

高速道路のカルバートの設計技術の変遷

The evolution of the design technique of Highway culverts

島田忠則 Tadanori SHIMADA (四国道路エンジニア(株))
 平野毅志 Tsuyoshi HIRANO (日本道路公団中国支社)
 島 勝俊 Katsutoshi SHIMA (日本道路公団中国支社)

高速道路のカルバートは剛性カルバートやたわみ性カルバートなど種々の構造形式がある。その構造形式や構造細目は経費節減や省力化など時代の要請に応じて変遷してきた。名神建設時代に確立したパイプやボックスカルバートに始まり、高盛土下で経済的に有利なアーチカルバートや鉛直土圧軽減工法やトンネル工法カルバートなどの新工法を開発し、省力化のためプレキャストアーチカルバートなどの新技術も導入してきた。カルバートの部材厚を決める鉛直土圧はどの構造形式でもスパングレー・マーストンの理論に基づいている。それは現場での実測値からも裏付けされた。その結果、構造物裏込め部の締め固め程度の重要性が明確となった。

キーワード：カルバート，土圧，鉛直土圧軽減，盛土の締め固め (IGC：E-5, H-8)

1. はじめに

日本における高速道路建設の歴史は昭和38年7月の名神高速道路(尼崎～粟東間)の一部供用に始まる。以来、年毎に供用延長を確実に伸ばし、平成11年度末で全国に約6,400kmの高速道路ネットワークを構築している。

供用延長の伸びに従ってクローズアップされてきた課題として、現場作業員が年々高齢化し現場における施工の省力化が求められてきたこと、縦貫道から横断道へと建設主体が変化するにつれ構造物比率が増大し、その結果、建設工費増加を抑えるために更なる経費節減が求められるようになったことなどが挙げられる。

道路盛土が農道などの幅の狭い道路や水路などと交差する場合、盛土の中にその機能空間を確保するために横断構造物(カルバート)を設置する。このカルバートは使用材料や構造形式によっていろいろな種類がある。本報文では、高速道路のカルバートの設計技術を取り上げ、各種の構造形式がいつから採用され、いかに新工法・新技術を導入し、これらの設計技術が時代の要請に応じてどのように変遷していったかをとりまとめたものである。

2. カルバートの種類

日本道路公団(JH)が採用しているカルバートの構造形式は、鉄筋コンクリート造の剛性カルバートと可撓性に優れたたわみ性カルバートに分類される。カルバートの主な種類を表-1に示す。JHのカルバートの構造形式を規定する設計要領は日本の高速道路の建設の歴史とともに変遷してきた。昭和36年8月制定の名神高速道路設計要領に始まり、東名高速道路の建設のため昭和39年10月制定した高速自動車国道設計要領、中国道や九州道など列島縦貫の5自動車道の建設のため昭和45年1月制定した設計要

領などである。その後、列島横断の自動車道の建設のため昭和54年4月、平成4年10月、平成9年10月、平成11年3月に内容が順次改訂追加された。その随所にカルバートの設計技術の変遷がみられる。その変遷を図-1に示す。

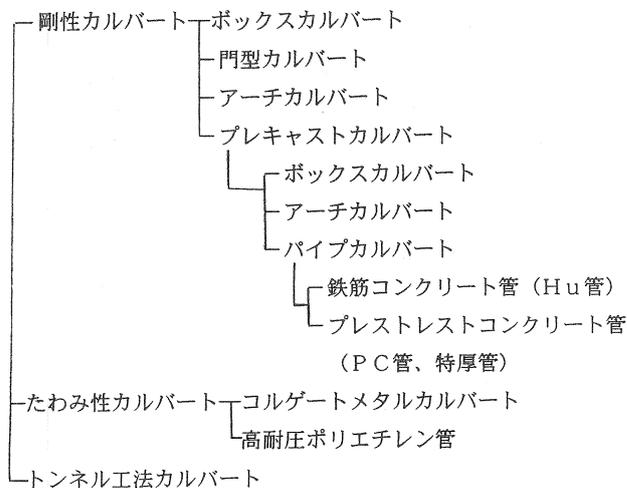
3. カルバートの構造形式の変遷

(1) 剛性カルバート

① パイプカルバート

パイプカルバートは、昭和36年8月の要領において遠心鉄筋カルバート(Hu管)が要領化された。この9年後の昭和45年1月の要領でより高耐圧タイプのプレストレストコンクリート管(Pc管)の導入が行われた。以来、27年間新規管種の追加等は行われなかった。平成9年10

