

RCCを用いた新形式カルバートの設計と実用化に関する研究

山本浩史¹・小野紘一²

¹正会員 博士(工学) アイサワ工業株式会社 技術研究所 (〒704-8114 岡山市西大寺東3-7-14)

²正会員 Ph.D. 京都大学大学院教授 工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

平野部が既に専有されている我が国における今後の幹線道路は、山岳部での建設が主体となる。この山岳部での道路建設では、トンネルや橋梁の比率増加に伴い、高盛土も多くなり、これを横断するカルバートの施工事例が増加すると予想される。高盛土に適用されるカルバートは、従来型のアーチカルバートなどが用いられるが、これらは工期や工費の点で改善すべき問題点を有している。一方、21世紀を迎え、ますます厳しくなる我が国の財政事情を勘案すると、公共工事のコスト縮減をさらに推進する必要がある。本論文では、工期短縮、工費節減および耐久性改善を目標として開発された盛土内における新しいタイプのカルバート、RCCカルバートの設計と実用化に関する研究内容について述べる。

Key Words : culvert, RCC, embankment, axial compression, no tension

1. はじめに

近年、第二東名高速道路の建設に代表されるように、幹線道路の新設は平野部から山岳地に移行してきており、急峻な山岳地を通過する道路の新設が増加している。この山岳地での道路建設では、直線的な線形を確保しながら道路計画を行うため、トンネルと橋梁の比率が多くなり、橋梁の下部工はハイピアーが多く見られるとともに、トンネル施工で発生するズリを路線内で活用するための盛土箇所も増加し、その多くは高盛土となる。これら高盛土箇所には、新設道路を横断するような既設の道路あるいは河川・水路などがあり、高盛土内にカルバートを敷設して、その機能復旧を行うこととなる。一般に、これらのカルバートは、土かぶり高さが10mあるいは15m以上になると、現場打ちのアーチカルバートが使用され^{1), 2)}、その内空断面は、カルバートの利用形態として道路や河川が中心となるため、比較的大きくなりがちで、特に河川と車道の組み合わせの場合、内空幅が10数mとなる場合がめずらしくない。ところが、このアーチカルバートは工期や工費の点で改善すべき問題点を抱えている。通常、鉄筋コンクリートで構築されるアーチカルバートは、カルバート構築後の強度発現を待たなければ周辺や上部

の盛土が施工できないため、迅速な盛土施工が行えず、盛土も含めた全体工期が長期化する傾向にある。特に、土かぶりが大きな場合やカルバートの規模が大きな場合には、この傾向が助長され、工期と工費を増大させる原因となる。さらに、アーチカルバートは、内側および外側の壁形状がアーチ型であることから鉄筋、型枠、コンクリート打設等、各工種の施工性が悪く、この点も工期や工費に悪影響を及ぼしている。そのため、アーチカルバートにかわる新しいカルバートの設計施工法が求められている³⁾。

一方、21世紀を迎えた我が国の経済社会は、今後、国の財政事情がさらに厳しさを増すものと考えられている。そのため、限られた財源を有効に活用するという意識のもと、公共事業の効率化を図り、さまざまな取り組みによって公共工事のコスト縮減を図ることは、これからの建設業界に課せられた大きな責任である。そのため、従来の設計施工法に縛られることなく、所要の機能、品質を確保し、かつコスト縮減を可能とする建設工法に積極的に取り組むことが必要と考えている。

このような背景のもと、従来型カルバートの問題を解決する新しいタイプのカルバートとして、ダム建設^{4), 5)}等で用いられるRCC (Roller Compacted Concrete) を使用する新しいアーチカルバート(以下、「RCCカルバート」と称する)がある⁶⁾。こ

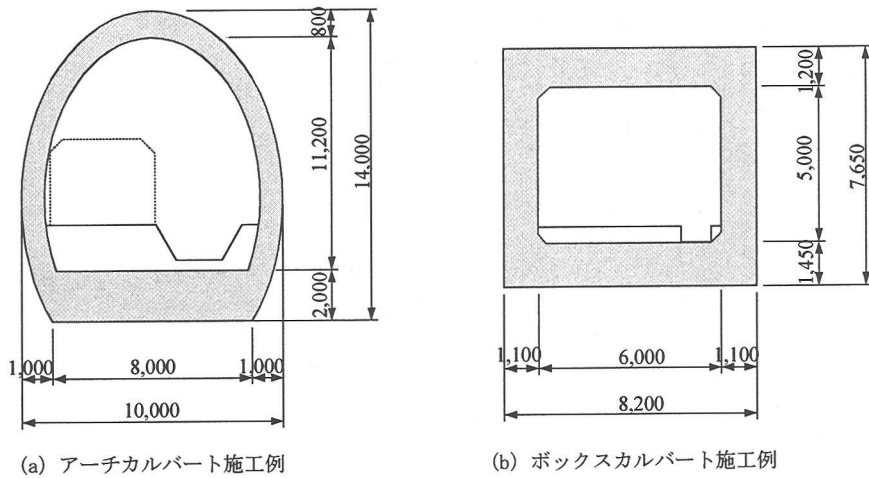


図-1 従来型カルバートの一般的形状

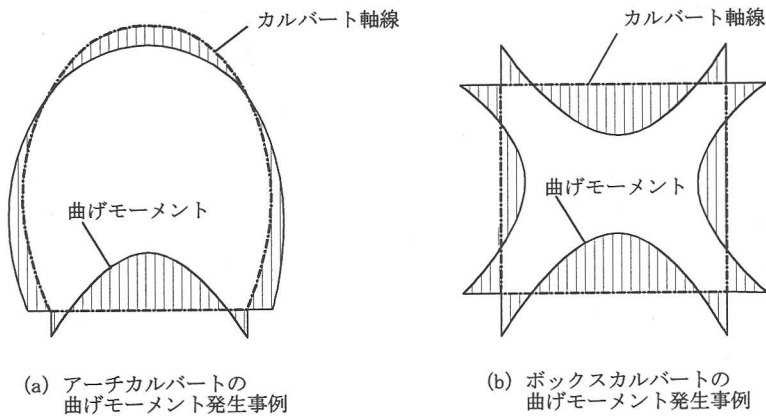


図-2 従来型カルバートに発生する曲げモーメントの形態 (図-1に対応)

のRCCカルバートは、大きく2つの特徴がある。

1つの特徴は、アーチ形状と台形を組み合わせた独自のカルバート形状を用いることにより、無筋コンクリートを主体としたカルバート構築を行うところにある。この形状は、半楕円形をその軸線としており、カルバート周辺の土圧やカルバートの死荷重に対して、部材の曲げモーメントを極小化し、カルバート内を軸圧縮応力状態とすることができる。これにより、鉄筋等による補強なしで十分な安全性を有するカルバートを構築することが可能となり、コンクリートの中酸化や塩害に伴う鉄筋腐食の心配もなくなる。さらに、カルバート内が軸圧縮応力状態となることから鉄筋コンクリートでみられるひびわれもなく、全体的にコンクリート構造物の耐久性向

上が期待できるものである。

もう1つの特徴は、カルバートの主要なコンクリート材料としてRCCを使用し、盛土作業と並行したカルバートの構築を可能としていることにある。これにより、カルバート構造物の構築完了を待たずに、カルバート周辺の盛土を行うことができ、工期の大幅な短縮が可能となっている。また、従来の型枠、型枠支保工やセメントが不要となることやほとんど鉄筋を使用しないため、従来型のカルバート工法に比較して、かなりの工費縮減が可能である。

