

RCC (転圧コンクリート) を使用した盛土内の新しいカルバート工法

A new culvert method used RCC (Roller-Compacted-Concrete) in embankment

西垣 誠	Makoto Nishigaki	(岡山大学環境理工学部環境デザイン工学科教授)
草地三陽	Mitsuharu Kusachi	(アイサワ工業(株)技術部 課長)
森田壽一	Juichi Morita	(アイサワ工業(株)技術研究所基礎技術研究室室長)
山本浩史	Hiroshi Yamamoto	(アイサワ工業(株)技術研究所基礎技術研究室主任研究員)
松田義則	Yoshinori Matsuda	(八千代エンジニアリング(株)東京第二事業部構造部主幹)

本工法(RCCカルバート工法)は、従来のアーチカルバート工法の問題点を解決する盛土内の新しいカルバート工法である。特徴として、カルバート本体の主要部材にRCC(転圧コンクリート)を使用することや、鉄筋・型枠が不要であり、盛土とカルバートの構築が同時にできること等の利点を有している。そのため、従来のアーチカルバートの構築方法に比較して、施工性、安全性、経済性、工期など、ほとんど全ての点において優れることがわかっていく。

本工法は、有限要素法による数値解析を実施して、様々な形状のカルバートに発生する応力や変形について繰り返し比較検討を行うとともに、実際の施工過程を再現した大型模型載荷実験を行い、さらにその有効性を検証した。

キーワード：RCC、転圧コンクリート、カルバート、盛土、有限要素法、載荷試験 (IGC:H5)

1. はじめに

現在、道路土工等に伴って盛土中に設置される道路用カルバートは、鉄筋コンクリート構造物のカルバートとして設計されている。土被りが10m以下では、一般にボックスカルバートが採用され、それ以上の土被りになると(10~15m以上)、ボックスカルバートの不経済さを解消するため、高盛土内の道路カルバートにはアーチカルバートが採用されている。

従来、幹線の高速道路建設においては、高盛土は余り多くなかったため、アーチカルバートの建設は少なかったが、最近では、高速道路建設の多くが、急峻な山岳地での施工となっているため、長大のり面の切土や高盛土が多く、それに伴いアーチカルバートの需要も増加している。

ところが、高盛土におけるアーチカルバートは、施工延長が長くなるため、施工に多大な時間がかかり、盛土も含めた全体工期に大きな影響を及ぼしている。また、カルバート形状がアーチ型となるため施工性が悪く、建設費も高くなっている。したがって、今後の山岳地における高速道路建設においては、これらのアーチカルバートの問題を早急に解決する必要がある。

また、近年の労働者の高齢化や技能・熟練労働者の

不足により、今後の建設業界においては、施工の省力化・機械化、また安全性・快適性の向上が必要不可欠となっている。

本論文は、上述の山岳地における従来のアーチカルバート工法の問題や建設業界の課題を踏まえて、高速道路等の高盛土内カルバートの「施工の省力化・機械化」また「安全性・快適性の向上」に貢献する新しいカルバート工法(RCCカルバート工法)を提案するとともに、その有効性を大型模型載荷実験により検証した結果をここに報告するものである。

2. 本工法の概要

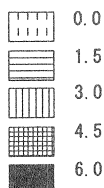
2.1 技術開発の経緯

ここで提案する新しい工法の大きな特徴は、カルバートの主要な構成部材の材料として、RCC(転圧コンクリート)を使用することにある。RCCは急速施工が可能であり、そこから得られる工期的・経済的メリットにより、ダムや舗装においてよく使用されている。このような利点がカルバートの施工においても適用できれば、急速施工から得られる経済的・工期的なメリットにより、従来のアーチカルバート工法の種々の課題

が解決できると考えられた。

ところが、従来のアーチカルバートは、一般に鉄筋コンクリート構造物として設計されており、部材内に引張応力が発生することを前提にしている。図-1は、有限要素法による静的変形解析を行って算出した従来のアーチカルバートに発生するコンクリートの最大主力（引張応力）コンター図である。図のように、従来のアーチカルバートにおいては、天端部内側、側壁部外側、底版部内側に引張応力が生じるため、基本的に無筋コンクリートとなるRCCは適用できなかった。したがって、RCCを適用するためには、カルバート部材のコンクリートに引張応力が発生しないことが必要であった。

引張応力凡例
(kgf/cm²)



【盛土】

$$\begin{aligned} \gamma &= 1.9 \text{ tf/m}^3 \\ E &= 140 \text{ kgf/cm}^2 \\ \nu &= 0.3 \end{aligned}$$

【コンクリート】

$$\begin{aligned} \gamma &= 2.5 \text{ tf/m}^3 \\ E &= 250,000 \text{ kgf/cm}^2 \\ \nu &= 0.2 \end{aligned}$$

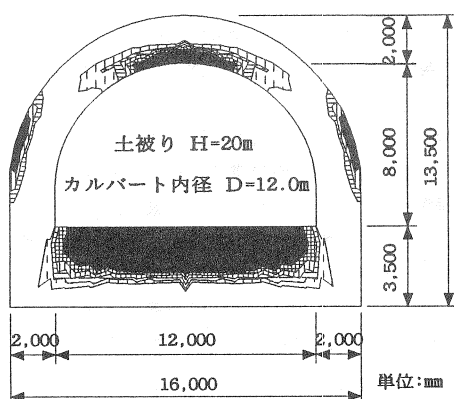


図-1 従来のアーチカルバートの形状と引張応力発生領域

このような観点より、RCCが適用可能であり、かつ経済的なカルバート形状を開発するため、有限要素法による静的変形解析を行って¹⁾、様々な形状のカルバート内に発生する応力や変形に関して、繰り返し比較検討を行った。その結果、カルバートの形状を図-2のように施工することによって、RCC部のコンク