表-1 カルバートの種類



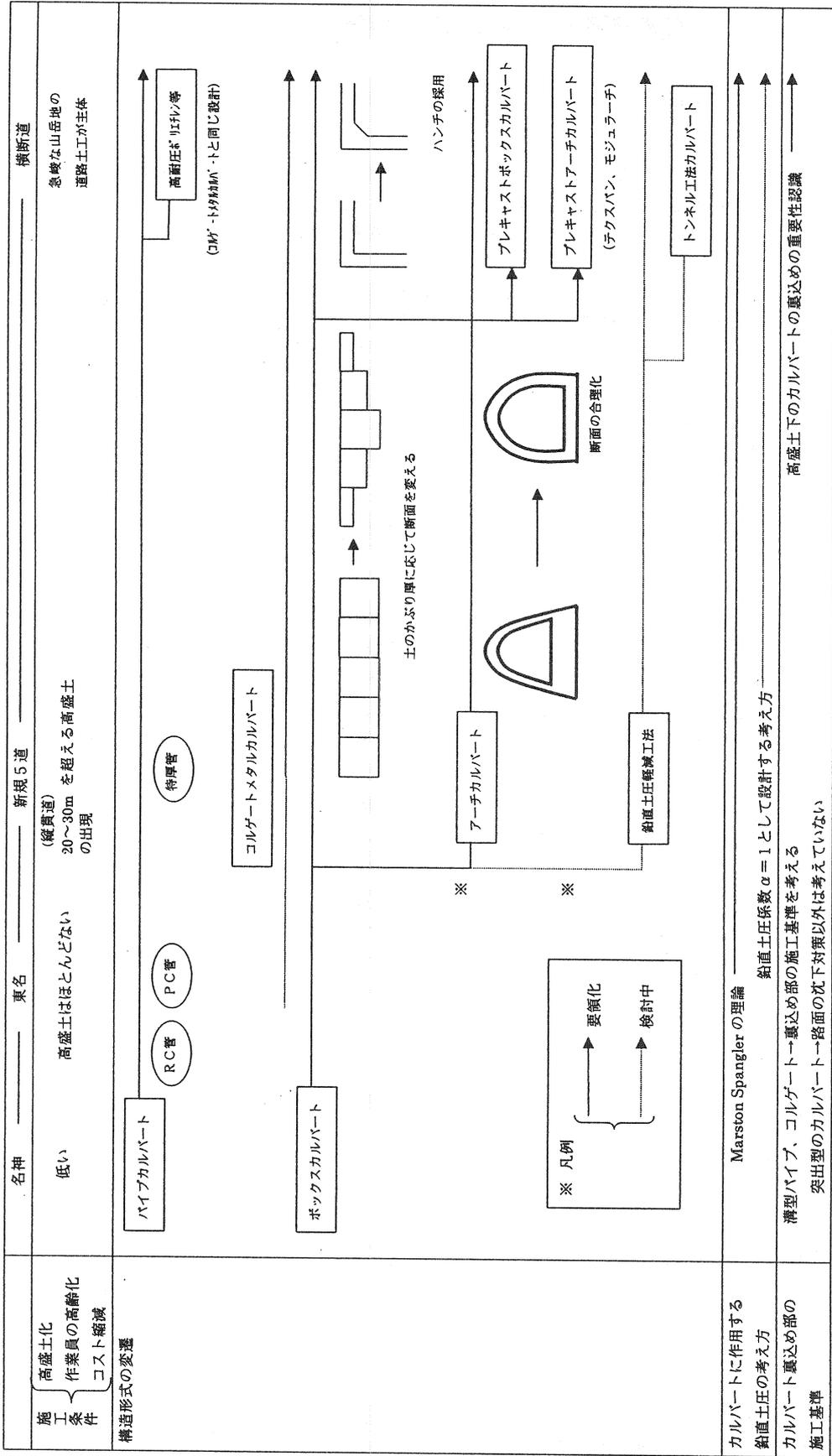


図-1 高速道路のカルバートの設計技術の変遷

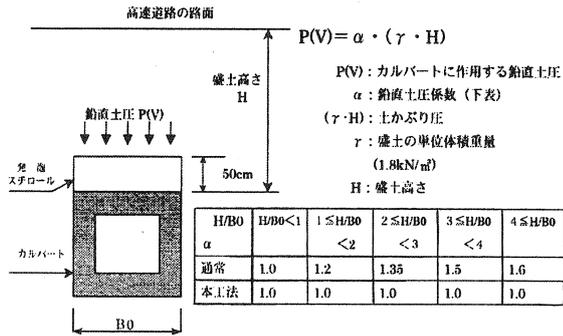


図-2 カルバートの設計に用いる鉛直土圧係数の考え方

月の要領において高盛土に対応するため、更に高耐圧タイプの高外圧用プレストレストコンクリート管(特厚管)の導入が図られた。

② ボックスカルバート

ボックスカルバートは、パイプとともに昭和 36 年 8 月に要領化されたもので、名神高速道路における施工実績の蓄積によりほぼ技術的に確立され、基本的な設計基準は昭和 39 年 10 月の要領以来変わっていない。

③ 門型カルバート

門型カルバートはパイプと同じく昭和 36 年 8 月に要領化された。これはボックスカルバートに比べて内空幅が大きい盛土高の小さい箇所に採用される。形式的には不静定のラーメンであるため、フーチング基礎にストラットを設けたり、隅角部にハンチを設けることが昭和 39 年 10 月以来義務付けられている。

④ アーチカルバート

高速道路建設の主体が縦貫道から横断道へ、平地部から山岳部へと変化して行くにつれ、20~30m以上の高盛土が頻繁に出現するようになった。後述するように、カルバートに作用する鉛直土圧は土かぶり厚が大きい場合、土かぶり荷重を 1.6 倍まで割り増す設計基準となっているため、従来のボックスカルバートでは部材断面が大きくなり建設費がかさむケースが生じるようになってきた。このような高盛土に対応するために昭和 54 年 4 月の要領にアーチカルバートが追加された。

⑤ 鉛直土圧軽減工法