本論文では、このRCCカルバートの構造理論を明らかにするとともに、RCCカルバートの合理的な設計手法について述べる。

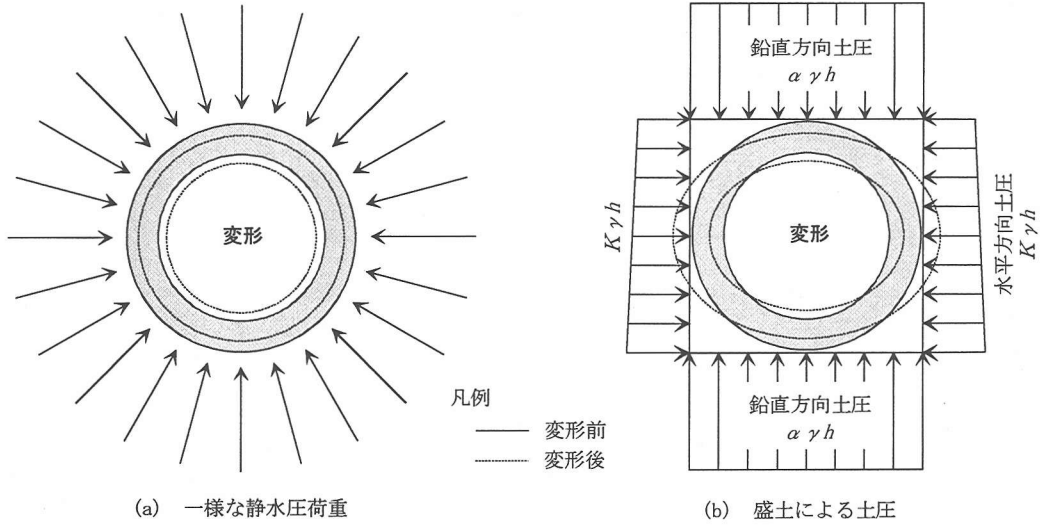


図-3 円形カルバートの変形状態

2. 軸圧縮応力状態となるカルバート形状

(1) 従来型カルバートの形状・構造上の問題点

従来型のボックスカルバートやアーチカルバートは、鉄筋コンクリート構造物として設計される。それは、いうまでもなく、従来型カルバートの形状や構造では、多くの部材に大きな曲げモーメントが発生するため、部分的に引張応力の発生が避けられず、引張に弱いコンクリートを鉄筋で補強する必要があるためである。

したがって、カルバートの形状および構造を工夫して、曲げモーメントの発生を僅かにし、カルバートを軸力主体とすることができれば、カルバート内の応力を圧縮応力状態にすることが可能となり、鉄筋をほとんど用いないコンクリートを主体としたカルバート構築が可能となる。そうすれば、圧縮に強いというコンクリート本来の優れた性質を有効に活かした構造物となり、鉄筋の使用が少なくとも十分に安全性の高いカルバート構造物を構築することが可能となる。

そこで、まず、従来型のカルバートにおいて、なぜ引張応力が発生するのか、について考える。従来型のボックスカルバートやアーチカルバートの構造は、図-1に示すように矩形や半円形といった形状の違いは若干あるもののカルバートは閉じた構造となっている。そこで、これらのカルバート構造を単純化し、円形のカルバートとして考察を進める。

表-1 鉛直土圧係数¹⁾

h/B_0	$h/B_0 < 1$	$1 \leq h/B_0 < 2$	$2 \leq h/B_0 < 3$	$3 \leq h/B_0 < 4$	$4 \leq h/B_0$
α	1.0	1.2	1.35	1.5	1.6

この円形のカルバートは、自重による死荷重がなく、カルバートの周囲は水であると仮定する。このとき、カルバートへ作用する水圧は、カルバート外周に一律に同じ静水圧荷重が作用すると仮定すると、図-3(a)に示すように円形カルバートは円形の中心に向かって一様に収縮する。その結果、円形カルバートは、曲げモーメントが発生せず、軸力のみとなり、カルバートの応力は軸圧縮応力状態となる。

ところが、図-3(b)に示すように円形カルバートの外周が水ではなく盛土である場合には、円形カルバート部材には曲げモーメントが発生し、部分的に引張応力が発生する。これは、盛土の場合、水平方向の土圧が鉛直方向の土圧より小さいために鉛直方向の土圧が卓越し、円形カルバートを横に扁平な形状に変形させるからである。

$$\alpha = 1.00 + 0.207 \cdot (h/B_0) - 0.0143 \cdot (h/B_0)^2 \quad (1)$$

ただし、 $h/B_0 \geq 4$ の場合には、 $\alpha = 1.6$ とする²⁾。

ここに、 α : 鉛直土圧係数
 h : カルバートの土被り
 B_0 : カルバートの天端幅

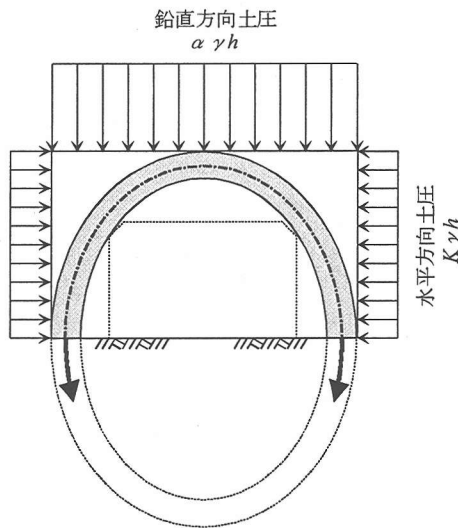


図-4 半楕円形を軸線とするカルバート

盛土内のカルバートに作用する鉛直土圧は、盛土の単位重量 γ 、カルバートの土かぶり高さ h に表-1および式(1)に示すような鉛直土圧の割増係数 α を乗じた $\alpha\gamma h$ であり、 α は1.0 以上1.6 以下である。これに対して、水平土圧は土被り荷重 γh に側圧係数 K を乗じた $K\gamma h$ であり、 K を静止土圧係数として0.5とした場合、鉛直土圧と水平土圧の比は $\alpha/K = 2\alpha$ となる。すなわち、鉛直土圧は、水平土圧に比べて、2.0 倍～3.2 倍程度の土圧になる。そのため、盛土内の円形カルバートが一樣静水圧を受ける円形カルバートと同じような応力状態となるためには、カルバートの形状を縦長の楕円形状にし、上述の鉛直土圧と水平土圧の大きさの違いを考慮した形状にする必要がある。

ところが、一般に、カルバートの内空断面形状は、内空高さに比べて内空幅が大きい横長の場合が圧倒的に多い。というのも、カルバート内部の利用形態は、①車道+水路、あるいは②車道+河川といった利用が多く、これらの組み合わせでは、おのおのを横に並列に配置することになることから、内空断面として必要な空間は必然的に横長になる。そのため、必要内空断面に応じてカルバートを決定すると、そのカルバートは鉛直土圧が卓越することとなり、結果的に頂版あるいは底版では曲げモーメントが大きくなる。

また、従来型のカルバート形状は、上述のような円形や楕円形のように連続した曲線ではなく、図-1に示すように隅角部を有する。ボックスカルバートの場合、矩形状であることから4箇所の隅角部

を有し、アーチカルバートの場合、上部はアーチ形状であるが、底盤部はボックスカルバートと同様の形状であり、2箇所の隅角部を有する。この隅角部では、その他の箇所に比べて内空へ変形しづらく、円形カルバートや楕円形カルバートでみられる円中心あるいは楕円中心への一樣な断面収縮を行うことができない結果、図-2に示すように角部周辺の部材に大きな曲げモーメントが作用することになり、部分的に引張応力が発生することとなる。

このように従来型のカルバートの場合、カルバート内が軸圧縮応力状態となることを妨げている要因は2つである。1つは、隅角部の存在である。隅角部が存在する場合、隅角部とその周辺の変形量の違いが生じる結果、カルバート内には大きな曲げモーメントが生ずることになる。もう1つは、カルバートが閉じた構造であることにある。閉じたカルバート構造では、上述のようにカルバート周辺の鉛直土圧と水平土圧の大きさの違いを考慮した場合、縦長のカルバート形状が必要となる。これに対し、必要な内空断面の形状は横長であり、この内空断面に合うようカルバート形状を決定すれば、曲げモーメントが発生することになる。

(2) 半楕円形を基本とするカルバート形状

そこで、従来型のカルバートが軸圧縮応力状態となることを妨げている2つの要因を取り除いたカルバート形状として、図-4に示すような半楕円形のカルバートを考える。カルバートの形状が、半楕円形であれば隅角部もなくなり、カルバート内部に横長の内空断面の形状をうまく配置できる。