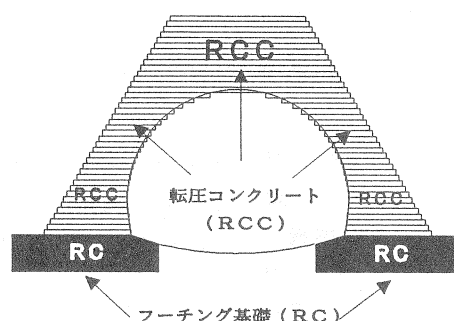


図-2 RCCカルバートの形状

リートに引張応力がほとんど発生しないことが判明した。また、フーチング部については、下面部に引張応力が発生するため、RC（鉄筋コンクリート）によるフーチング基礎が必要なことがわかった。

2.2 本工法の特徴

(1) 鉄筋や型枠（セントル）が不要

カルバートの主要な構成部材にRCCを使用するため、鉄筋が不要である（フーチング基礎部を除く）。また、カルバート（RCC）の施工と、カルバート内部埋戻しおよびカルバート周辺の盛土を一層毎に同時施工できるため、構造物構築時に従来必要であったセントルが不要である。

(2) 施工性向上と工期短縮・コスト削減

カルバートの施工が盛土と同時施工で行え、さらに鉄筋・型枠が不要であるため、施工性が飛躍的に向上し、急速施工が可能と考えられる。特に、高盛土内のアーチカルバートでは、施工延長が長くなるため、上記のメリットは、さらに大きくなると考えられる。

(3) 従来工法との比較

図-1に示すような形状寸法をもつ従来のアーチカルバートと比較した一例を紹介する。施工条件は、総延長100m、1スパン10m、カルバート内径12m、土被り20mであり、盛土とRCCは一日一層（30cm）の施工スピードと仮定する。この条件下での試算によれば、カルバートの構築を含めた全工期が大幅に短縮され、従来工法の約半分の工期で施工可能となった。また、カルバートの工事費についても、従来工法の約70%となり、かなりのコスト削減が可能である。

2.3 具体的施工方法

具体的な施工方法は、図-3にその手順を示すよう

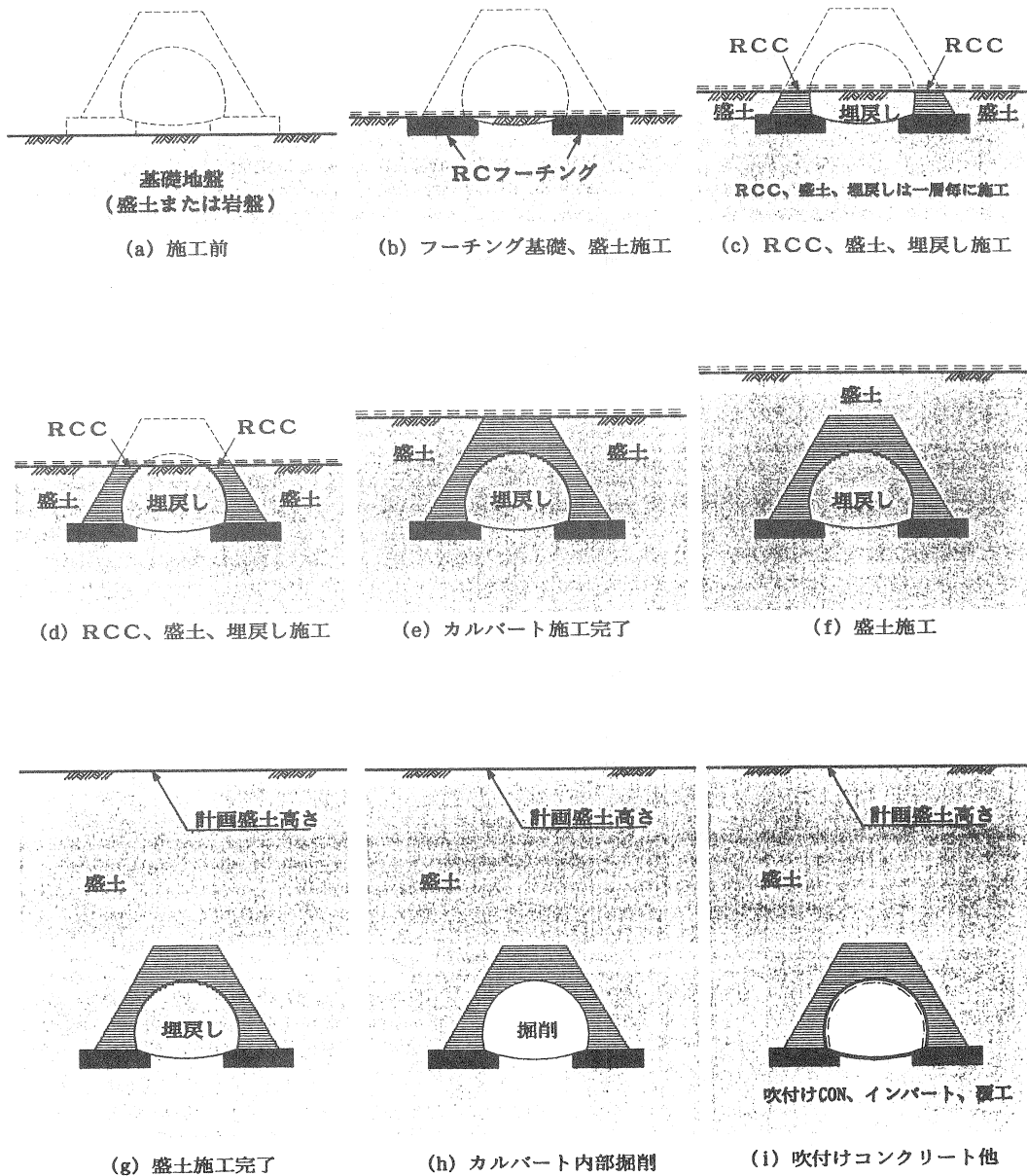


図-3 RCCカルバート工法の施工方法

に、まずRCCのフーチングを施工し、フーチング天端高さまでフーチング周囲の盛土を行う。その後、一層毎にRCCとカルバート内部の埋戻しおよび周辺の盛土をほぼ同時に施工しながら、盛土とカルバート本体を構築していく。RCCの施工は、ブルドーザーあるいはアスファルトフィニッシャーで敷き均し、ローラー（振動ローラー、タイヤローラー）で締固めを行う。こうしてカルバート天端まで盛土とRCCを施工し、カルバート構造物を完成させた後、所定の高さまで盛土を施工する。

