

大断面コルゲートカルバートの 施工時挙動に関する模型実験

Model tests on mechanical and buckling of long span corrugated steel culvert

土門 剛¹・問屋淳二²・西村和夫³

Tsuyoshi DOMON, Jyunji TOIYA and Kazuo NISHIMURA

The use of long span corrugated steel culverts has increased since its construction is rapid and the quality of steel sheets for steel culvert has increased as compared with those of concrete culvert cast-in place. A series of model tests were carried out on model long span corrugated steel culvert in order to study the full-scale introduction of this culvert construction method. The experimental results indicated that thrust force on sheets increases remarkably during the stage of soil filling and the stability of the culverts against the buckling during construction should be checked.

Key Words : corrugated culvert, buckling, reinforcement member, model test

1. はじめに

本研究が対象とするコルゲートカルバートは、波付けした薄肉の鋼材（コルゲート）を円形あるいは楕円形に加工して組み立てた構造物である。基床に設置後、埋め戻すことによって施工される（図-1）。これまでは比較的小断面の管路などに使用されるケースが主流であったが、米国では大断面道路トンネルなどの大規模な構造物に対しても適用され、そのスパンが10mを超える例も多数報告されている。本構造物の適用が予想される箇所では、通常鉄筋コンクリート製矩形カルバートの施工が多いが、作業性、矩形であるがゆえの曲げに対する脆弱性、経済性などから比較すると本工法は有利な点が多く、安全性が確認できればかなりの箇所での適用が期待できる構造物である。しかし、日本においての施工例はまだ少なく、大断面コルゲートカルバートの本格的導入のために様々な角度からの調査や検討の段階にある。

アメリカでの施工例を見ると、コルゲートカルバートの補強部材としてリングビーム（H型鋼）が知られているが、この作用効果はまだ解明されていない。北海道で行われた実物大模型を使用した埋設実験¹⁾により、補強部材の作用効果を調査したが、実物大模型は十分に安全側へ設計されており、補強部材の作用効果が明確に断面力や変形に現れていない。もちろん再現性も得られておらず、作用効果が現れたとしても信頼性に乏しい。また、実際の現場ではもう一つの補強部材として知られるスラストビームも用いられているが、作

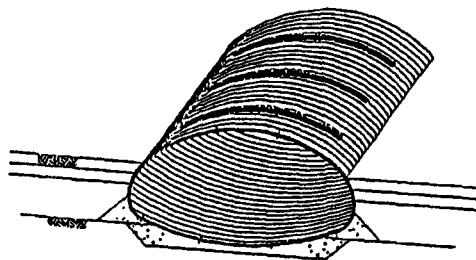


図-1 コルゲートカルバート概略図

キーワード：コルゲートカルバート，座屈，補強部材，模型実験

¹正会員 首都大学東京 研究員 都市環境学部都市基盤環境コース

² コルゲート・ライナー技術協会

³正会員 首都大学東京 教授 都市環境学部都市基盤環境コース

用効果の有無については明らかにされていない。

そこで、実験室規模で座屈検証も可能なように、意図的に危険側に設計した模型を作成し、二種類の補強部材としてのリングビームおよびスラストビームの有無でそれぞれ埋設実験を再現性が得られるまで実施した。

本研究は、リングビームとスラストビームの有無および補強のないケースを含む3つのケースで模型実験を行い、その結果について力学的な観点から考察を加えるものである。

2. 模型実験の概要

(1) 実験目的

実験室規模で、リングビームおよびスラストビームの有無によって補強部材の作用効果を明確に調べることが主な目的とし、最終的には、コルゲートカルバートの設計・施工に係る資料に供することを意図している。

また、本研究では埋設終了後に地山モデル上面に荷重を満載することによって、座屈に対する安定性も調べる。そこで、埋設時の挙動を追跡し、実規模埋設実験などの既往のデータ²⁾と比較することで、模型がコルゲートカルバートとしての特徴を有しているか、つまり、模型の妥当性の有無についての検証も行う。

