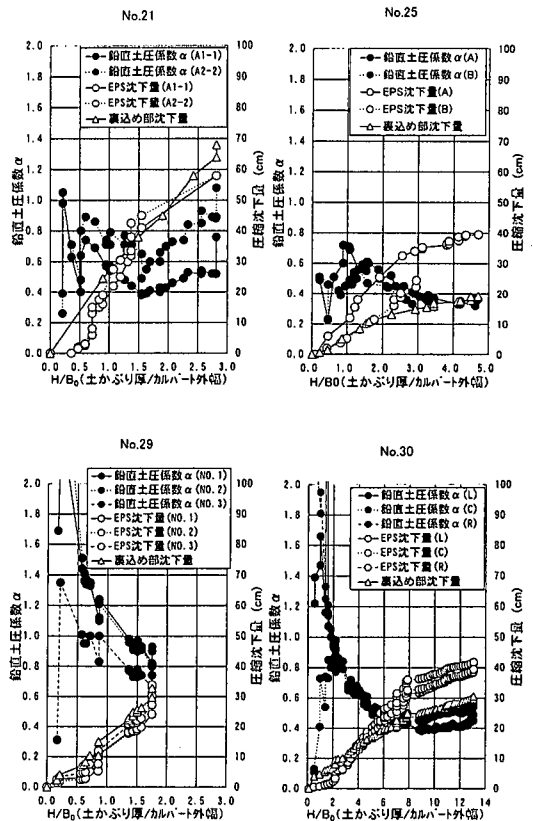


図-19 発泡スチロールおよび裏込め部の圧縮沈下と鉛直土圧係数  $\alpha$  の関係

1.55, 2.03である。

図-19, 20は、発泡スチロールと裏込め部の圧縮沈下の相対関係が、鉛直土圧軽減の效果に大きな影響をおよぼしていることをよく示している。

#### (4) 鉛直土圧軽減のメカニズム

発泡スチロールの圧縮沈下によって、構造物周辺の土中応力分布が変化し、構造物に作用する土圧の挙動が突出型から溝型に変わり、剛性カルバートに作用すべき鉛直土圧の一部が周辺に分散されていることは次のことから裏付けられる。①カルバートの形式に関わらず鉛直土圧係数 $\alpha$ が1.0より小さくなること(図-5, 6, 7) ②ボックスカルバートに作用する鉛直土圧が端部の大きい凹型から平準化した形に変わること(図-8)。③発泡スチロールの端部では、パイプの横断方向だけでなく縦断方向にも鉛直土圧が分散すること(図-9)。④カルバート裏込め部の圧縮沈下が無処理の場合より大きくなること(図-16)。これらは、鉛直土圧軽減工法のメカニズムの一端を示すものである。

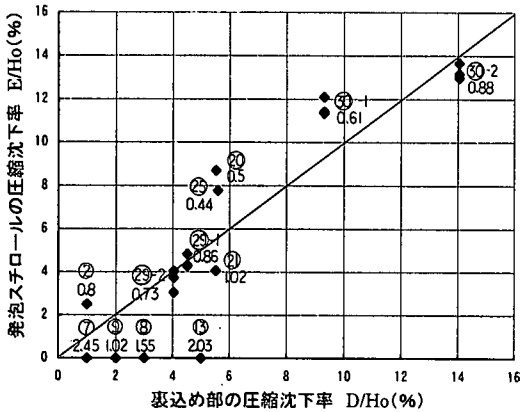


図-20 発泡スチロールと裏込め部の圧縮沈下率の関係

## 8. 結論

### (1) 無処理の場合の土圧

- a) 鉛直土圧の経時変化のパターンは、盛土が完了すると鉛直土圧の増加も終わるⅠ型パターンと、盛土完了後も鉛直土圧が増加するⅡ型パターンと、盛土中又は完了後に鉛直土圧が減少するⅢ型パターンの3つに分類できる。
- b) 鉛直土圧係数 $\alpha$ の実測値は、高速道路の設計値の周辺に分布するのではなく相当幅広く分散している。実測値が設計値よりも大きい値を示すのは、鉛直土圧の経時変化のパターンがⅡ型パターンを示す場合に多い。
- c) Ⅱ型パターンを示すものは、盛土材料の土質が粘性土やスレーキングしやすい岩にみられる。砂質土の中でもⅡ型パターンを示すものがあるが、これは、カルバート裏込め部の盛土の締固めの程度や基礎地盤の状況(基礎形式)が影響している。
- d) 水平土圧係数 $\beta$ の実測値は、ほとんどが0.5以下であり、高速道路のカルバート設計の考え方の妥当性を裏付けた。裏込め部の盛土材が粘性土の場合 $\beta$ が0.5以上になるケースがある。