その後、カルバート内部を掘削し、カルバート構造物を完成させる。場合によっては、盛土途中で、カルバート内部を掘削することも可能である。掘削後は、RCC部材を保護するため吹付けコンクリートを施工する。その後、フーチング間をインバートで連結してカルバート内部を閉合し、必要に応じて、覆工コンクリートを施工する。

3. 有限要素法による静的変形解析

前述のように、RCCが適用可能であり、かつ経済的なカルバート形状を開発するため、有限要素法による静的変形解析を行って^り、様々な形状のカルバートに発生する応力や変形に関して、繰り返し比較検討を行った。当初、解析は2次元FEM線形弾性解析を使用して、2ステップで行った。ステップ1において、盛土中にカルバートとカルバート内部埋戻し土が既に設置されている状態で初期応力解析を行い、ステップ2において、カルバート内部を掘削する。現在では、解析ステップを増やし、以下の4ステップに施工過程を分けて解析を行っている。

- 【STEP 1】 初期応力解析
(フーチング基礎地盤まで、図-3(a))
- 【STEP 2】 盛土・カルバート・内部埋戻し土施工
(カルバート天端まで、図-3(e))
- 【STEP 3】 盛土(所定の高さまで、図-3(g))
- 【STEP 4】 カルバート内部掘削(図-3(h))

上述の2ステップでの解析と4ステップでの解析結果の違いは、前者の方がカルバート天端に作用する土圧が若干大きくなり、結果としてカルバート内コンクリートの鉛直方向圧縮応力が若干増加すること等であるが、特に前者と後者に大きな違いは見られない。

なお、表-1に使用材料の物性値、また図-4に解析モデルの一例および解析領域を示す。

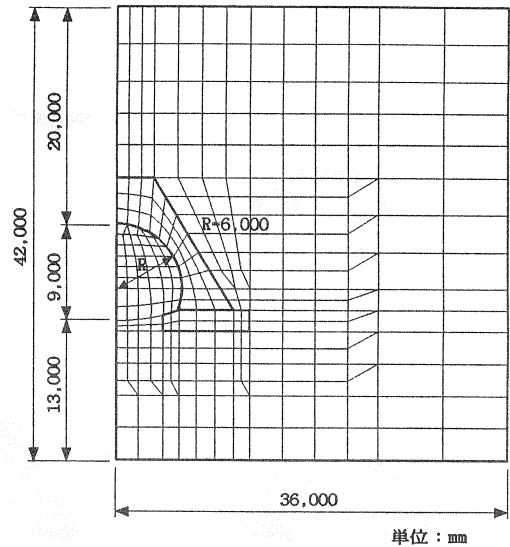


図-4 解析モデルおよび解析領域

表-1 使用材料の物性値

使用材料	盛土	RCC	RC
単位重量 γ (tf/m^3)	1.90	2.35	2.50
変形係数 E (kgf/cm^2)	140	50,000	250,000
ポアソン比 ν	0.3	0.2	0.2
備考	N=20, E=7N	転圧 コンクリート	鉄筋 コンクリート

以上述べた解析条件において、様々なカルバート形状に対するFEM解析を行った結果、内空断面を閉合した従来のカルバート形状に対して、底面部分を解放した門型の形状が良好な結果を示した。この門型の形状は、図-5のように、(a)長方形型、(b)その両肩の角をとった形状、(c)さらに、外側の壁を水平から60°傾斜させた形状に変化させた結果、構造物全体の沈下も少なく、RCCの全ての箇所でもコンクリート応力は圧縮応力となることがわかった。この時、カルバート左右の両脚部下側に引張応力が発生するため、構造物全体の安定と基礎地盤の支持力も考慮して、鉄筋コンクリート(RC)のフーチング基礎とした。