(2) 実験モデルの考え方

カルバート模型において、その寸法決定の基準は、埋設時には座屈破壊に至ることがないことに加え、埋設終了後に荷重を少し载荷すると座屈破壊することが理想である。そこで、骨組構造解析ソフトを使用し、断面力を試算した。座屈判定には一般的に知られている鉛直等分布荷重を受ける放物線アーチの弾性座屈荷重式を用いた。しかし、あくまで試算であり、埋設をシミュレートできない骨組構造解析では埋設段階では実際の値と隔たりがあるが、ここでは、簡便であることから採用した。なお、試算においては埋設時の曲げ破壊については検討していない。

将来的には、骨組構造解析はその簡便さからコルゲートカルバートの設計に用いられることが予想される。そこで、ここで試算した結果と実験結果とを照合し検討を加えることにより、設計指針等の作成の際の資料になると思われる。

a) 応力度計算

本実験で採用した寸法での応力度計算の結果を示す。模型形状は北海道で行われた実規模埋設実験(以下、北海道モデル)と同型の(4つの円弧から形作られる)楕円形でスケールをその30分の1とした。模型の材料には危険側の設計となるように考慮して、板厚0.2mmの純アルミ板を採用し、波付けは施さなかった。また、地山材料には取り扱いが簡便で再現性の得やすいアルミ棒を使用している。

各模型の諸元を表-1に示す。また、模型寸法を図-2に示す。図-3には解析における埋設完了時(土被り

表-1 構造物(カルバート)/地山模型の諸元

構造物の 形状・寸法	楕円形モデル	
	スパン 215.3mm	
	ライズ 124.0mm	
構造物の 材料・物性	板厚0.2mmの純アルミ	
	降伏応力 81N/mm ²	
	弾性係数 7.03E+07kN/m ²	
地山の 材料・物性	アルミ棒 比率f 1.6mm:f 3.0mm=3:2	
	単位体積重量 21.4kN/m ³ (実験値)	
	内部摩擦角 30°(実験値)	
	側方土圧係数 0.5(内部摩擦角より算定)	
	地盤ばね係数	法線方向 6.875E+06kN/m ³
		接線方向 2.292E+06kN/m ³
		※平板載荷試験より算定

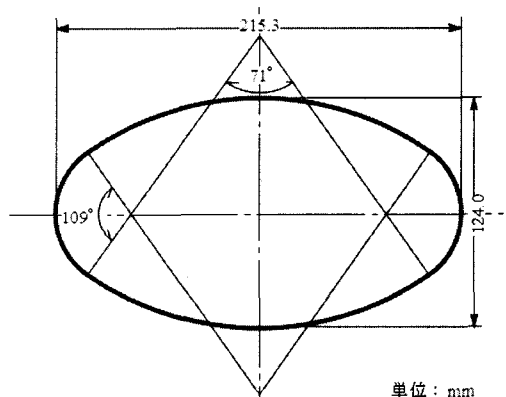


図-2 カルバート模型の寸法

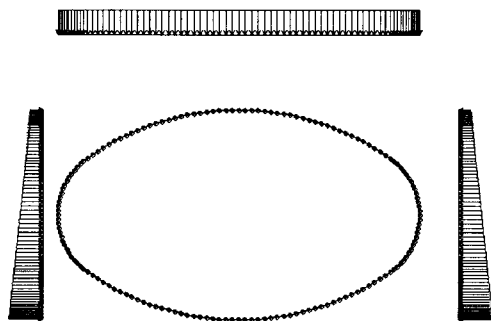


図-3 埋設完了時の荷重状態

表-2 上載荷重と最大軸応力

土被り	上載荷重 (kN/m)	最大値	
		軸応力 (N/m ²)	σ/σ_y
70mm	なし	1.15	0.014
	0.5	1.53	0.019
	1.0	1.91	0.024
	1.5	2.29	0.028
	2.0	2.68	0.033
	2.5	3.06	0.038
	3.0	3.44	0.043
	3.5	3.83	0.047
	4.0	4.21	0.052
	5.0	4.98	0.061
	6.0	5.75	0.071