JH はアーチカルバートの設計要領制定とは別の流れとして、昭和 53 年頃から、土かぶり荷重を割り増さずにすむ、鉛直土圧軽減工法の検討を始めた。この工法は、図-2 に示すように、カルバートの上面に発泡スチロールを布設し、かつ、裏込め部の盛土を入念に施工して、その上に盛土するだけの極めて単純で経済的な工法である。平成 10 年までに 7 つの現場で試験施工を実施した。

著者らは鉛直土圧軽減工法の現地試験結果を整理して、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を確保する要件についてとりまとめた¹⁾。これらの結果に基づき、平成 9 年 12 月に「発泡スチロールを用いたボックスカルバートの鉛直土圧軽減工法の設計要領(暫

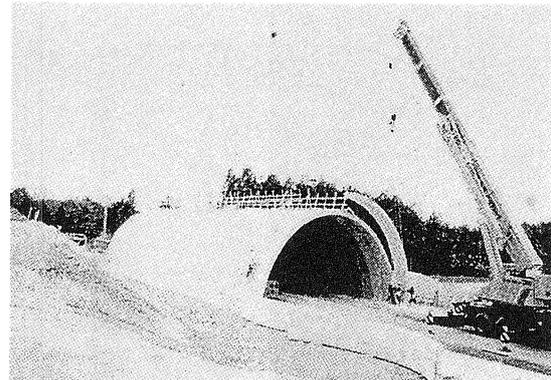


写真-1 3点ヒンジプレキャストアーチカルバート

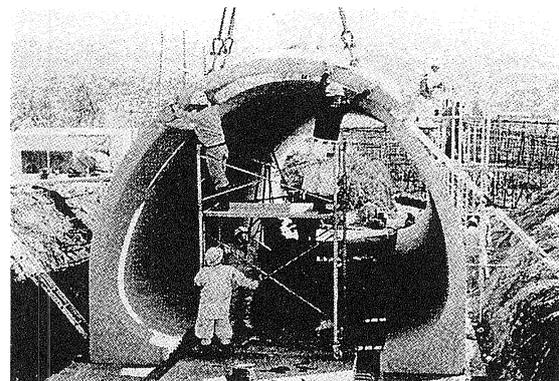


写真-2 2点ヒンジプレキャストアーチカルバート

定案)」を制定した。これによりボックスカルバートについて土かぶり荷重を割り増すことなく鉛直土圧係数 $\alpha = 1$ として設計することとなった。

⑥ プレキャストカルバート

経費節減や現場における省力化や工期短縮等をさらにすすめるために平成 11 年 3 月の要領で工場製作のプレキャスト部材を用いたボックスカルバートやアーチカルバートを採用した。プレキャストアーチカルバートは写真 1, 2 に示すフランスで開発された 3 点ヒンジと 2 点ヒンジの 2 タイプのアーチカルバートを導入した。