なお、このカルバート形状と構造において、解析により得られたコンクリート応力は図-6のとおりである。

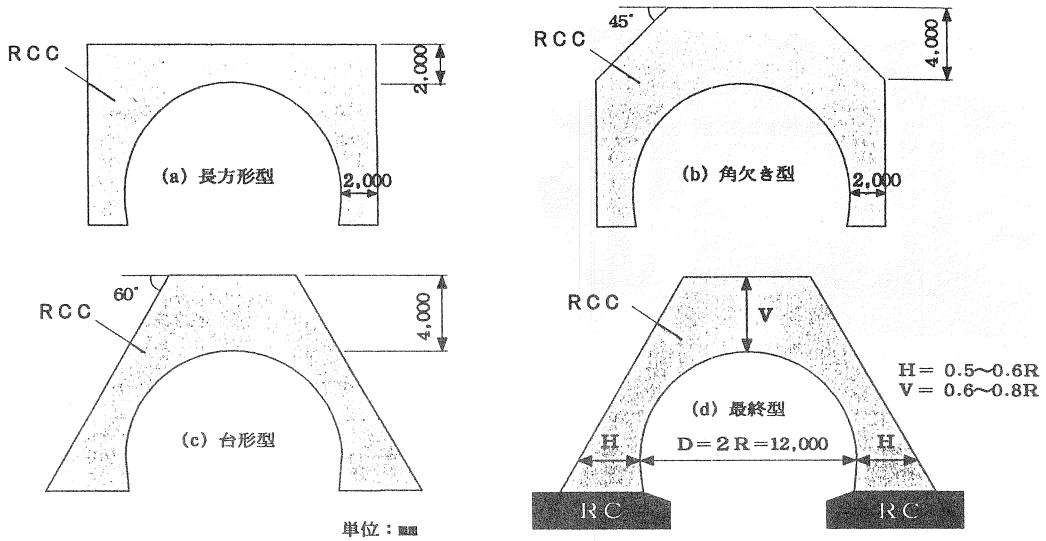


図-5 RCCカルバートの形状

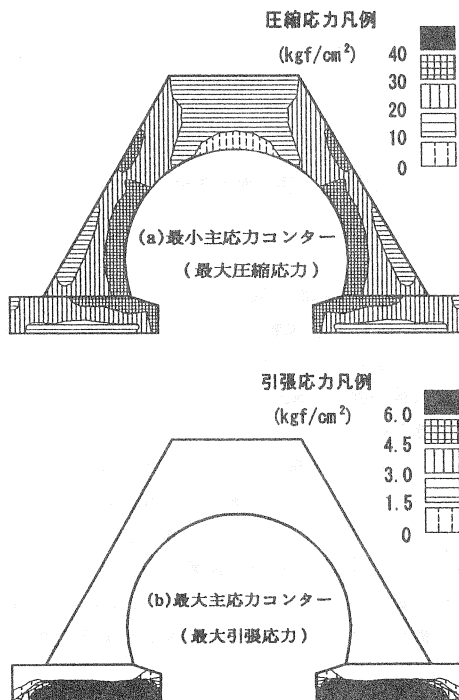


図-6 RCCカルバートに生ずるコンクリート応力
(土被り $h=20\text{m}$ 、カルバート内径 $D=12.0\text{m}$)

4. 大型模型載荷実験²⁾

4. 1 実験の目的

実験の目的は、施工過程を考慮した模型載荷実験を実施することにより、RCCカルバートの定性的・定量的挙動を把握し、実物レベルでのRCCカルバート工法の有効性を検証することにある。

4. 2 実験土槽

実験土槽は、主にH型鋼で組み立てた上下の蓋の周囲をH型鋼の柱で支え、2次元平面ひずみ状態を確保するため、土槽全体の約2/3の高さに剛性の大きなH型鋼（腹起こし）を土槽周囲に配置し、拘束方向への変位を生じないようにした。土槽内面の壁、底、天井は、正面の亚克力部を除いて、メタルフォームで作成した。また、土槽内の壁面は、壁面摩擦を除去するため、グリスを塗布し、その表面に超高分子量ポリエチレンフィルム（30cm × 35cm × 0.13mm）を貼り付けた（写真-1）。

実験土槽の大きさは、図-7に示すように、幅6.0m、高さ3.6m、奥行き1.5mである。

4. 3 実験の実施方法とその手順

模型載荷実験は、屋外に設置した実験土槽の中に、本工法の施工過程を再現しながら、盛土とカルバートをほぼ同時に施工し、カルバートを完成した後、実験



写真-1 実験土槽全景

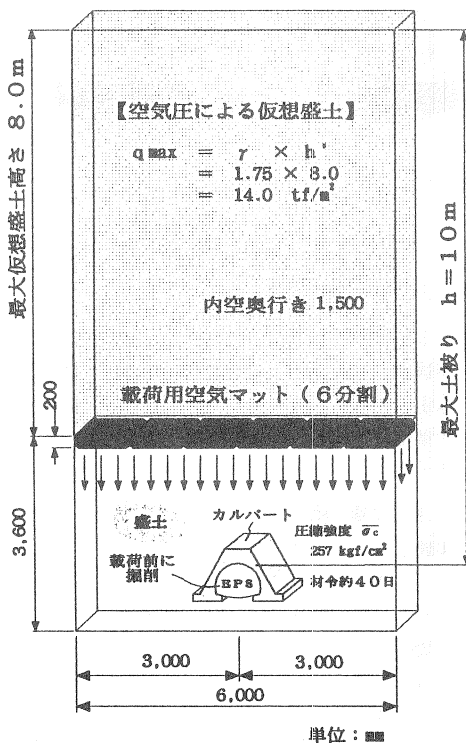


図-7 土槽内空の大きさと載荷方法

土槽上部まで盛土を行った。そして、カルバート内部を掘削した後、図-7に示すように盛土の上部より空気圧による載荷を行った。図-8に、模型載荷実験のフロー図を示す。

今回の模型実験の規模は、土被り $h = 20 \sim 100 \text{ m}$ 、カルバートの内径 $D = 12 \text{ m}$ のカルバートを想定し、その $1/10$ の縮尺となるように決定した。図-3で示した実物の施工方法の説明では、所定の高さまで盛土完了し

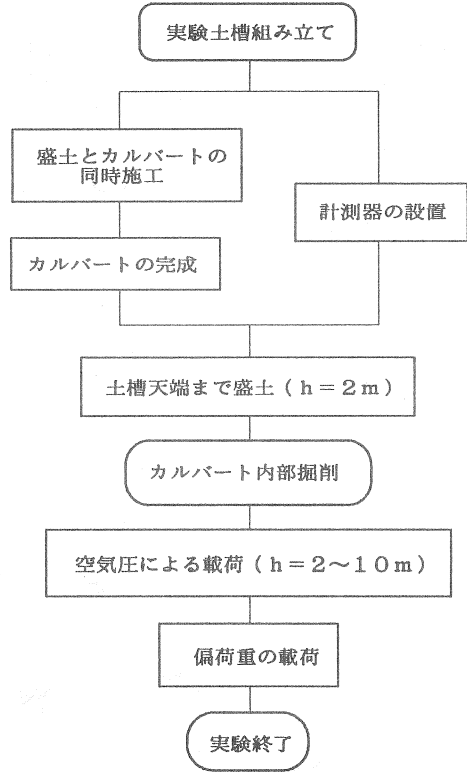


図-8 模型載荷実験フロー図

た後にカルバート内部を掘削する(図-3(h)の状態)としているが、模型実験では、この所定の高さを土被り $h = 2 \text{ m}$ (実物では土被り $h = 20 \text{ m}$ に相当) としており、その後の盛土(載荷)は、カルバート内部を掘削した状態で行っている。