このようなアーチ形状は、石材あるいは煉瓦などの引張に弱い材料を用いて、広い径間に梁を渡す建築構造として古代より発達してきたアーチ構造を想像させる。古代エジプト、古代ギリシャ、古代メソポタミアの時代からあったアーチ構造は、ローマ人によって高度な水準まで発達し、中世以降の西欧建築構法の基本となったものである。最も一般的なアーチは半円アーチ(写真-1)である。

この半円アーチの施工は、半円環を奇数個のくさび形の迫石(せりいし)に分割してつくり、半円形の本造型枠の上に両端から並べていき、最後に頂部の要石(キーストーン)をはめてから型枠をはずすという方法により築造を行う。迫石と迫石の間の摩擦力が十分大きいか、あるいは、迫石が相互にモルタルで接着され、アーチの左右が壁で十分に固められていれば、アーチ上にかかる荷重は全ての迫石に圧縮応力として伝達され、迫石は移動することなく



写真-1 ルネッサンス時代の建築物

非常に堅固なアーチ状の開口部を形作る。このとき、アーチ両端部に外側へ向かって斜め下方への力が生ずるが、これをアーチ両側の強固な迫台（アバットメント）が支えることで、アーチ部材には、ほとんど曲げの力が生じず、石材あるいは煉瓦などの引張に弱い材料の使用が可能となっている⁷⁾。

半楕円形カルバートも同様に基本的な考え方は同じである。半楕円形上方から作用する鉛直土圧によって、半楕円形カルバートは、アーチ天端部から両端部外側に向かって斜め下方への力が生ずる。

この力に対して、水平方向の力は周辺の盛土で、鉛直方向の力は基礎地盤でしっかりと支えることができれば、アーチ部材に、ほとんど曲げの力が生じず軸力主体となるカルバートを構築することが可能である。

このとき、盛土内のカルバートでは、建築物と違ってカルバート周辺は盛土であり、カルバートに作用する鉛直土圧や水平土圧は、土かぶりやカルバートの大きさによって異なることから、画一的な形状でカルバート内を軸力主体とすることは困難である。これに対して、半楕円形は、鉛直土圧や水平土圧の大きさに応じて、長軸および短軸を適切な寸法に変化させることが可能であり、カルバート内に発生する曲げモーメントを極小化し、カルバート内を軸圧縮応力状態とすることが可能となる。この半楕円形の具体的な形状決定方法については、次章以降で詳述する。

(3) 基礎地盤支持力を考慮したカルバート形状

図-4 に示すように、半楕円形カルバートの左右

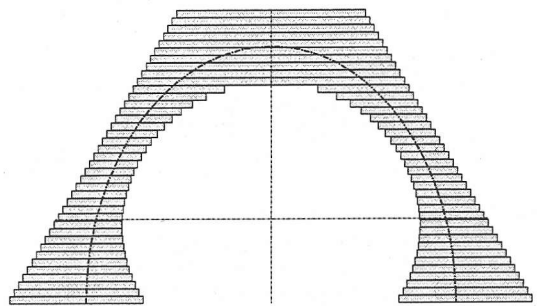


図-5 カルバート内を軸圧縮応力状態にし、基礎地盤の支持力を考慮できるRCCカルバートの形状

脚部には、カルバート上部に作用する鉛直土圧やカルバート死荷重などの荷重が集中的に作用する。これらの鉛直力は、土かぶりが大きくなると非常に大きなものとなる。楕円形カルバートでは、これらの鉛直力は下半分のコンクリート部材に伝達され、間接的に基礎地盤で支持されるのに対し、半楕円形カルバートでは、カルバートの脚部を介して、直接、基礎地盤で支持される。

このとき、基礎地盤となるのは、盛土、洪積世の砂礫層あるいは軟岩・硬岩などの岩盤となるが、一般に、地盤は、コンクリートに比べて著しく剛性が低く、集中的に、これらの鉛直力が作用すると、大きな沈下や地盤の破壊を起こしやすという問題が生じる。そのため、カルバートの形状として、半楕円形を基本とするためには、アーチ脚部は、基礎地盤の沈下や破壊を防ぐため、脚部底面積を大きくし、基礎地盤の支持力を向上させる必要がある。

そのため、RCCカルバートは、図-5に示すように、カルバートの内側を円弧形状にし、外側を台形の形状にすることで、半楕円形のアーチ軸線を維持しながら、脚部の支持面積を大きくして基礎地盤の支持力を向上させている。

3. 半楕円形モデルに基づくカルバート断面力の解析的理論式⁸⁾

(1) FEM 解析手法の簡略化

これまで、RCCカルバートの設計では、従来の鉄筋コンクリート構造物の設計に用いるような骨組み構造や板構造にカルバートをモデル化することが難しく、仮にモデル化をおこなっても実際の結果と解析結果との整合性がとれない可能性が高いと判断して、カルバートとその周辺の地理的条件を大きく

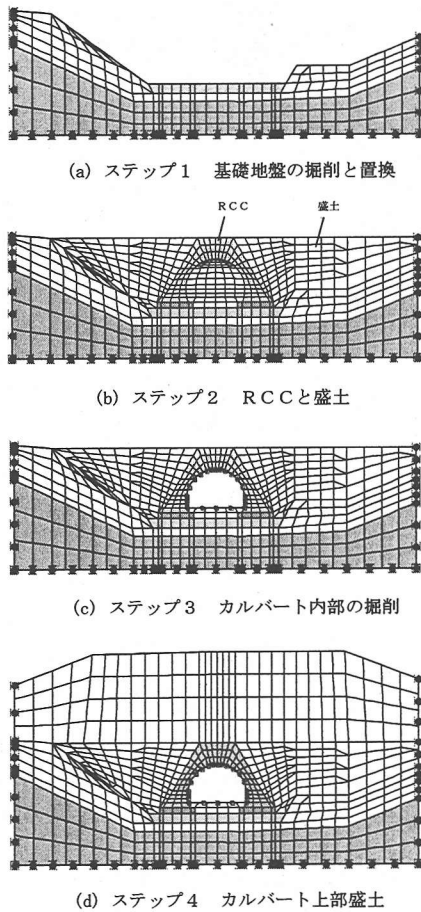


図-6 施工過程を考慮したFEM解析モデル
(全体FEMモデル)

カバーした領域について、カルバートおよび地盤を有限要素でモデル化し、2次元平面ひずみ線形弾性FEMによるステップ解析を実施してきた(図-6)。このとき、カルバートの部材寸法は、部材寸法や地盤条件を変化させて実施したケーススタディの結果に基づいて仮定した。カルバートや基礎地盤の破壊に対する照査は、FEM解析結果より、カルバートの応力や変位および基礎地盤の反力を抽出することにより実施した。

ところが、カルバート周辺の地理的条件を含めたFEMメッシュの作成は、複雑な地形条件や地質条件を含むことや、ステップごとに作成する必要があり容易ではない。また、カルバートの形状は、土かぶり高さなどの地盤条件やカルバート内空断面の規模に応じて変化すべきであり、画一的なカルバート形状では非常に不経済となることが容易に想像できる。

そこで、解析の簡略化を図るため、まず、図-6に

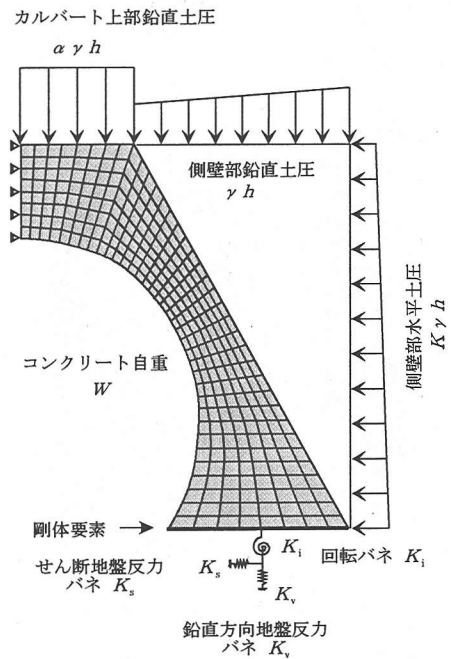


図-7 カルバートのみをモデル化した
FEM解析モデル (PFモデル)