(2) たわみ性カルバート

① コルゲートメタルカルバート

コルゲートメタルカルバートは名神高速道路での採用に先だち関東地建構内で野外試験を実施し²⁾、また霧島道路で試験施工した後に要領化された。その後、東名高速道路の現場においてさらなる合理的な設計法を確立するために現場埋設試験を実施した³⁾。これらをもとに昭和 45 年 1 月に制定した要領が今日まで適用されている。

② 高耐圧ポリエチレン管

平成 9 年 10 月にガラス繊維強化プラスチックと樹脂モルタルを複合した強化プラスチック複合管や、高密度ポリエチレン樹脂でできた高耐圧ポリエチレン管(耐圧ポリエチレン管(耐圧ポリエチレンリブ管)が追加された。強化プラスチック複合管は耐食・水密性に優れているが、管内

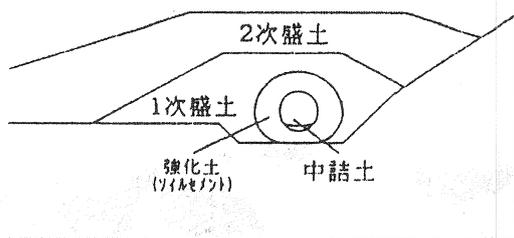


図-3 トンネル工法カルバート施工概要図

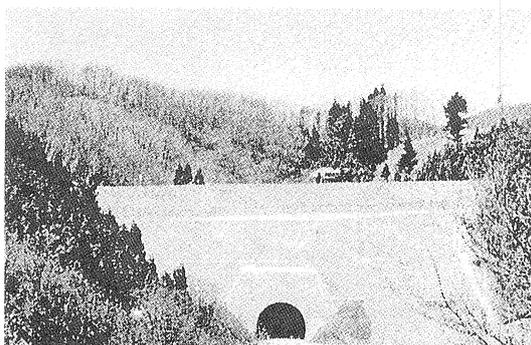


写真-3 トンネル工法カルバート完成状況

外の強酸 (pH3 以下)、強アルカリ (pH12 以上) が存在する場合には、より耐食性の高い種類の製品を用いる配慮が必要である。高耐圧ポリエチレン管は耐食・耐水密性に優れている。

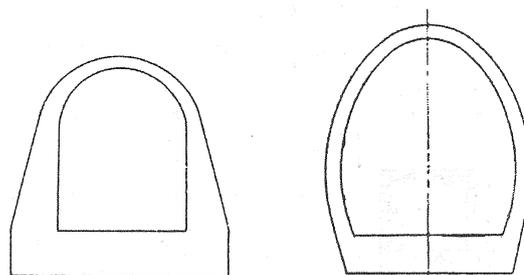
(3) トンネル工法カルバート

トンネル工法カルバートは、トンネル掘削に伴うゆるみ土圧理論に基づいたもので、図-3 に示すように先に人工地山を築き、その後トンネルを掘削することにより発生する土圧を周辺地山 (グランドアーチ) に負担させようとするものである。強化土および中詰土の構築を含めた部分を原地盤から順次盛り上げて一次盛土を完成する。強化土はソイルセメントで施工する。次に、中詰土をトンネル掘削し強化土内にグランドアーチを形成させ、2次盛土によって道路盛土を完成する工法である。(写真-3)

(4) カルバートの構造細目の変更

① 土かぶり厚に応じたカルバート断面の変化

ボックスカルバートの部材断面は、昭和 36 年 8 月の要領では最小土かぶり厚と最大土かぶり厚の場合とでのおおの荷重強度を求め、大きい値をとる土かぶり厚で定まった部材断面を全体に用いた。昭和 54 年 4 月の要領でも最大土かぶり厚で定まった断面を全体に用いた。しかし、経費節減が言われるようになると、盛土高さが増加する場合に最大土かぶり厚で決定された部材断面を全体に適用するのは不経済であると考えられるようになり、昭和 59 年 10 月よりボックスカルバート延長方向にブロック割りして、各ブロックの最大土かぶりを算定して、ブロック毎に