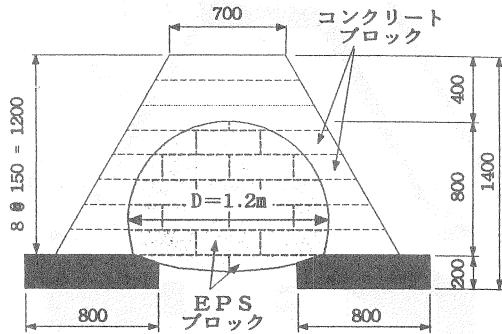
載荷は、等分布荷重だけでなく、偏荷重も作用させることのできるように6分割した土槽上部の空気マットを使用して、空気圧で行った。載荷は、空気圧により最大 14.0 tf/m^2 (土被りに換算して 8 m) とカルバート上部の盛土 2 m を加えて、最大 10 m の土被り(実物では土被り $h = 100 \text{ m}$) に相当する載荷荷重を作用させた。

盛土およびカルバートは、図-10に示すように仕上り厚さ 15 cm 毎に同時に施工した。カルバート周辺の盛土材には、まさ土を使用し、カルバート内部には埋戻し材料として図-9のようにブロック分割したEPSを使用した。また、RCCカルバートのRCC部については、模型カルバートの形状と計測器設置の信

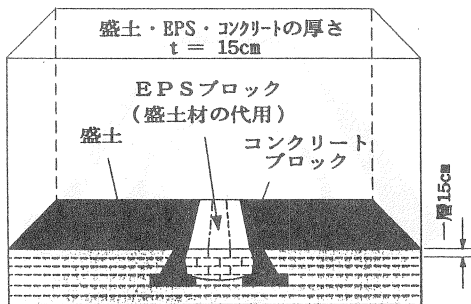
傾性確保のため、RCCの代わりに、RCCカルバートの形状を水平に分割したコンクリートブロックを使用した。このコンクリートブロック間の接合は、モル

タルにより行った。なお、実験時のコンクリートブロックの圧縮強度は、平均で $\sigma_c = 257 \text{ kgf/cm}^2$ であった。

盛土材の転圧は、ビブロプレートを使用し、各層5回転圧で行った。施工後の盛土は、平均湿潤密度 $\rho_t = 1.75 \text{ g/cm}^3$ 、締固め度 $D_c = 80\%$ であった。



図－9 カルバートと内空部（EPS）の分割



図－10 実験土槽内の施工状況図

4. 4 計測の内容

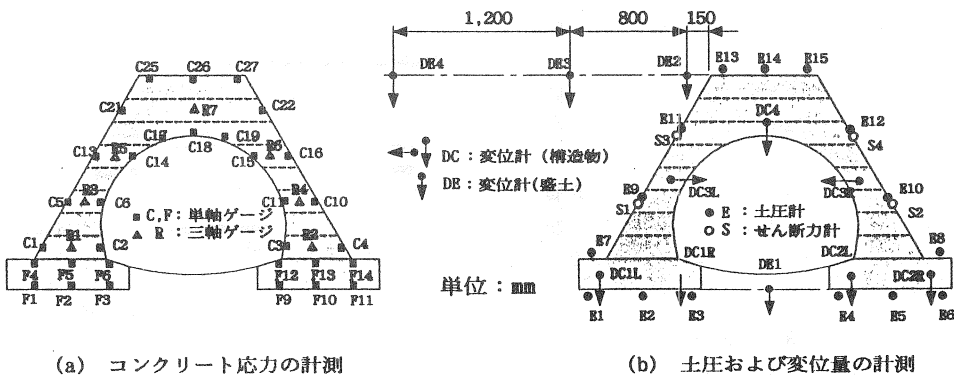
計測は、各施工段階および各載荷ステップにおいて、静的に測定を行った。計測の項目は、土圧・底盤反力、壁面せん断力、コンクリート応力（ひずみ）、変位について行った。図－11に、計測計器の配置図を示す。

4. 5 実験結果

図－12に、計測より得られた土被り $h = 2, 5, 10\text{m}$ に対応する土圧・底盤反力、コンクリート縁応力、変位量の各分布図を示す。これらの図は、盛土上部に等分布荷重を作用させた場合の計測結果であるが、土圧およびコンクリート応力の分布において、左右非対称になっている箇所がある。この現象は、内部掘削あるいは載荷によって、偶然発生した偏土圧により、カルバートが多少左側に偏心し、左側の側壁に受働土圧、右側の側壁に主働土圧が生じた結果、発生したものと考えられる。以下に、各測定項目計測結果の考察を行う。

(1) 底盤反力

底盤反力は、両フーチングとも、土被りが小さい場合は盛土側（外側）の地盤反力が大きく、土被りが増加するにしたがってカルバート内空側（内側）の地盤反力が大きくなる傾向にある。 $h = 10\text{m}$ では、左右各々のフーチングで、中央が一番大きく、両端部の値がほ