70mm)の荷重状態を示す。

以上の条件で計算した軸応力の最大値を荷重条件とともに表-2に示す。なお、いずれのケースでも肩部で軸応力が最大となることが計算結果により確かめられている。したがって、肩部での座屈が問題になることが予想される。しかし、一般に曲率が大きくかつ地盤反力をうけやすいなどの理由から肩部では座屈は起こらず、むしろ頂部に近いところで座屈することが知られている。そこで次項の座屈判定では、肩部ではなく頂部を含む上半での座屈を考える。軸応力の分布が肩部と頂部で大きく値が変わらないことなどから大きな問題はないと考えられる。

b) 座屈判定

前項で述べたように以下で行う座屈判定は曲率の変化点で分けられる4つのブロックのうち、ブロック1(上半アーチ部)で考えることにする(図-4)。

したがって、スパンライズ比 f および細長比 λ は次のようになる。

$$f = h/L = 0.158 \quad (1)$$

$$\lambda = L/i = 3125 \quad (2)$$

ここで、 $i = \sqrt{I/A}$ で、 I : 断面二次モーメント、 A : 断面積 である。

放物線アーチの座屈荷重を算定するにあたり、放物線アーチの水平限界耐力を次式で算定する³⁾。

$$H_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{\gamma (k_H L)^2} \quad (3)$$

ここで、 k_H は有効座屈長さ係数、 γ は $\gamma = \sqrt{1 + 4(f/L)^2}$ で表される。これをアーチの断面積で除したものが限界応力 σ_{cr} となる。 f/L が小さい(概ね0.2以下)時、境界条件がヒンジの場合は k_H が1.0～1.15、固定の場合は0.68～0.78となるが、ここではそれぞれ1.0および0.7として計算する。 σ_{cr} を σ_y で除すと次式のようになり、この関係は図-5のようになる。

$$\sigma_{cr} / \sigma_y = \frac{\pi^2 E}{\gamma (k_H \lambda)^2 \sigma_y} \quad (4)$$

図-5から、上半アーチ部脚部が固定支持の座屈荷重は2ヒンジ支持に比べて、2倍ほどの耐力があることがわかる。一方、コルゲートカルバートは閉合した構造であるため、両者の中間ぐらいの座屈荷重が期待で

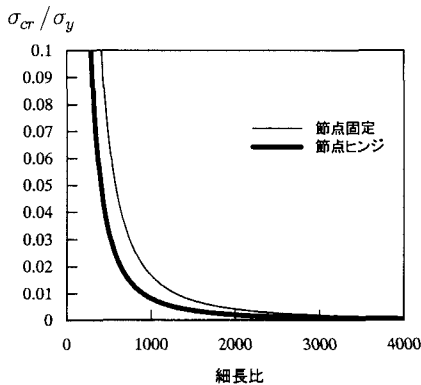


図-5 鉛直等分布荷重を受ける
アーチの理論座屈荷重

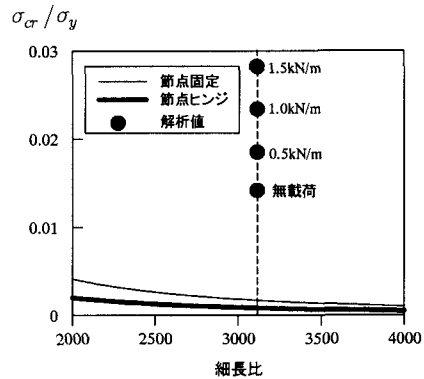


図-6 座屈判定

きる。しかし、これらは鉛直荷重が等分布であると仮定した場合の理論解であり、地盤中に埋設された状態での座屈荷重とは大きな隔たりがある。先に行われた鉛を用いた二次元土槽実験⁴⁾では座屈の現象を確認することができなかったが、等分布荷重を仮定した限界応力の理論解の5倍程度の荷重までの耐力を確認している。地盤の変形抑制効果が見かけ上の細長比を小さくする効果を持ち、限界応力を飛躍的に高める働きをすることが予見できる。

図-6は図-5のグラフの細長比3125付近を拡大したグラフに、表-2で示した解析結果をプロットしたものである。上半アーチ脚部の節点がヒンジ支持と固定支持の平均の値をコルゲートカルバートの理論座屈荷重とすると無載荷の状態でその理論座屈荷重の10倍程度の応力が作用していることがわかる。これだけでは判定しがたいが、前述の二次元土槽実験で確認できなかった理論座屈荷重の5倍以上の荷重下での座屈に対する安定性があるものと判断し、本寸法を採用するに至った。