示すような、カルバートとその周辺地盤を含めた領域を有限要素でモデル化し、施工過程を考慮していた解析モデル(以下、「全体FEMモデル」と略す)から、図-7に示すような、カルバートのみを有限要素でモデル化し、カルバート周辺地盤および基礎地盤を分布荷重やバネで表現するFEM解析モデル(以下、「PFモデル」と略す)を考える。このPFモデルでは、カルバートの施工過程を考慮せず、最終的な荷重条件および地盤条件に基づいて解析を行う。

このPFモデルでは、盛土による土圧やカルバートの死荷重によって生ずるカルバートと基礎地盤との相互作用を表現するため、図-7に示すように、基礎地盤の変形性能を鉛直方向地盤反力バネ K_v 、せん断地盤反力バネ K_s および回転バネ K_r を用いて表現し、カルバートに作用する盛土による土圧を分布荷重で表現している。このとき、カルバート脚部は、剛体要素で表現し、脚部底面中心に上記バネを作用させている。

カルバートに作用する土圧は、カルバート天端部分に作用する土圧と側壁部に作用する土圧に分けることができる。一般にカルバートが盛土中に敷設される場合、カルバートと周囲の土との鉛直方向相対変位が生じ、天端部には盛土の自重以上の鉛直土圧が作用する。そこで、天端部分に作用する土圧は、

表-2 カルバート脚部における地盤反力等解析結果 (PFモデルによる)

解析番号	カルバート土かぶり h (m)	カルバート内空半径 r (m)	側壁部壁厚 T_w (m)	SL以下の側壁長さ u (m)	基礎地盤変形係数 E (N/mm ²)	カルバート脚部回転角 ϕ (°)	カルバート脚部鉛直地盤反力 R_v (kN/m)	カルバート脚部水平せん断地盤反力 R_h (kN/m)	側壁部水平土圧合力 P_h (kN/m)	R_h/P_h (%)
1	20	5	0.3r	0.6r	21	0.007	2834.4	51.4	2602.9	2.0
2	20	5	0.3r	0.6r	35	0.005	2834.4	66.6	2602.9	2.6
3	20	5	0.3r	0.6r	100	0.002	2834.4	93.1	2602.9	3.6
4	10	5	0.25r	0.5r	21	0.017	5327.7	26.8	1341.3	2.0
5	10	5	0.25r	0.5r	35	0.014	5327.7	34.0	1341.3	2.5
6	10	5	0.25r	0.5r	100	0.007	5327.7	46.8	1341.3	3.5

鉛直土圧係数 a を用いて、 $a\gamma h$ と表現し、側壁部に作用する土圧は、鉛直方向については γh 、水平方向については水平土圧係数 K を用いて、 $K\gamma h$ と仮定している。

(2) 半楕円形モデルによる簡略化

このPFモデルは、施工過程を考慮しないで、最終的な荷重条件での解析を行うものであるが、全体FEMモデルと同様な解析結果が得られることがわかっている⁸⁾。ここでは、さらに進めて、カルバートの軸線を半楕円形でモデル化（以下、「半楕円形モデル」と略す、図-9）する。

この他アーチには、円弧、放物線や懸垂線などがあるが、RCCカルバートは、図-8に示すように、半楕円形状により、カルバートの軸線をうまく表現できる。また、半楕円はX方向軸およびY方向軸の a, b の寸法を決定するだけで形状が容易に求まることから、カルバートの形状変化に対して対応が容易に可能であり、RCCカルバートをモデル化するには適している。

カルバートに作用する荷重や支持条件は、前述のPFモデルと同様に分布荷重やバネで表現できる。ただ、この場合、カルバート脚部の支持条件をバネで表現すると、左右支点における拘束度の総和は6となることから、カルバートは3次の不静定構造物となる。

ところが、RCCカルバート脚部の支点条件は、以下の理由から、図-9に示すように単純支持条件とすることができる。そのため、カルバートは静定構造物と等価となり、力のつり合い条件のみから、理論的にカルバートの断面力を求めることができる。

a) カルバート脚部における鉛直方向の拘束条件

半楕円形モデルにおける鉛直方向のバネは、カルバート全体の沈下に影響するのみであり、カルバートの相対的変形を生じさせない。そのため、カルバ

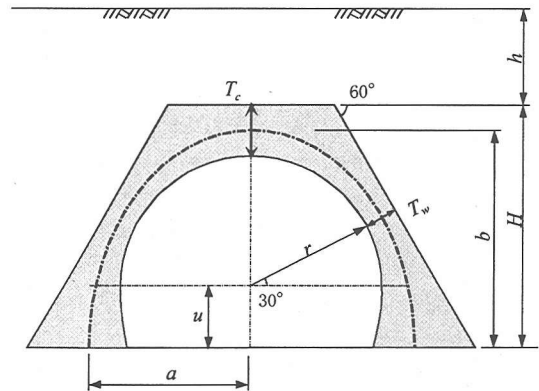


図-8 半楕円形によるカルバート軸線のモデル化

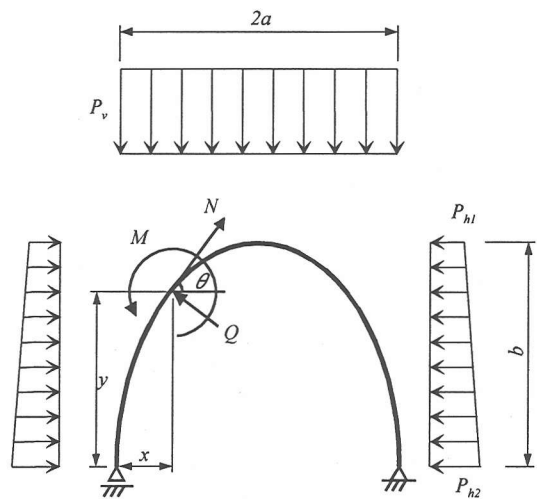


図-9 カルバート軸線を半楕円形でモデル化した解析モデル (半楕円形モデル)

ートの内部応力への影響はなく、鉛直方向の支持条件を鉛直方向地盤反力バネとした場合と鉛直方向固定とした場合では両者に違いが生じないことは明らかである。したがって、鉛直方向の拘束条件については固定条件として簡略化が可能である。

b) カルバート脚部における水平方向の拘束条件

側壁部に作用する水平土圧は、カルバート脚部下の基礎地盤のせん断地盤反力が、その一部を分担することになる。表-2は、前述のPFモデルを用いて、土かぶりおよび基礎地盤の条件を変化させて、この基礎地盤のせん断地盤反力を解析した結果である。表より、水平土圧合力に対する水平方向せん断地盤反力バネの分担割合は、土かぶりの影響を受けず、基礎地盤の変形係数に比例して大きくなる傾向にあるが、その分担率は2～4%とわずかであることがわかる。一般に、地盤の剛性は、コンクリートに比べてかなり小さく、水平土圧の大部分は剛性の高いカルバートの側壁部が分担する結果となる。水平方向の拘束条件をフリーとした場合、側壁部にすべての水平土圧が作用することになるが、上述のように基礎地盤のせん断力の分担率は低く、その影響は少ない。また、これは側壁の設計上、安全側となる方向であることから、水平方向の拘束条件については水平ローラーとして簡略化が可能である。

c) カルバート脚部における回転の拘束条件

回転バネは、カルバート脚部が回転することにより、基礎地盤の反力としてカルバート脚部に曲げモーメントを与える。したがって、カルバート脚部の回転が生じなければ、回転バネの意味はなく、拘束がないヒンジとして簡略化が可能である。カルバート内が軸圧縮応力状態になる場合、カルバートは半楕円形中心に向かって変形し、カルバート部材の回転はほとんど発生しない。これはカルバート脚部も同様であり(表-2参照)、回転バネの影響は無視できると考えられる。