(a) 馬蹄形 (b) 卵型
図-4 アーチカルバートの断面形状

部材断面を変化させるものとし、平成 4 年 10 月に要領化された。なお、アーチカルバートについては設計計算は区間毎の最大土かぶり厚で鉄筋量を計算するが、セントル剛性型枠の製作を 1 種類とするために部材厚は全区間の最大土被り厚で求めた断面を用いることにした。

② ボックスカルバートのハンチ

ボックスカルバートの隅角部のハンチについては昭和 39 年 10 月の要領において、カルバートにおいてはハンチをつけないが、門型カルバートではハンチを付けて良いとしている。この時点ではハンチの採用については消極的であった。しかし、昭和 45 年 1 月の要領では、ラーメン隅角部には応力集中が起こりやすいので、内空幅 8m 以下のものを除いてボックスおよびポータルカルバートには原則としてハンチを設けることとした。

昭和 54 年 4 月の要領においては、内空幅の大きなカルバートで隅角部の応力集中を低減すること等で経済的となる場合、土かぶり厚が大きく隅角部のせん断応力で断面が決定され部材厚が大きくなる場合を除いて、現場からの施工性の声を重視してハンチを設けないことにした。平成 4 年 10 月の要領では、経費節減が最優先される時代背景となり内空幅 4m 以上のカルバートには原則としてハンチを再び設けることとなった。

③ アーチカルバートの断面の合理化

現場打ちコンクリート造のアーチカルバートの形状は図-4 (a) に示すように、当初は上部を円形アーチとし、側壁と底版を矩形としていた。しかし、この形状では高盛土の場合には底版部において大きい曲げモーメントとせん断力を生じ底版部断面が大きくなり不経済となるため、平成 4 年 10 月の要領で図-4 (b) に示すように馬蹄形の形式とした。最も応力の流れが良い軸線形を考慮すると卵形 (卵を立てた形状) が最良であるが、インバート部の施工が困難 (とくに底版部の締め固めが困難) であり、このため底版部を水平にした。このことによって部材厚はスリムとなり経済性は向上した。しかし、写真-4 に示すようにセントルの製作や鉄筋組み立て、コンクリート打設など施工性があまり良くないことや工期を長くとる必要があることなどが課題としてこのころ。

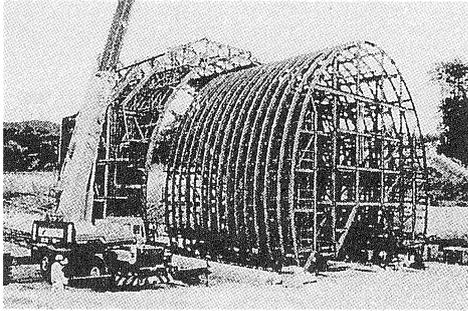
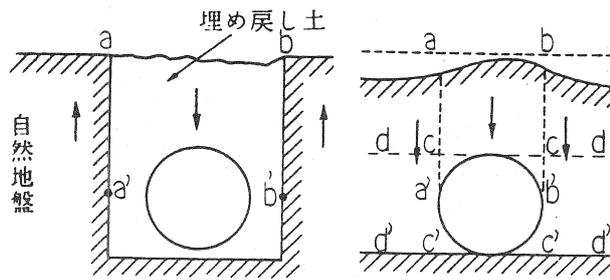


写真-4 アーチカルバートのセントルの組み立て



(a) 溝型 (b) 突出型
図-5 パイプカルバート周辺の土の挙動

4. カルバートに作用する土圧の考え方

(1) 鉛直土圧

カルバートに作用する鉛直土圧は、カルバートの変形特性や埋設方法によってそれぞれ異なる。高速道路の場合、カルバートの設計に用いる鉛直土圧の考え方はカルバートの種類ごとにそれぞれ次のようになっている。