### (2) 鉛直土圧軽減工法の場合の土圧

- a) 無処理の場合、ほとんど鉛直土圧係数 $\alpha$ が1.0より大きい値を示す。発泡スチロールを布設した場合、カルバートの形式に関係なく鉛直土圧係数 $\alpha$ が1.0より小さい値を示すことが多く、鉛直土圧軽減の効果が明確に表われている。
- b) 無処理の場合、ボックスカルバート端部の鉛直土圧係数 $\alpha$ が1.0より大きくかつ中央部より大きくなる凹型の土圧分布状況を示す。発泡スチロールを布設すると $\alpha$ は1.0より小さくかつ平準化した鉛直土圧の分布状

況となる。

- c) カルバートに作用する水平土圧係数 $\beta$ は、発泡スチロールを布設した場合でも0.5以下であり、鉛直土圧軽減工法の影響を受けていない。

### (3) 発泡スチロールの圧縮特性

- a) カルバート裏込め部の盛土の材質や締固めの程度によっては、発泡スチロールの剛性が盛土材の剛性より高い(同一応力で圧縮ひずみが小さい)範囲が存在する。圧縮応力が大きくなると、盛土材の剛性が発泡スチロールの剛性より高くなる。この段階で鉛直土圧軽減効果が発現する。
- b) 現地の鉛直土圧軽減の開始点は、室内試験(載荷速度1.0%/min)の降伏点とおおむね一致する。

### (4) 発泡スチロールの密度・厚さ・設置高さ・設置幅と効果の関係

- a) 低密度の場合は、鉛直土圧軽減の効果がよく発揮されている。高密度の場合は、鉛直土圧軽減の効果が発揮されにくいケースが存在するが、これは裏込め部の圧縮沈下量が多い場合に多いようである。
- b) 発泡スチロールの密度、厚さが鉛直土圧軽減の効果にどのように影響するのかが今後の検討課題である。
- c) 発泡スチロールの設置高さは、カルバート直上に布設しても1m盛土してから布設しても、鉛直土圧軽減の効果に影響はない。施工性を考えると、カルバート直上に布設するのが良い。
- d) 発泡スチロールの設置幅はカルバートの外幅 $B_0$ と同一が効果的である。

### (5) カルバート裏込め部の圧縮沈下

- a) 裏込め部の圧縮沈下率はおおむね1~2%である。基礎地盤が不良の個所で4~5%生じた事例がある。これは、数少ないデータでの結論であり、今後さらに検討する必要がある。
- b) カルバート上面に発泡スチロールを布設した場合と無処理の場合で裏込め部の圧縮沈下率を比較すると、同じ土かぶり圧では、布設した場合の圧縮沈下率が大きくなっている。

### (6) 発泡スチロールおよび裏込め部の圧縮沈下と効果の関係

発泡スチロールの圧縮沈下量が裏込め部のそれより卓越する場合、鉛直土圧軽減効果は十分に発揮されている。これに対し、裏込め部の圧縮沈下量が発泡スチロールのそれを上まわるか同等の場合は、鉛直土圧軽減の効果が前者ほど十分に発揮されていない。場合によっては、鉛直土圧係数が1.0以上となることもある。

### (7)鉛直土圧軽減工法の裏込め部盛土の重要性

本工法は、発泡スチロールの圧縮沈下によって構造物周辺の土中応力分布状態が突出型から溝型に変わるとき、盛土内にアーチアクションが形成され、鉛直土圧が軽減するものである。カルバート裏込め部が圧縮沈下すると、発生したアーチアクションの足元がすくわれ、鉛直土圧軽減の効果が薄れることになる。よって本工法は、カルバート裏込め部の基礎地盤を含めた圧縮沈下の管理が特に重要である。

## 9. あとがき

発泡スチロールを用いた剛性カルバートの鉛直土圧軽減工法については、平成9年12月に設計要領暫定案として実用化された。暫定案は、良好な基礎地盤のボックスカルバートのみでまず適用し、鉛直土圧係数 $\alpha=1$ で設計する。水平土圧係数 $\beta$ の考え方は従来通りとする。使用する発泡スチロールの厚さは50cmとし、密度は土かぶり厚20mまでD-20、土かぶり厚20m以上D-25とする。また、カルバート裏込め部(天端幅5m、のり勾配1:2.0の範囲)を下部路床と同等の裏込めBの規定で入念に締固めることとする。以上が暫定案の骨子である。本文中で述べた現地試験の結果はこの暫定案作成の根拠の一つとなったものである。今後は、室内試験やFEM弾塑性解析などを補足して、鉛直土圧軽減工法のメカニズムの解明や、アーチカルバートやパイプカルバートなどの形式への適用拡大や、発泡スチロールの厚さや密度をさらに合理的なものに改善していく予定である。