(3) 半楕円形モデルによるカルバート断面力の解析的理論式の構築

カルバートに作用する荷重は、カルバート上部、左右の盛土による土圧およびカルバート死荷重である。半楕円形モデルによる断面力の解析的理論式は、各荷重による断面力を算出し、最終的に、それらを足し合わせることによって求めることができる。式(2)～式(4)に、半楕円形モデルに基づく断面力の理論式を示す。

$$M = P_v \left(a - \frac{x}{2} \right) x - P_{h1} \cdot \frac{y^2}{2} - \left\{ \frac{y^2(b-y)}{2b} + \frac{y^3}{3b} \right\} (P_{h2} - P_{h1}) - \frac{y^3}{3b} (P_{h2} - P_{h1}) + \frac{\gamma_c \cdot \pi \cdot x \cdot A}{2} \left(\sqrt{\frac{a^2 + b^2}{2}} - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{x^2 + y^2}{2}} \right) + \gamma \cdot x \left(ab - \frac{2xy}{3} \right) \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \quad (2)$$

$$N = P_v(x-a) \sin \theta - P_{h1} \cdot y \cdot \cos \theta - \left\{ \frac{y(b-y)}{b} + \frac{y^2}{2b} \right\} (P_{h2} - P_{h1}) \cos \theta + \frac{\gamma_c \cdot \pi \cdot A}{2} \left(-\sqrt{\frac{a^2 + b^2}{2}} + \sqrt{\frac{x^2 + y^2}{2}} \right) \sin \theta + \gamma(xy-ab) \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \sin \theta \quad (3)$$

$$Q = P_v(x-a) \sin \theta + P_{h1} \cdot y \cdot \sin \theta + \left\{ \frac{y(b-y)}{b} + \frac{y^2}{2b} \right\} (P_{h2} - P_{h1}) \sin \theta + \frac{\gamma_c \cdot \pi \cdot A}{2} \left(-\sqrt{\frac{a^2 + b^2}{2}} + \sqrt{\frac{x^2 + y^2}{2}} \right) \cos \theta + \gamma(xy-ab) \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \cos \theta \quad (4)$$

ここに、

- P_v : カルバート天端より上の鉛直土圧 $\alpha \gamma h$
- P_{h1} : カルバート天端位置の水平土圧 $K \gamma h_1$
- P_{h2} : カルバート脚部位置の水平土圧 $K \gamma h_2$
- θ : 断面力算定位置における軸線と水平とのなす角度
- γ_c : カルバートの単位重量
- A : 側壁最小部材厚断面の断面積 (奥行き 1m)

4. 軸圧縮応力状態となる半楕円形カルバート軸線の算定⁸⁾

これまで、RCCカルバートの形状寸法は、カルバート内空半径に対する比率で各部材の寸法を規定していた。ところが、カルバート内が軸圧縮応力状態となる理想的なカルバート形状は、土かぶりな

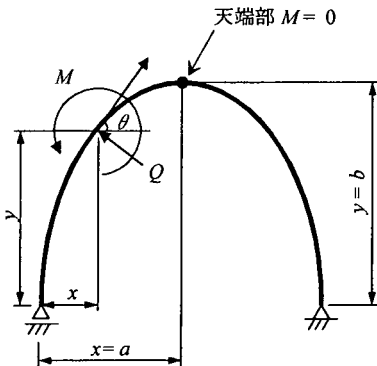
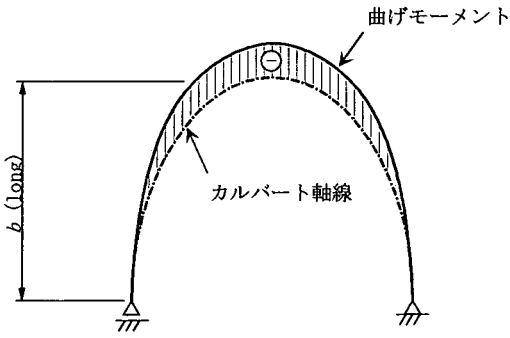
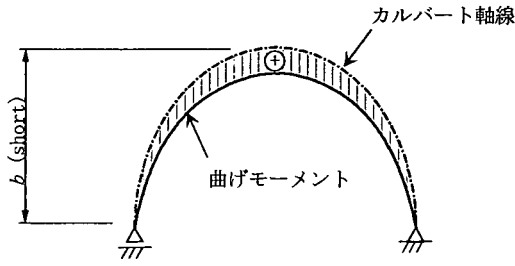


図-10 半楕円形モデルにおける曲げモーメントの発生形態と、曲げモーメント極小化の条件

どの地盤条件やカルバート内空断面の規模に応じて決まるものであり、カルバート内空半径に応じた画一的な部材寸法でカルバートの形状を表現することには無理がある。そこで、本章では、前章で構築した半楕円形モデルに基づくカルバートの断面力の理論式を用いて、曲げモーメントを極小化させる半楕円アーチ軸線形状の算定を行う。

(1) 半楕円形モデルにおける曲げモーメントの発生形態

半楕円形モデルでは、モデルに作用する鉛直土圧と水平土圧がうまくバランスするカルバート形状に限って、曲げモーメントがほとんど発生せず、カルバート内が圧縮応力状態となる。これに対して、モデル周辺の土圧に対して不適切なカルバート形状では、カルバート天端部から脚部にかけて曲げモーメントが生ずることになる。図-10は、半楕円形モデルにおけるカルバートの曲げモーメント発生形態を示したものである。図-10(a)は、カルバートの高さ b が、適切なカルバート形状に比べて短く、その結果、水平土圧より鉛直土圧が卓越する場合である。このとき、カルバートは、横に扁平な変形状態となり、カルバートの曲げモーメントは、カルバート内側に引張応力を発生させるようにプラスとして発生し、カルバート天端部で最大値をとり、カルバート脚部で0となる。これに対し、図-10(b)は、カルバートの高さ b が、適切なカルバート形状に比べて長く、その結果、鉛直土圧より水平土圧が卓越した場合である。このとき、カルバートは、縦に扁平な変形状態となり、カルバートの曲げモーメントは、カルバート外側に引張応力を発生させるようにマイナスとして発生し、カルバート天端部で最小値をとり、カルバート脚部で0となる。

(2) 曲げモーメントを極小化させる条件

このように、半楕円形モデルでは、鉛直土圧が卓越する場合でも水平土圧が卓越する場合でも、カルバート天端部では曲げモーメントの絶対値が最大となる。したがって、カルバート内の曲げモーメントの発生を極力抑えるためには、図-10(c)に示すように、カルバート天端部の曲げモーメントをゼロとすることが必要である。すなわち、式(2)に、カルバート天端部の条件 $x=a, y=b$ を代入し、 $M=0$ とした式(5)を満足するように半楕円形の寸法 a, b を決定すればよい。

ただ、式(5)において $M=0$ を満足する半楕円形は無数に存在するため、半楕円形をカルバートとの位置関係において関連づける必要がある。まず、図-11に示すように、カルバート内空半径を r 、側壁部最小部材厚を T_w とし、半楕円アーチ軸線がカルバート側壁最小部材厚断面の中心位置である O 点を通過すると仮定する。

次に、半楕円アーチ軸線の楕円中心位置と O 点とを関連づけるため、側壁におけるスプリングライン(以下、SLと略す)以下の長さ u を仮定する。これ

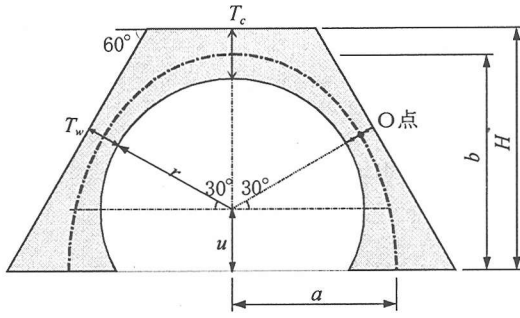


図-11 半楕円形アーチ軸線とカルバート形状との関連

$$M = \frac{a^2}{2} P_v + \frac{b^2}{6} P_{h1} - \frac{2b^2}{3} P_{h2} + \frac{\gamma_c \pi a A}{4} \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{2}} + \frac{\gamma a^2 b}{3} \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) = 0 \quad (5)$$

$$b = \frac{a \{u + (r + 0.5T_w) \sin 30^\circ\}^2}{\sqrt{a^2 - \{(r + 0.5T_w) \cos 30^\circ\}^2}} \quad (6)$$