図－11 計測項目と計測器の配置

ば等しい左右対称型の地盤反力分布となった。

(2) 土圧、壁面せん断力

カルバート側壁左右の水平土圧は、カルバート内部掘削時（土被り $h=2\text{m}$ ）までは左右の分布形状は対称的であったが、内部掘削後、載荷圧力の増大に伴って、左側の土圧が大きく、右側が小さい結果となった。天端部の鉛直土圧も、カルバート内部掘削時までは、分布形状は左右対称的であったが、内部掘削後、載荷圧力の増大に伴って、左側の鉛直土圧が中央・右側に比較して小さくなった。上述のように、これらの現象は、実験中の偏土圧の影響と考えられる。

また、構造物に作用する鉛直土圧および水平土圧と上載荷重との比、すなわち鉛直土圧係数 α および水平土圧係数 K を各計測位置において計算すると、 $\alpha \approx$ 約 $1.3 \sim 1.4$ 、 $K \approx$ 約 $0.4 \sim 0.5$ となった。

壁面せん断力は、左右ほぼ均等に生じており、鉛直土圧および水平土圧にみられる偏土圧の影響は現れなかった。また、計測結果より計算される土とコンクリートの平均摩擦角は、約 30° となった。

(3) コンクリート応力

コンクリート応力の分布図における符号は、 $-$ が圧縮応力である。図より、各土被りにおいて、カルバート R C C 部のほぼすべての箇所のコンクリート応力が圧縮応力となっているのがわかる。 $h=2, 5, 10\text{m}$ と土被りが増大するにしたがって、コンクリート応力は圧縮応力のみが増加する。

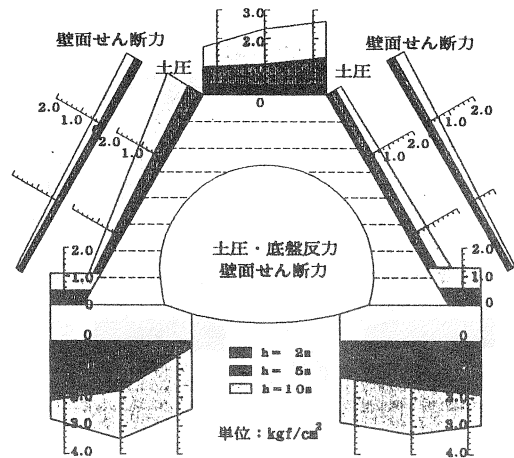
カルバート R C C 部の外側縁では、どの箇所においても、載荷圧力の増大に伴ってコンクリート応力は圧縮応力のみが増加する。内側縁も同様に、天端部を除いて、載荷圧力の増大に伴ってコンクリート応力は圧縮応力のみが増加する。天端部内空側については、載荷圧力の増大にもかかわらず、ほとんど応力は発生していない。

フーチング部については、上面のコンクリート応力が圧縮応力、下面が引張応力として生じているが、下面の引張応力はわずかである。

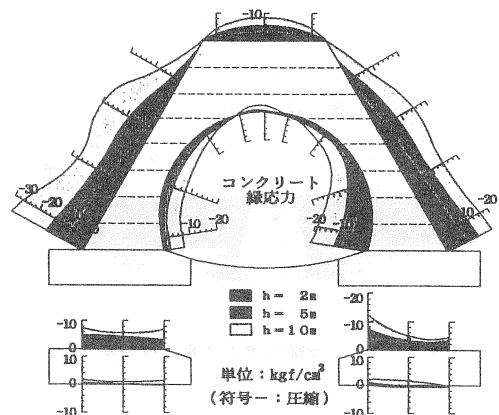
上述の偏土圧によるコンクリート応力への影響としては、カルバート R C C 部の側壁部において、左側壁および右側壁とも、それぞれ左側縁のコンクリート圧縮応力が大きくなっていることに現れている。

(4) カルバート、盛土の変位量

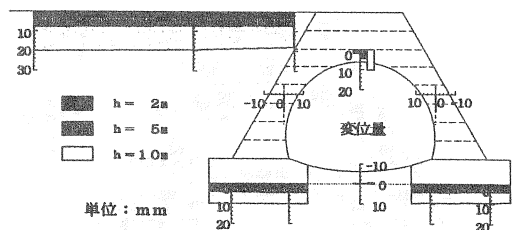
カルバートの変位は、盛土、掘削、載荷という過程で、カルバート全体が一様に沈下する傾向となっている。水平方向の変位は、掘削時、僅かに 1mm 以下の



(a) 土圧・底盤反力・壁面せん断力分布図



(b) コンクリート応力分布図



(c) カルバート・盛土の変位量分布図

図-12 模型載荷実験の計測結果

変位が内空断面の縮小方向に生じてから以降は、載荷圧力の増大にもかかわらず、水平変位は生じていない。また、各フーチングの沈下は、カルバート全体の沈下傾向と同様に、ほぼ様な沈下傾向を示すが、両フーチングとも内空側の沈下がわずかに大きい結果となっている。

カルバート天端高さにおける盛土の沈下量は、カルバート近傍の測定位置における沈下量が他の測定個所に比べて僅かに小さい傾向にあるが、各測定位置の沈下量とも、ほぼ同じ値となっている。

（５） 実験結果のまとめ

今回の模型載荷実験により、次のことが明らかになった。

- 1) 土被りを増加させても、カルバートRCC部のコンクリートには引張応力は発生せず、圧縮応力のみが増加した。
- 2) 土被りを増加しても、カルバートRCC部の天端部内空側には、コンクリート応力はほとんど発生しなかった。
- 3) フーチング下面部には引張応力が発生するが、引張応力の値は僅かであった。
- 4) 実験中の偏土圧によっても、カルバートRCC部のコンクリートには引張応力が発生せず、偏土圧の影響としては、左側壁および右側壁のそれぞれ左側縁コンクリートの圧縮応力が増加した他は特に変化がなかった。