**謝辞:** 発泡スチロールを用いた剛性カルバートの鉛直土圧軽減工法の現地試験結果をまとめるにあたり、最初の現地試験でご指導を賜った中央大学久野悟郎教授、東海大学稲田倍穂教授、宇都一馬教授をはじめ、日本道路公団中国支社ハイウェイカウンセラー会議(土工・防災分科会)の広島大学佐々木康教授、鳥取大学榎明潔教授、さらに、この20年間、本件に関する貴重なデータを観測し蓄積されてきた現地事務所の方々、並びに関連資料の提供をいただきました大勢の方々に改めて謝意を表します。本文のとりまとめにあたって、とくにご指導を賜った広島大学佐々木康教授に深甚の謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 市原松平, 林裕貴, 遠藤慎治: 暗渠に作用する鉛直土圧の実例, 土と基礎, Vol. 6, No. 2, pp. 9-16, 1958. 4.
- 2) 三笠正人, 西垣好彦, 奥利明: 高盛土下の暗渠に作用する土圧について, 土質工学研究発表会, No. 12, pp. 1213-1216, 1977.

- 3) 久桑勝行, 護摩堂満, 竹内辰典: 軟弱地盤上のカルバートの作用する土圧, 土と基礎, Vol. 32, No. 6, pp. 13-19, 1984. 6.
- 4) 島田忠則: 剛性のパイプカルバートに作用する鉛直土圧の軽減工法, 土と基礎, Vol. 41, No. 11, pp. 29-34, 1993. 11.
- 5) 例えば, 道路土工-擁壁・カルバート・仮設構造物工指針, 日本道路協会, pp. 99-102, 1991. 12.
- 6) 例えば, 日本道路公団・設計要領第二集カルバート編, 1979. 4.
- 7) 例えば, 長友成樹, 天野礼二: 新体系土木工学 70 トンネル(I) - 山岳トンネル, 技報堂出版, pp. 21, 1980.
- 8) Spangler, M. G.: Underground Conduits - An Appraisal of Modern Research, Trans. ASCE, pp. 316-374, 1948.
- 9) 石井靖丸訳: チェボタリオフの土質力学(下巻), 技報堂, pp. 230, 1969.
- 10) 佐藤嘉平, 岩崎洋一郎: 高盛土下の剛性カルバートに作用する鉛直土圧の軽減工法について, 土と基礎, Vol. 29, No. 12, pp. 3-7, 1981. 12.
- 11) 鬼丸良雄, 羽田野恒: 剛性カルバートにおける土圧軽減の試験工事-北海道縦貫道米井東工事・札幌工事-, 土木技術, Vol. 38, No. 1, pp. 103-108, 1982. 6.
- 12) 島田忠則: カルバート設計における鉛直土圧係数の改訂提言, 日本道路公団技術情報, No. 94, pp. 30-38, 1988. 10.
- 13) 高速道路調査会: カルバートの効率的な設計・施工に関する研究報告書, 1991. 2.
- 14) 高速道路調査会: カルバートの効率的な設計・施工に関する検討報告書, 1992. 2.
- 15) 高速道路調査会: カルバートの効率的な設計・施工に関する検討(その2) 報告書, 1993. 2.
- 16) 大江祐一, 松田泰明, 多田秀一, 西川純一: EPSを用いたカルバートの土圧低減法, EPS TOKYO'96 Japan, pp. 183-189, 1996. 10.
- 17) 相良昌男, 田口善文, 吉川和行, 水谷敏彦, 平野訓相, 橋詰哲治: 高盛土下におけるEPSを敷設したカルバートの作用土圧について, 第32回地盤工学研究発表会, pp. 2169-2170, 1997. 7.
- 18) 宇都一馬, 雨宮広二, 立石哲郎, 安達新治: コルゲートパイプの耐荷力に関する研究(3) - 東名高速道路愛鷹試験盛土コルゲートパイプ埋設試験中間報告 -, 日本鋼管技報, No. 32, pp. 67-78, 1965.
- 19) 田中博明, 森康夫, 阿部和明: 高盛土下における函渠への作用土圧について, 第28回北海道開発局技術研究発表会論文集, pp. 39-44, 1984.
- 20) 日本道路公団: 高盛土における構造物の土圧について, 中央高速道路工事誌, pp. 181-194, 1970. 3.
- 21) 小野正二, 杉本一美, 有水恭一: 高盛土下のカルバートに作用する土圧について - 中央道・矢の口川アーチカルバート測定より -, 第21回日本道路公団業務研究発表会論文