により、半楕円形寸法 a, b の関係は式 (6) で表すことができる。

これを式 (5) に代入することにより、 $M=0$ となるような半楕円形寸法 a, b が一意に決まることとなる。こうして得られた半楕円形状は、土かぶりなどの地盤条件や内空断面の規模などを考慮するとともに、部材内に発生する曲げモーメントを極小化し、軸力が主体となるカルバートの軸線形状を与えることとなる。

5. 合理的なカルバート形状の算定

前章では、理論式に基づいて、土かぶりなどの地盤条件や内空断面の規模などの条件下において、部材内に発生する曲げモーメントを極小化し、軸力が主体となる半楕円形軸線を算出する方法を示した。

本章では、この半楕円形アーチ軸線を基本とした合理的なカルバート形状の算定方法について述べる。RCCカルバートの形状は、カルバートの内部形状を形成する円弧が1芯円である場合、図-12 に示すように、内空半径 r 、側壁最小部材厚さ T_w 、天端部材厚さ T_c 、側壁のSL以下の長さ u を決めれば確

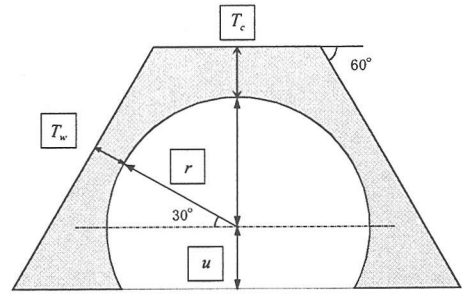
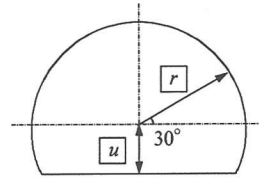
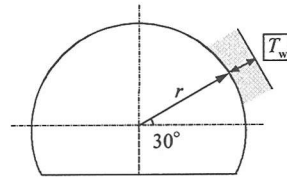


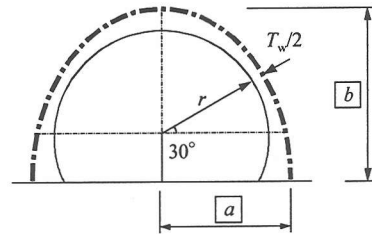
図-12 カルバートの形状を決める4つの部材寸法



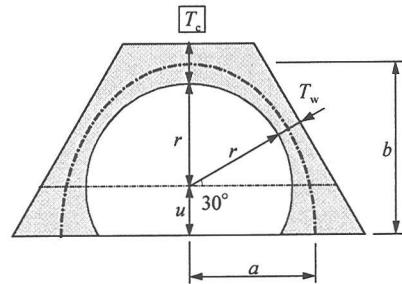
(a) カルバート内空断面の決定 r, u



(b) 側壁最小部材厚さの算定 T_w



(c) カルバート軸線の算定 a, b



(d) カルバート天端部材厚さの算定 T_c

図-13 カルバート形状算定の流れ

定できる。以下に、これらカルバート寸法の合理的な決定方法あるいは考え方について、実際の設計手順に沿って述べる。図-13 にカルバート形状算定のフローチャートを示す。

(1) カルバート内空断面の決定 r, u

カルバートの設計にあたって、まず、カルバート内部の利用形態に応じて、カルバート内空断面の形状を決定する。カルバート内部の利用形態は、①車道、②車道+水路、③河川+管理道路、等にわけることができる。カルバートの内空断面は、これらに必要な内部空間を確保するよう決定する。このカルバートの内空断面は、図-13(a)に示すように、内空半径 r 、側壁の SL 以下の長さ u を決定することで求まる。

側壁の SL 以下の長さ u は、カルバート周辺土圧の均衡や基礎地盤の支持力確保といった観点からカルバート内空半径との比でその寸法を決める。 u は、カルバートの高さやカルバート脚部の幅に比例関係があり、 u が長くなれば、これらの寸法は大きくなる。土かぶりとの関係では、カルバートの高さは土かぶりに比例して高くすることでカルバート周辺土圧の均衡がとれやすくなる。また、カルバート脚部の幅は、土かぶりに比例して大きくすることで基礎地盤の支持力が増加する。そのため、 u は、土かぶりに比例して大きくする必要がある。これまでの経験上、 u は、土かぶりの大きさに応じて、内空半径比で $u = 0.3r \sim 0.6r$ とするのが望ましい。

内空半径 r は、内空半径比で仮定した u を用いて、必要な内空断面を確保するよう算出する。高盛土の横断カルバートの場合、土かぶりの大きさが坑口部と中央部では大きく異なるが、このような場合の内空半径 r は、坑口部の土かぶりが少ない条件において、 $u = 0.3r \sim 0.4r$ に仮定し、必要な内空断面を確保するよう算出する。

(2) カルバート側壁最小部材厚さ T_w の算定

次に、側壁最小部材厚さ T_w を土かぶりの大きさや内空断面の規模を考慮して算出する。

この側壁部の最小部材厚断面には、図-14 に示すように、この位置より上方のカルバートの死荷重や盛土荷重により軸力が生じる。この軸力は、図-15 に示すように、側壁最小部材厚断面より上方のカルバートを固定円弧アーチと仮定して求めることができる。この固定円弧アーチの荷重は鉛直土圧のみを

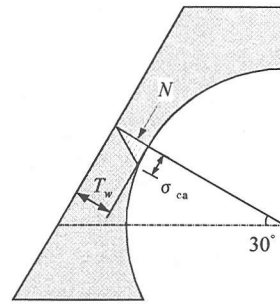


図-14 側壁最小部材厚部に作用する軸力 N と最小部材厚 T_w

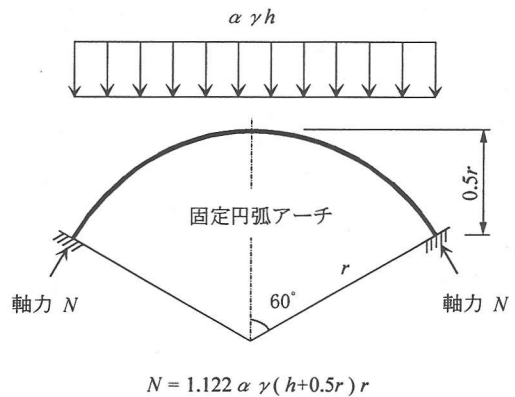


図-15 側壁最小部材厚断面に作用する軸力 N の算定

考慮し、この理論解から求めた式 (7) を用いることにより、軸力の近似値を求めることができる。カルバートに作用する土圧は、鉛直土圧のほかに水平土圧があるが、水平土圧による影響は軸力を減少させる作用であり、これによる軸力減少分は式 (7) で計算される軸力の 1 割以下となることから、これを無視し、鉛直土圧のみを考慮した軸力とする。

側壁最小部材厚さ T_w の算定方法は、その軸力が作用したとき、部材内に引張応力の発生を許容するか否かで、その方法が異なる。ここで述べる方法は、部材内に引張応力を発生させないことを条件とするものであり、図-14 に示すように、コンクリート縁の片方がコンクリート圧縮応力度の許容値 σ_{ca} 、もう片方がゼロとなるような 3 角形の応力分布になると仮定して、式 (8) より T_w を算定する。

このようにして求めた側壁最小部材厚さ T_w は、軸力部材として設計することになるため、かなり薄くなる。ただ、側壁最小部材厚が薄くなりすぎると、他の部材厚さとの相対的な関係などから、不釣り合いな形状となりやすい。また、無筋コンクリートであ