(3) 実験方法

a) 構造物モデル

本実験で用いるカルバートの構造物モデルは、北海道モデル(スパン6460mm・ライズ3719mm)の30分の1でスパン215.3mm・ライズ124.0mmとする。また、モデルはアルミ棒の長さとし、奥行きは100mmとした。材質は危険側の設計となるよう鋼材に比べ強度の小さい純アルミを採用し、波付けを施さなかった。降伏応力度は材料メーカーによると81N/mm²、弾性係数は70.3e+07kN/mm²である。

本研究の主な目的の一つに補強材の作用効果の確認がある。そこで2種の補強材の組み合わせで考えられる4パターン(表-3)で実験を行い、各補強材単体での作用効果および相互作用について調べる。

b) リングビームおよびスラストビームモデル

実験モデルでの構造物本体の曲げ剛性とリングビームの曲げ合成の比を北海道モデルでのそれと等しくなるようにした。すなわち、下式を満たす。

$$\frac{EI_{Rm}}{EI_{Cm}} = \frac{EI_{Rp}}{EI_{Cp}} = 1.32 \quad (5)$$

ただし、添字Rはリングビーム、Cは構造物、mは模型実験、pは実大実験(北海道モデル)を表す。

リングビームモデルにはアクリルの板(市販の下敷き)を使用した。各材料定数は与えられていなかったため、アクリルの板の曲げ合成は、片持ち梁にしたアクリルの板の自由端に集中荷重を載荷してたわみを計測し、次式により算定した。

表-3 補強部材添付パターン

パターン	リング ビーム	スラスト ビーム
1	無	無
2	有	無
3	有	有
4	無	有

$$EI = \frac{F\ell^3}{3\delta} \quad (6)$$

ここに、 F は荷重、 ℓ は腕の長さ、 δ はたわみを示す。

表-4にたわみ試験結果を示す。

模型の寸法と既知の弾性係数より構造物の曲げ剛性 EI_{cm} はわかっており、式(6)からリングビームが所要の曲げ合成 EI_{rm} を与えるには幅を約80mmに調節すればよいことがわかる。そこで、ひずみゲージの貼付位置を避け、写真-1のように40mmを2枚、弾性接着材で貼付した。

スラストビームは、現場ではコンクリートをピン支持で載せているだけでカルバート本体の剛性には影響がない。実験模型では発泡スチロールを加工したものを両面テープで中心部分だけを接着した。また、軸方向の中心では貼付されているひずみゲージへの影響を避けるため分割しているが、アルミ棒による二次元実験なので影響はないと考えた。

c) 地山モデル

地山モデルには、直径1.6mmと直径3.0mmの長さ100mmのアルミ棒を重量比3:2で混合したものを使用した。なお、単位体積重量は21.4kN/m³、内部摩擦角は30°である。

前述した骨組構造解析で必要となる側方土圧係数の値はヤーキーの式から0.5と概算した。また、同じく骨組構造解析で必要となる地盤ばね係数は簡易な平板載荷試験を行うことで法線方向の値を6.875kN/mm³と求め、接線方向の値はその3分の1の値と仮定した。

d) 基床

現場では構造物の沈下などに対する安定のため、強度の大きい採石などを使用した基床の上に構造物を設置する。模型埋設実験においては、模型の軽さから沈下は起こらないと予測できるが、逆に地山モデルの構造物下方へのもぐりこみから浮き上がりなどが心配される。これに対する対策として模型底部の曲率と合致した発泡スチロールを基床に見立てた。

(4) 計測方法

a) 計測項目および計測位置

計測項目は構造物モデルに生じる断面力と変形の測定の2項目である。断面力の測定は図-7に示すように、構造物模型の20箇所に裏表2枚ずつひずみゲージを貼付して行った。変形の測定はひずみゲージと同様の位置に貼付した評点を高解像度ビデオカメラで撮影することで行う。

b) 計測時期

コルゲートカルバートの施工は構造物を基床に設置後、天端までは左右交互に、頂部からは左右一斉に埋設と締め固めを繰り返すことによって施工する。模型埋設実験でもこれに従い、埋設を行う。当研究室で行われてきたアルミ棒の地山を用いた実験では、締め固めは板をアルミ棒地山に等間隔に差し込むことで行ってきた。しかし、本実験では構造物模型が