① パイプカルバート

パイプカルバートの埋設方法は図-5に示す2種類ある。1つは基礎地盤に溝を掘ってパイプを設置し土で埋め戻す方法である。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 (aa'bb'で囲まれた土塊) が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、鉛直面 aa', bb'には上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「溝型」という。次に、基礎地盤上にパイプ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、cc'dd'で囲まれた周辺の土の剛性はパイプに比較して相当小さいためそれが圧縮沈下する際に周辺上部の土がパイプ上部の土塊 (aa'bb'で囲まれた土塊) にぶら下がるかっこうになる。このため、鉛直面 aa', bb'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。スパングレー・マーストンの理論に基づいて「溝型」と「突出型」のパイプカルバートに作用する鉛直土圧は次式で求められる。

$$\text{(溝型)} \quad \sigma_v = \frac{\gamma B}{K \tan \delta} (1 - e^{-\frac{K \tan \delta}{B} z})$$

$$\text{(突出型)} \quad \sigma_v = \frac{\gamma B}{K \tan \delta} (e^{\frac{K \tan \delta}{B} z} - 1)$$

ここで、 σ_v ; 鉛直土圧 (kN/m²)

γ ; 土の単位体積重量 (kN/m³)

K ; 土圧係数

δ ; 土の内部摩擦角 (度)

B ; パイプカルバートの外幅 (m)

z ; 土かぶり厚 (m)

深さが増大すると、「溝型」の場合、周辺の土が荷重を分担する割合が大きくなり鉛直土圧は土かぶり荷重によるものより常に小さくなる。「突出型」の場合、深さの増大に伴い周辺の土の荷重の伝達分が増えパイプカルバート

に作用する鉛直土圧は土かぶり荷重より増大する (図-2 参照)。

高速道路の場合、パイプカルバートに作用する鉛直土圧については、上記のスパングレー・マーストンの理論に基づいて昭和 36 年 8 月の要領で確立し今日に至っている。ただし、「溝型」の場合、パイプカルバートに作用する鉛直土圧は、スパングレー・マーストンの理論値とせず土かぶり荷重をとることにしている。これは、カルバートに作用する鉛直土圧が時間的に変化して終局的には摩擦力がリラクゼーションにより徐々に消滅するため、カルバートに作用する鉛直土圧は「溝型」であっても終局的には土かぶり荷重に落ち着くものと考えたためである。

② ボックスカルバート

ボックスカルバートの設計に用いる鉛直土圧の考え方は、パイプカルバートと同様に昭和 36 年 8 月の要領で確立された。ボックスカルバートはパイプカルバートより形状寸法が大きく、「溝型」にするため深い溝を掘るのは作業の安全性を考えると困難である。このため基礎地盤上にまずボックスカルバートを設置してその後で全体をかぶせるような盛土をしていくので、「突出型」の場合だけを考えるのが一般的である。高速道路の場合、ボックスカルバートに作用する鉛直土圧は、図-2 に示すように、H/Bo (土かぶり厚/カルバート幅) に応じて、土かぶり荷重を上限 1.6 倍まで段階的に割り増す考え方となっている。この根拠は、スパングレー・マーストンの理論に加えて、パナマ鉄道の実測値や市原の中ノ沢における実測値⁴⁾を参考にして決定したものである。この考えはそのまま現在に到っており、アーチカルバートや門型カルバートやプレキャストカルバートにも適用されている。なお、2点ヒンジのプレキャストアーチカルバートは裏込め土を部分的にゆるく締め固める条件で鉛直土圧係数 $\alpha = 1$ として設計している。

③ コルゲートメタルカルバート

コルゲートメタルカルバートに作用する鉛直土圧は、パイプカルバートの「溝型」の鉛直土圧の考え方に準拠して土かぶり荷重とすることにした。この考え方は、高耐圧ポリエチレン管にも適用されている。

5. 今後の課題

(1) カルバート裏込め部の盛土の締め固め

図-8 (a) に示すように、カルバートが上部路体や路床部にかかる場合は、残留圧縮沈下による路面の段差を小さくするために、裏込め部の盛土を入念に施工するよう定められている。しかしながら、カルバートが路体内にある場合は、図-8 (b) に示すように特段に裏込め部の盛土の施工基準を厳しく設定せず路体並の施工で良いことになっている。このため、すでに著者らが別に報告したごとく裏込め部の盛土に使用される材料の種類や締め固め程度によっては、裏込め部の圧縮沈下が大きくなり、設計で想定した以上にカルバートに作用する鉛直土圧が割り増されることがある⁶⁾。カルバートの裏込め部の盛土は常に入念に材料を選定し締め固める必要がある。