ることから、部材厚が薄くなりすぎると地震時あるいは偏土圧が作用した場合の耐力が極端に低下する。そのため、側壁最小部材厚さ T_w は、内空半径比 $0.20r \sim 0.25r$ 以上とすることが望ましい。

(3) カルバート軸線の算定 a, b

以上の方法により、内空半径 r 、側壁最小部材厚さ T_w 、カルバート側壁 SL 以下の長さ u 、を決定したのち、半楕円の寸法 a, b を求め、カルバートの軸線形状を決定する。具体的には、前章で述べたように、カルバート軸線を近似した半楕円が側壁最小部材断面の中心を通過するとともに、カルバート天端部の曲げモーメントを極小化させるように、半楕円の寸法 a, b を決定する。

この半楕円のカルバート軸線を用いることで、土かぶりなどの地盤条件や内空断面の規模などの条件下において、カルバートは、部材内に発生する曲げモーメントが極小化され、軸力が主体となる状態、すなわち軸圧縮応力状態となる。

(4) 天端部材厚さ T_c の算定

最後に、天端部材厚さ T_c を求める。

T_c は、上述のカルバートの軸線が天端部材の中心を通るよう決定する。つまり、 T_c は、カルバート軸線の高さ b から内空の高さ $(r+u)$ を差し引いたものが、天端部材厚さの $1/2$ であるという関係から、式 (9) を用いて求めることができる。以上の方法により、4つの構造寸法が決定され、RCCカルバートの形状が確定することとなる。

$$N = 1.122\gamma_a \alpha \gamma(h+0.5r)r \quad (7)$$

$$T_w = \frac{2N}{\sigma_{ca}} \quad (8)$$

$$T_c = 2 \times (b - r - u) \quad (9)$$

ここに

- N : 側壁部最小部材厚断面に作用する軸力
- γ_a : 構造解析係数
- σ_{ca} : コンクリート圧縮応力度の許容値

6. 設計計算例

この章では、これまで述べた設計手法（以下「新設計手法」と略す）を実際のカルバートへ適用した事例を紹介し、新設計手法を適用する効果について言及する。

(1) 車道と小規模な水路を有するカルバートの設計計算事例

まず、最初の設計計算例として、国土交通省中国地方整備局松江国道工事事務所で既に実施したRCCカルバート⁹⁾へ新設計手法を適用した場合の設計計算事例を図-16に示す。最大土かぶりは、建築限界より約16mであり、カルバート内部は、幅5.5mの車道と幅1.0mの水路として利用する事例である。

図-16(a)は、すでに施工したカルバートの実施計算例を示しており、土かぶりの大小に係わらず、このカルバート断面を全延長にわたって使用している。これに対して、新設計手法を用いる場合には、土かぶりの大小によって適切なカルバート形状にすることが可能であり、図-16(b)、図-16(c)に示すように坑口部と標準部で、そのカルバート形状を変化させている。

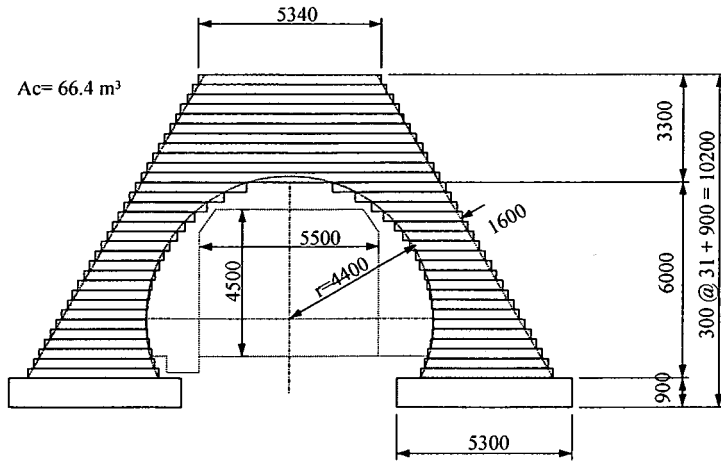
RCCカルバートでは、工事費の約7~8割がコンクリートの材料費および施工費であり、コンクリート断面積を縮減することが、カルバート工事費のコスト縮減に直結する。図-16(d)に示すように、両者の設計手法によるカルバートのコンクリート断面積は、実施計算例のカルバートが66.4m³であり、新設計手法による場合が、標準部47.0m³、坑口部37.0m³と大幅な縮減がなされており、標準部で29%、坑口部で44%のコンクリート断面積の縮減を達成している。このように、新設計手法によれば、土かぶりなどの地盤条件やカルバートの内空断面の規模や形状に応じて適切なカルバート形状を設計でき、これまでの設計手法に比べて大幅なコスト縮減を達成することが可能となっている。

また、これらのカルバート断面を用いて、前述のPFモデルを用いて解析した結果では、両断面とも軸圧縮応力状態となっており、コンクリートの最大圧縮応力は、標準部側壁内側において2.07 N/mm²であり、コンクリートの許容圧縮応力度 $\sigma_{ca} = 4.50$ N/mm² ($\sigma_{ck} = 18$ N/mm²) 以下である。

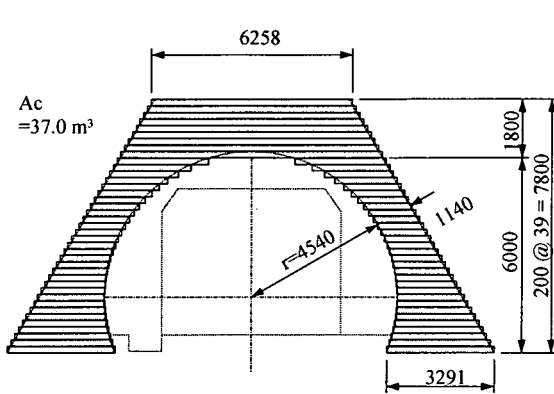
(2) 車道と河川を有するカルバートの設計計算事例

次の設計計算事例は、カルバート内部を河川および車道として利用するカルバートに新設計手法を適用した場合の設計計算事例である(図-17)。最大土かぶりは、建築限界より約23mであり、河川は幅4.1m、車道は幅4.0mである。

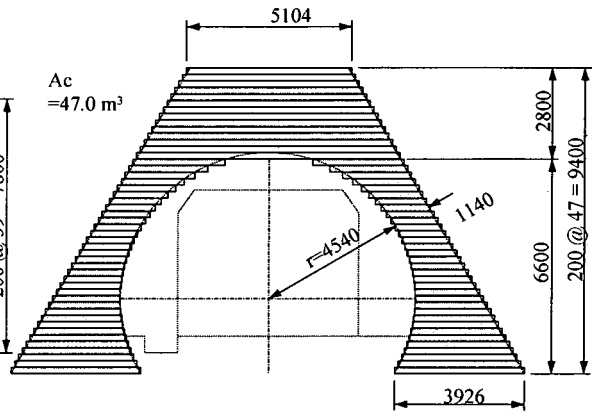
図-17に示すように、カルバート内部を河川と車道として利用する場合、カルバート内部に必要な空間はほとんどの場合、横長となる。この場合、ボツ