表-4 たわみ試験結果

荷重 F	42.0 gf
腕の長さ ℓ	150 mm
たわみ d	22.4 mm
EI (幅180mmあたり)	2.06E-05 kN・m ²

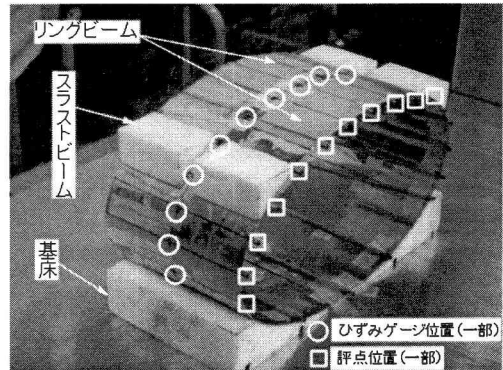


写真-1 埋設前のカルバート模型

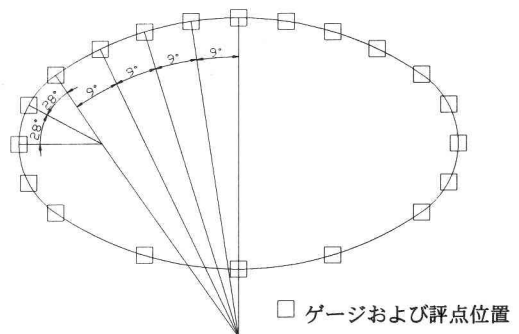


図-7 計測位置

表-5 埋設ステップ数とその位置

ステップ数	埋設完了位置
0	埋設前
6	側部
12	肩部
18	天端部
25	埋設完了(土被り70mm)

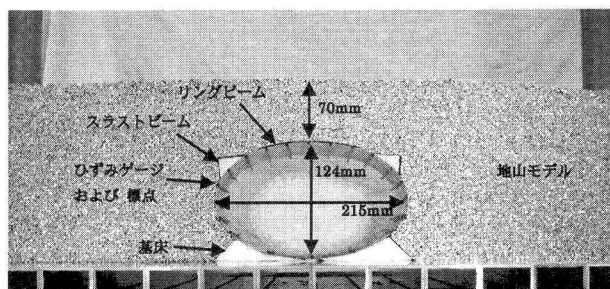


写真-2 埋設後のカルバート模型

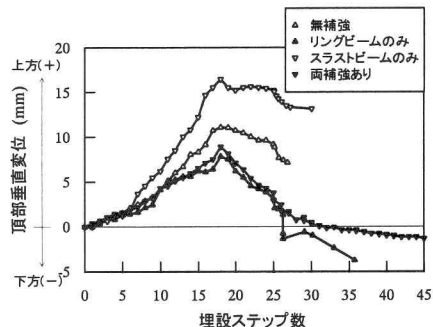
極めて危険側に設計されていることから、締め固めは手でならず程度にした。アルミ棒の特性からこれでも十分に締め固めされ、単位体積重量にも差がでないことを確かめている。巻き立て厚さは北海道における実験の300mmに対して、模型縮尺と同じ30分の1の10mmとした。

埋設ステップを表-5に、また、埋設完了時の様子を写真-2に示す。

3. 模型実験結果および考察

(1) 頂部変位と破壊形態

図-8に示すように、無補強のモデルでは、埋設により頂部の上方変位が進み、埋設が頂部上40mmに達した時点で、扁平になってしまった肩部で土圧により曲げ座屈を生じたことが確認された。この破壊形態は当初想定されていたが、先の実験では実規模で行われていたこと、また、破壊を目的としたものではなかったことなどから実証はできなかった。本実験では、危険側に設計したモデルを使うことで初めて実証できた。加えて、リングビームを有するケースでは、変形抑制効果が卓越していることを実証することができた。