- 集, pp.191-195, 1979. 6.
- 22) 中村正人, 桐山昭吾, 長内和彦: 高盛土下のアーチカルバート, 第 29 日本道路公団業務研究発表会論文集, pp. 419-423, 1987. 6.
  - 23) 日本道路公団仙台建設局一戸工事事務所: 東北自動車道八戸線下藤アーチカルバート動態観測報告書, 1987. 7.
  - 24) 日本道路公団広島建設局徳山工事事務所: 山陽自動車道中山工事動態観測結果報告書, 1988. 4.
  - 25) 日本道路公団福岡建設局: 九州自動車道南九州地区アーチカルバートボックス応力解析業務, 1982. 3.
  - 26) 日本道路公団・設計要領第二集第 8 編カルバート編, 1970. 4.
  - 27) National Research Council 「Load Reduction on Rigid Culverts Beneath High Fills : Long - Term Behavior」 *TRANSPORTATION RESEARCH RECORD*, No.1415, 1993.
  - 28) 日本道路公団仙台建設局郡山工事事務所: 東北横断自動車道鞍手山トンネル東工事カルバート部土圧軽減工法 計測工事報告書, 1990. 12.
  - 29) 日本道路公団広島建設局尾道工事事務所: 山陽自動車道久井工事EPSによるパイプカルバートの土圧軽減工法報告書, 1993. 5.
  - 30) 日本道路公団広島建設局尾道工事事務所: 山陽自動車道美ノ郷トンネル工事アーチカルバート土圧軽減工法計測調査報告書, 1994. 3.
  - 31) 大中英揮, 安松敏雄, 中須誠 (橋梁研究室): EPSを用いたカルバートの土圧軽減に関する検討, 日本道路公団試験研究所報告, Vol. 34, pp. 79-87, 1997. 11.
  - 32) Jhon. S. Horvath: EPSの圧縮包含材としての機能: 概観, EPS TOKYO'96 Japan, pp. 67-75, 1996. 10.
  - 33) 安松敏雄: カルバートの土圧軽減の設計法, 日本道路公団試験研究所における研究の動向, pp. 27-34, 1998. 1.
  - 34) 島田忠則, 松山裕幸, 小原富徳: 剛性カルバートの鉛直土圧軽減工法一現地試験結果のまとめ一, ハイウェイ技術, No.11, pp.170-194, 1998. 10.
  - 35) 島田忠則, 安松敏雄, 小野塚和博: 発泡スチロールを用いたカルバートの鉛直土圧軽減工法の実用化に関する研究, 高速道路と自動車, 第 41 巻, 第 11 号, pp. 20-30, 1998. 11.
  - 36) 島田忠則, 小野塚和博: 発泡スチロールを用いた剛性カルバートの鉛直土圧軽減工法の長期安定性, 地盤と基礎, Vol.17, No.1, pp. 9~16, 2000. 3.
  - 37) 島田忠則, 平野毅志: 発泡スチロール布設による剛性カルバートの鉛直土圧軽減効果に関する室内試験及びFEM解析結果, 土木学会論文集 (投稿中) .
  - 38) 島田忠則, 平野毅志, 林光男: 道路盛土における圧縮沈下の実態と剛性カルバートへの影響, 地盤と基礎 (投稿中) .
  - 39) 島田忠則, 平野毅志, 島勝俊: 高速道路におけるカルバートの設計技術の変遷, 地盤と基礎 (投稿中) .

(2000. 1. 24 受付)

## FIELD TEST RESULTS OF THE VERTICAL EARTH PRESSURE REDUCTION EFFECT BY PLACING EXPANDED POLYSTYROL ON RIGID CULVERTS

Tadanori SHIMADA and Takeshi HIRANO

On the earth pressure reduction of rigid culverts using expanded polystyrol, field test results were reported, while results without such material were also presented in various papers. Evaluation of these data clarified the elements determining the magnitude of vertical earth pressure on the culvert without expanded polystyrol, and, for cases with this compressive material, the relationship between placement conditions of the material and vertical earth pressure reduction effect. The previous papers mainly addressed the compression settlement of the expanded polystyrol. Studying the compression settlement of the backfill, the present paper discusses the relationship between compression settlement around culverts and vertical earth pressure reduction effect.