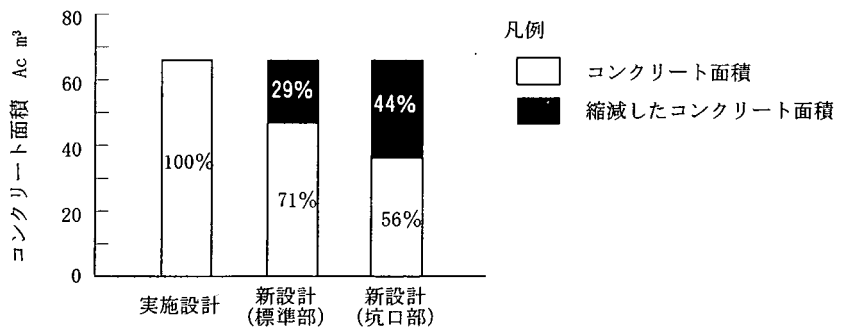
(a) すでに施工したカルバート断面の実施設計例（標準部，坑口部）



(b) 新設計手法によるカルバート断面（坑口部）

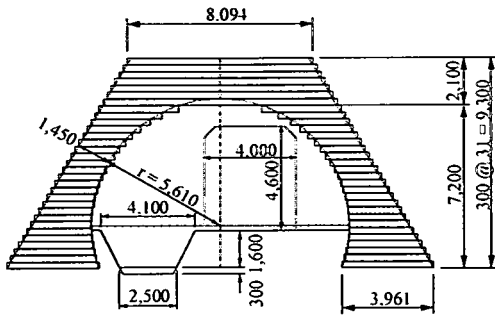


(c) 新設計手法によるカルバート断面（標準部）

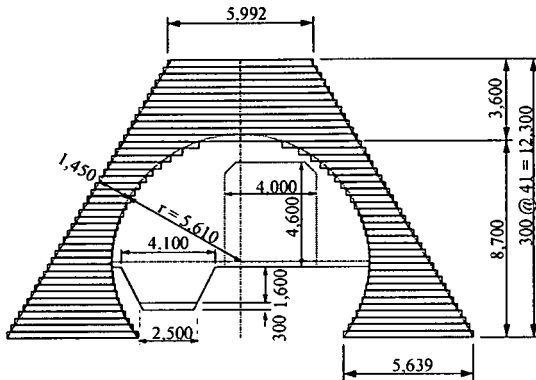


(d) 新設計手法によるコンクリート面積の削減効果

図-16 設計計算事例1（車道+水路）の断面図とコンクリート断面面積削減の効果



(a) カルバート断面図 坑口部



(b) カルバート断面図 標準部

図-17 設計計算事例2 (車道+河川)

クスカルバートでは土かぶりが大きくなると、頂版および底盤の部材厚が極端に大きくなり不経済となる。また、アーチカルバートでは、必要な横長空間に対して、縦長の形状（例えば、馬蹄形）となることから、カルバート内空上部に不必要な空間が生じ、同様に不経済となる。これに対して、新設計手法を用いて設計した場合、横長の必要内部空間をカルバート内にうまく取り込めており、合理的なカルバート構築が行えている。

7. 結論

本論文は、盛土内における新しいタイプのカルバートである、RCCカルバートの構造理論、ならびに実用化に際しての具体的な設計手法に関する研究内容を述べたものである。このほか、地震の影響については、本論文で言及できなかったが、これまで

静的あるいは動的の2次元FEMを用いた解析を実施することにより、RCCカルバートが地震時においても有効に機能することを確認している。実施設計例でも、地震時を考慮した設計を行っているが、この実施計算例の場合、平成12年10月に鳥取県で発生した鳥取県西部地震 (M7.3) の震源から約25kmしか離れていなかったにもかかわらず、まったく地震による影響はなく、RCCカルバートの地震に対する安全性を裏付ける結果が得られている。

以下に、本論文の結論を示す。

(1) 従来型のカルバートに曲げモーメントが発生する原因は、カルバート内部に隅角部を有すること、およびカルバート内部が閉じていることにある。これに対して、半楕円形のカルバートは、内部に隅角部がなく、カルバート底面が開放されていることから、上述の2つの原因もなく、カルバート内に発生する曲げモーメントを極小化することが可能である。また、カルバートの必要内空断面として一般的な横長の形状をうまく取り込むことができる。

(2) RCCカルバートの軸線は、この半楕円形状で近似できる。そのため、RCCカルバートは、カルバート周辺の土圧やカルバートの死荷重に対して、部材の曲げモーメントを極小化し、カルバート内を軸圧縮応力状態とすることができる。これにより、無筋コンクリートを主体としたカルバート構築が可能になり、耐久性も向上する。

(3) RCCカルバートの形状は、内側が円弧、外側が台形である。これは、カルバート脚部に作用する鉛直力が直接、基礎地盤へ集中することによる大きな沈下や破壊を考慮し、カルバート脚部幅を広げ、基礎地盤の支持力向上を図ったものである。

(4) RCCカルバートを半楕円形状でモデル化し（半楕円形モデル）、カルバートに作用する盛土荷重やカルバートの死荷重を用いて、半楕円形モデルの任意位置における断面力を解析的に算出することのできる理論式を構築するとともに、この半楕円形モデルの理論式を用いて、カルバートに発生する曲げモーメントを極小化し、カルバート内が軸圧縮応力状態となるカルバート軸線およびカルバート形状が算出できる設計手法を示している。

(5) カルバート内の曲げモーメントが極小化され、カルバート内が軸圧縮応力状態となる必要条件是、半楕円形モデルにおいて、カルバートに作用する土圧やカルバートの死荷重に対して、天端部の曲げモーメントがゼロとなるような半楕円アーチ軸線形状を決定することにある。これにより、カルバートは、

曲げモーメントが極小化され、カルバート内が軸圧縮応力状態となる。

(6) RCCカルバートの具体的な形状の算定は、曲げモーメントを極小化できるこの半楕円アーチ軸線を用いて、図-12に示すように4つの部材寸法を確定することにより行う。まず、カルバート内部の半径 r とSL以下の側壁長さ u を、カルバート内部施設の規模や形状を確保するよう決定する。側壁部の最小部材厚 T_w は、カルバートの土かぶり h およびカルバート内部の半径 r を用いて、式(7)、式(8)を用いて近似値を算出する。残りの部材寸法である天端部材厚 T_c は、上述の方法により求めたカルバート軸線が天端部材中心を通るという条件から、式(9)を用いて算出する。以上の方法により、土かぶりなどの地盤条件やカルバートの内空規模に応じて、曲げモーメントが極小化され、軸力主体となるカルバートの形状を合理的に決定できる。

(6) 最後に、本論文で示した設計手法を実際のカルバートに適用した設計計算例を示し、その合理性を明らかにしている。本論文で提案する設計手法によれば、旧設計手法で求めたカルバートのコンクリート断面積に比較して、最大土かぶり部では、29%、坑口部の土かぶりが無い箇所では、44%の断面積の縮減が行えており、土かぶりに応じた合理的なカルバート設計を行うことができる。また、カルバート内は軸圧縮応力状態となり、応力的にも十分安全なカルバートの設計が可能である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路土工カルバート指針，1999.3.
- 2) 日本道路公団：設計要領第二集 第8編 擁壁・カルバート，1997.11.
- 3) たとえば，長尾哲，山岸将人，中川吉洋：カルバートの土圧軽減工法の実験，土木技術，VOL.50，NO.3，pp.48-57，1995.
- 4) Hansen, K.D. and Reinhardt, W.G. : Roller-Compacted Concrete Dams., McGraw-Hill, 1990.
- 5) 鈴木徳行，白村 暁：コンクリートダム の合理化施工と世界の動向，月刊ダム日本，No.575，pp.57-71，1992.
- 6) 西垣 誠，草地三陽，山本浩史：RCC (Roller Compacted Concrete) を利用した高盛土カルバートの提案，第29回土質工学研究発表会，pp. 2019~2022，1994.
- 7) 下中 弘：世界大百科事典，平凡社，No.1，p. 279，1995.
- 8) 山本 浩史：RCCカルバートの設計と実用化に関する研究，京都大学大学院工学研究科博士学位論文，2001.9.
- 9) 岡 邦彦，飯國卓夫，久保田龍二，山本浩史：RCCを用いたアーチカルバートの施工 安来道路 上分函渠工事，トンネルと地下，vol.31，No.12，2000.12.

(2001. 11. 21 受付)

STUDY ON THE DESIGN AND UTILIZATION OF A NEW TYPE CULVERT METHOD USING RCC

Hiroshi YAMAMOTO and Koichi ONO

In our country where the plain part is already occupied, in the near future, the highway construction in mountains zone will become main and then it is expected that a culvert in high embankment will increase in number. On the other hand, if it is taken into consideration that the financial situation of our country in the 21st century becomes still severer, it is necessary to promote cost reduction of public-works further. This paper presents the contents of study on the design and utilization of a new type culvert method, namely RCC culvert that had been developed for the purpose of time-necessary-for-completion shortening, cost-of-construction reduction, and improvement in durability.