4. 6 実験結果とFEM解析との比較

今回の模型実験と同じ大きさのモデルを使用して、実験の各施工過程を再現した2次元FEM線形弾性解析を行い、計測結果と比較した。表-2に、解析に用いた各材料の物性値を示す。なお、盛土材およびコンクリートの物性値は、それぞれ三軸圧縮試験、コンクリート弾性係数試験結果より得たものである。

表-2 模型載荷実験用 FEM解析物性値

使用材料	EPS	盛土	コンクリート
単位重量 γ (tf/m^3)	0.02	1.75	2.11
変形係数 E (kgf/cm^2)	60	60(120)	240,000
ポアソン比 ν	0.1	0.3	0.22
備考	発泡スチロール 土木工法 技術資料 ³⁾	三軸圧縮 試験(UU)	コンクリート 弾性係数 試験

図-13に計測値とFEM解析値とを比較した結果を示す。図中の破線は、各土被りにおけるFEM解析の結果である。

以下に、各計測項目の実験値との比較による考察を述べる。

（１）底盤反力の比較

フーチング底盤反力は、分布形状においては、実験値と異なり、実験値が凹型であるのに対し、FEM値が凸型の分布形状となっている。また、実験値では、両フーチングとも、土被りが小さい場合は盛土側（外側）の地盤反力が大きく、土被りが増加するにしたがってカルバート内空側（内側）の地盤反力が大きくなる傾向にあるが、FEM値ではその傾向は見られない。

この違いの原因は、前者においては盛土材料を連続した線形弾性体と仮定しているFEMの解析上の問題から生じたと考えられる。後者においては、カルバート内部埋戻し材料のEPSと盛土の締固め条件が、実験と解析において異なるために生じたものと考えられる。すなわち、実験では盛土材には締固めは行われるが、EPSでは行われないうえに、最初は盛土側の地盤反力が大きい偏圧となり、載荷がカルバート上部に進行するに従って、偏圧は修正されて内側の地盤反力が大きくなる結果となっている。

したがって、上述の結果を考慮すると、実際の施工では、基礎地盤が砂質地盤であれば、底盤反力は盛土およびカルバートの施工の進捗に伴って、フーチング下面においてほぼ均一に生じるものと考えられる。

底盤反力の値（平均）については、実験値の方が多少大きく、実験値/FEM値=1.2~1.3となっている。

（２）土圧・壁面せん断力の比較

まずカルバート天端部上面の鉛直土圧は、偏土圧の影響により分布形状が異なるが、値（平均）は、ほぼ等しい。カルバート側壁部の水平土圧は、鉛直土圧と同様に、偏土圧の影響により分布形状が異なるとともに、値は実験値の方がかなり小さく、実験値/FEM値=0.6~0.7である。左右フーチングの盛土側（外側）の上部に作用する土圧の値は、実験値の方がかなり大きく、実験値/FEM値=1.4~1.7である。またカルバート側壁部の壁面せん断力は、分布形状も等しく、値もほぼ同じである。

以上の比較結果から偏土圧の影響を除外してまわると、天端部鉛直土圧および側壁部壁面せん断力は、FEM解析で得られた結果とほぼ一致する。しかし、側壁部水平土圧はFEM値より小さく、左右フーチン

グ盛土側（外側）上部に作用する土圧については、FEMより大きな結果となっている。この違いの原因として、後者については、盛土材料を連続した線形弾性体と仮定しているFEMの解析上の問題から違いが生じたと考えられるが、前者については原因を特定できなかった。

そのため、各測定値の整合性をチェックするため、カルバート天端やフーチング上部に作用する鉛直土圧実測値および水平土圧と壁面せん断力の鉛直方向成分実測値およびカルバートの死荷重を合計した総鉛直力と、実験値の底盤反力を比較した。その結果、総鉛直力の実測値は底盤反力実測値の約80～90%になったことから、側壁部水平土圧は実際の値より小さく測定されたものと考えられる。

以上の結果から、カルバートに作用する外力は偏土圧の影響をのぞけば、FEM解析値とほぼ同じになると考えられる。

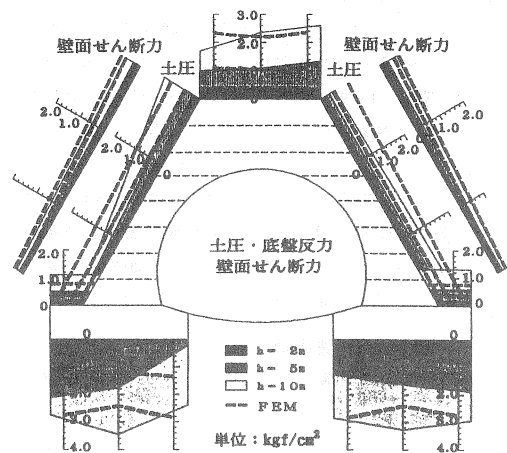
(3) コンクリート応力の比較

コンクリート応力の実験値は、FEM解析結果と比較すると、比較的一致するところもあれば、大きく異なる箇所もある。

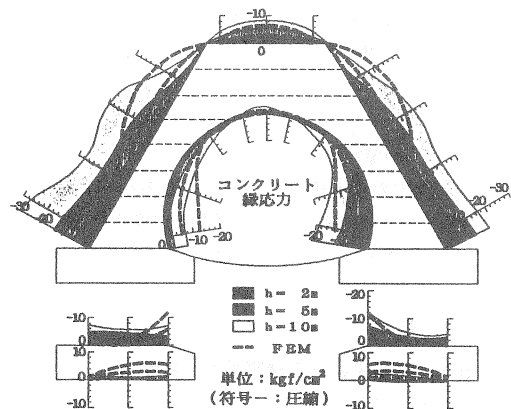
実測結果との違いを考察する前に、実験中の偏土圧の影響により生ずるカルバートのコンクリート応力を考慮に入れる必要がある。偏土圧によるコンクリート応力の変化は、偏土圧がカルバートを左側に偏心させるように働いているため、その結果として、左側壁および右側壁のそれぞれ左側縁のコンクリート圧縮応力が大きくなっていると考えられる。