(2) 鉛直土圧軽減工法の適用拡大

発泡スチロールを用いた鉛直土圧軽減工法の適用範囲はボックスカルバートだけであるが、これだけでなく種々の構造形式に積極的に拡大し経済効果を高める必要がある。現場打ちコンクリート造のアーチカルバートは型枠のセントルがその個所限りでしか使用できないことが多く鉄筋の組み立てやコンクリート打設の施工が難しくかつ工期を長くとる必要があるなど課題が多いので、本工法を採用したボックスカルバートに変更することが望ましい。また、プレキャスト部材を利用したパイプカルバート、ボックスカルバート、アーチカルバートにも本工法を積極的に適用して経済性・施工性をさらに向上させる必要がある。

(3) 鉛直土圧軽減工法の圧縮性材料の開発

鉛直土圧軽減工法に用いる圧縮性材料について、発泡スチロールにかえてゴミとなった発泡スチロール廃材や気泡モルタルや農業で処理が問題となっているモミガラなど新しい圧縮性材料の開発をはかり、経済効果のさらなる向上や環境問題への配慮を併せてクリアすることも重要である。

(4) 2点ヒンジのプレキャストアーチカルバートの鉛直土圧

2点ヒンジのプレキャストアーチカルバートは、鉛直土圧の考え方が裏込め部の一部をゆるく締め固めることで鉛直土圧係数 $\alpha=1$ とするようになっている。カルバート周辺の土の挙動が突出型か溝型かで鉛直土圧の大きさを決定するスパングレー・マーストンの理論からすると、裏込め部の締め固め程度によっては溝型になっていない可能性もあり得るので、今までに実施した事例をよく整理検討する必要がある。

(5) トンネル工法カルバートの課題

試験施工したトンネル工法カルバートは、いずれも強化土のセメント添加量(重量比8~12%)が多いため中詰土をトンネル掘削する時点ですでに強化土が固結しており、トンネル掘削に伴うゆるみ土圧の発生がみられていない。このことからトンネル工法カルバートは、中詰土と一次盛土という型枠で組み立てられ、強化土という貧配合の部材厚が約5mの無筋のソイルセメントを打設して、これが固

結後にトンネル掘削によってこの内型枠をはずして完成させた、いわば無筋アーチソイルセメント構造物といえる。また、2次盛土ではカルバートは突出型の挙動を示している。トンネル工法カルバートをさらに展開していくためには、中詰土のトンネル掘削時点では固結していない強化土のセメント添加量の決定とそのときのトンネル掘削時の安全性確保および内空表面の保護工などが課題である。

6. あとがき

高速道路のカルバートの設計技術は、現場作業員の高齢化に伴う施工の省力化や建設工費の増加を抑えるための経費節減など時代の要請に応じてつぎつぎに変遷していることが明らかになった。

鉛直土圧軽減工法、プレキャストアーチカルバートなどの新技術・新工法において、その部材厚決定に大きく影響する鉛直土圧は、昭和20年代に発表されたスパングレー・マーストンの理論に基づいている。カルバートに作用する鉛直土圧を設計値以上に大きくしないためには、構造物裏込め部の圧縮沈下を小さくする必要があり、材料の選定や入念な盛土の締め固めが重要である。

鉛直土圧軽減工法は、カルバート直上に布設した圧縮性材料の圧縮によってカルバート周辺の土の挙動を突出型から溝型にかえるスパングレー・マーストン理論にかなった工法である。この工法の適用範囲の積極的な拡大と圧縮性材料の開発をはかり、工事現場での経済性や施工性をさらに向上させたいと考えている。

(謝辞)

本件に関する重要なデータを蓄積されてきたJHの方々へ改めて敬意と謝意を表します。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先生に深甚の謝意を表わします

参考文献

- 1) 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現地試験結果、土木学会論文集(投稿中)
- 2) 日本道路公団名神高速道路部、コルゲートパイプ野外試験について、土と基礎、NO.32、pp.67~78、1959
- 3) 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圧力に関する研究(3)、日本鋼管技報、NO.32、pp67~78、1965
- 4) 市川松平・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、pp9~16、1958
- 5) 横山好幸・大友弘志、模型実験によるアーチカルバートの土圧係数の測定、日本道路公団業務研究発表会論文集、pp.522~526、1981
- 6) 島田忠則・平野毅志・林光男、道路盛土の圧縮沈下の実態と剛性カルバートへの影響、地盤工学会中国支部論文集(投稿中)