この偏土圧によるコンクリート応力への影響を除いて、FEM解析結果と比較した場合、特に大きく異なるのが、側壁下部外側縁およびフーチング下面のコンクリート応力である。側壁下部外側縁のコンクリート応力は、FEM解析では載荷圧力の増大にもかかわらず、ほとんど応力が発生していないが、実測結果では圧縮応力がかなり発生している。また、フーチング下面部のコンクリート応力は、引張応力が作用しているもののFEM解析結果と比較するとごく僅かの値となっている。

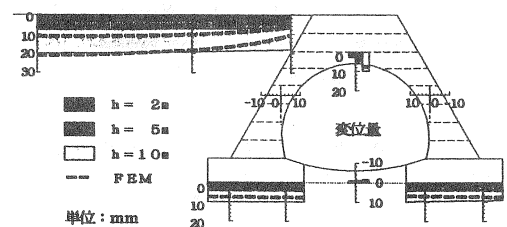
前者の現象は、掘削により掘削部下側周辺の盛土材の変形係数が低下したために、計算上生ずる側壁部内側への圧縮応力の集中が側壁部外側へ分散したものと考えられる。FEM解析では、この盛土材の変形係数の低下を考慮していないことが上述の要因になっていると考えられる。後者の現象については、上述の要因に加えて、底盤反力の項で説明したように、盛土材を



(a) 土圧・底盤反力・壁面せん断力比較図



(b) コンクリート応力比較図



(c) カルバート・盛土の変位量比較図

図-13 実験結果とFEM解析結果の比較図

連続した線形弾性体と仮定していることに起因していると考えられる。

（４）カルバート、盛土の変位量の比較

カルバート全体および盛土の沈下量、またカルバート側壁部の水平変位量については、ほぼ実験値とFEM解析値が一致している。FEM解析値と異なるのは、カルバート近傍での盛土の沈下量の分布形状であるが、この現象も、盛土材の解析上の仮定から生ずる結果と考えられる。

（５）FEM解析結果との比較まとめ

以上、各測定項目について、解析結果との比較および考察を行ったが、実験過程で生じた偏土圧の影響を考慮すれば、概ねその傾向は一致していると考えられる。

本工法はカルバートの主要な構成部材であるRCC（転圧コンクリート）に引張応力が働かないことが前提条件となっている。この点においては、計測値および解析値ともに、カルバートRCC部のコンクリートは、ほぼすべての箇所において圧縮応力として作用する良好な結果を得た。

5. フーチング基礎の不同沈下に対する対策

これまで述べてきたFEMによる数値解析や大型模型実験では、フーチング基礎の不同沈下が生じないような基礎地盤が存在することを前提にしている。このことは、従来のアーチカルバートでも同様であり、基礎地盤の傾斜等による不同沈下が生じないことがアーチカルバートの採用条件となっている。したがって、不同沈下という問題に関しては、従来工法と条件は同じである。

しかしながら、実際の施工になれば、基礎地盤の傾斜や基礎地盤の支持能力の違いなどのより、左右のフーチング基礎に不同沈下が生じることも想定しておく必要がある。フーチング基礎に不同沈下が多少、発生してもカルバート構造物として、安全性が損なわれることのないようにする必要がある。

現在、この不同沈下に対して、さらに安全性を向上させるための対策として、RCC部とフーチング基礎部の境界に、盛土材あるいは砂といった材料を用いた薄層の緩衝層を設けることを考案している。現在、その効果の検証を行なった結果、極端な支持条件の違う場合を除いて、ある程度の不同沈下に効果を発揮することがわかっているが、この緩衝層の効果の詳細については、また別の機会に報告したい。

6. おわりに

本論文で提案したRCCカルバート工法は、今後、増大すると思われる高速道路等の高盛土内アーチカルバートに代わる新しい工法であり、従来のカルバートの構築方法に比べて、施工性、安全性、経済性、工期など、ほとんど全ての点において優れていることがわかっていく。

従来のアーチカルバートは、カルバートの施工が盛土施工も含めた全体工程のネックとなることや、また建設コスト上昇の一因になっていること等の問題点を抱えていた。これらの問題は、本工法を用いることによって容易に解決することができると考えられる。また現在や将来の建設労働者・技術者の不足を考慮すると、施工の省力化・機械化、また安全性・快適性の向上は、建設業にとって必要不可欠であり、そういった観点からも本工法は有効であると考えられる。

さらに、本工法は高盛土カルバートとしての用途以外にも、長大切土斜面の道路において用いれば、ロックシェルターとしての機能に加え、押さえ盛土としての効果も期待できる。また長大切土斜面の景観美化にも有効となる。

これまで述べたように、本工法はFEMによる数値解析の検討¹⁾に加えて、大型模型載荷実験を実施し、施工過程を考慮した本工法の定性的・定量的挙動を把握することにより、さらにその有効性を検証した²⁾。さらに現在、カルバートの大きさ、土被り、盛土材・基礎地盤等の材質など、前述の不同沈下の問題も含めて、各種施工条件に対する解析を実施し、基礎資料を蓄えている。しかしながら、本工法はまだ完成された工法ではなく、今後はより実証的な現場での試験工事を行うことによって、本工法の具体的な施工方法を確立することが必要であると考えている。

参考文献

- 1) 西垣 誠・草地三陽・山本浩史（1994）：「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
- 2) 西垣 誠・草地三陽・森田壽一・山本浩史・松田義則（1995）：「RCCカルバート工法の模型載荷実験結果とその検証」、第30回土質工学研究発表会、pp. 1957-1960
- 3) 発泡スチロール土木工法開発機構：発泡スチロール土木工法技術資料 材料マニュアル