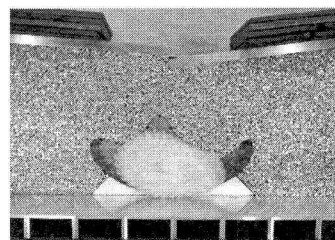
※ 25～45までは埋設完了後の載荷実験で、1ステップ1.0kN/m²を載荷

図-8 埋設過程における頂部の垂直変位

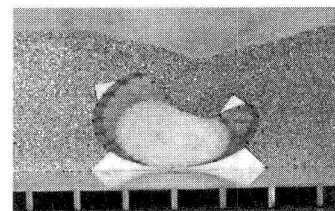
さらにこれを詳細にみると、無補強およびスラストビームのみ有するモデルでは破壊まで上方に変位し続けたのに対し、リングビームを有する両モデルでは頂部まで埋設が進んだ時点でピークをとり、その後は下方に変位し続けて、埋設完了時には元の位置付近まで戻っている。この挙動は、コルゲートカルバートという構造物にとって理想的である。埋設完了時の断面形状が埋設前の断面形状に近づいて曲げ応力が減少すること、同時に構造物に圧縮軸力が卓越して耐力を発揮することを意味すると考えられる。

なお、無補強およびスラストビームのみのモデルでは、埋設完了後の上載圧載荷実験において、わずかの上載圧で写真-3(a)および(b)のように、頂部から肩部にかけて崩壊した。

次項で論じるように、曲げ応力は必ずしもゼロに向かうわけではない。全体的な形状は埋設前の形状に近づくが、完全に同じ形状に戻るわけではなく、局所的な曲げ応力は存在する。なお、無補強モデルでは、破壊時(ステップ22)まで変形が進行していることが確認され、リングビームのみを有するモデルでは埋設完了時(ステップ25)には埋設前(ステップ0)の断面形状に近づいていることが確認されている。しかし、埋設前(ステップ0)と埋設完了時(ステップ25)の形状が一致していない所があり、これが曲げ応力の残留の根拠と考えられる。



(a) 無補強



(b) スラストビームのみ

写真-3 載荷直後の破壊形態

(2) 断面力（曲げ応力および軸応力）の変化

埋設過程におけるカルパート部材に発生する曲げ応力および軸応力をそれぞれ図-10および図-11に示す。また両図の(a), (b)および(c)はそれぞれ頂部、右肩部および右側部における断面力である。

まず、曲げ応力については、頂部および右肩部では2つのモードに二分されていることがわかる。すなわち、リングビームを有しない無補強およびスラストビームのみのモデルと、リングビームを有するリングビームのみのモデルおよび両補強を有するモデルの2通りである。前者においては、(a), (b)それぞれ正曲げと負曲げが埋設に伴って顕著に生じている。一方、後者においては、若干の変動があるもののほぼ曲げ応力変化が些少である。このことから、曲げ応力を低減するには、リングビームの設置が非常に効果があると結論できる。ただし、右側部(c)においては、むしろリングビームを有するモデルの正曲げが卓越した結果となった。原因は不明であるが、右側部においては曲率が大いことと、側方からの地盤反力が期待できることから(c)の頂部埋設完了後の荷重は座屈をもたらすような値ではないと推察される。

無補強の場合の右肩部の応力変化を見ると、頂部付近まで埋設が進んでくると応力がマイナス（空洞側に曲げようとする方向）に転じている。一方、リングビームを有するモデルでは、曲率が増加する方向に曲げ応力が増大し、頂部まで埋設後は減少していく。リングビームの影響が明確な違いとなって現れている。右側部はピークの値はリングビームの有無で違いは小さいものの、無補強では応力の絶対値が減少している。

次に軸応力の差について考察する。頂部においてはリングビームを有するモデルではほとんど軸応力が発生していない。ただし、同様のモデルでも右肩部や右側部になると、その値は曲げ応力のレベルに対して小さいが、埋設に応じて軸応力が負すなわち圧縮側となり、特に埋設ステップ25以降の上載圧載荷を行うと軸応力の増加が顕著となる。この挙動は、リングビームを有しない2つのモデルとは大きく異なる。

以上より、リングビームを有するモデルでは、頂部埋設時前までは、曲げ応力および軸応力ともにゆるやかに増加するが、頂部の埋設以降の上載圧載荷段階においては曲げ応力が反転し、軸応力は増加に転じる。

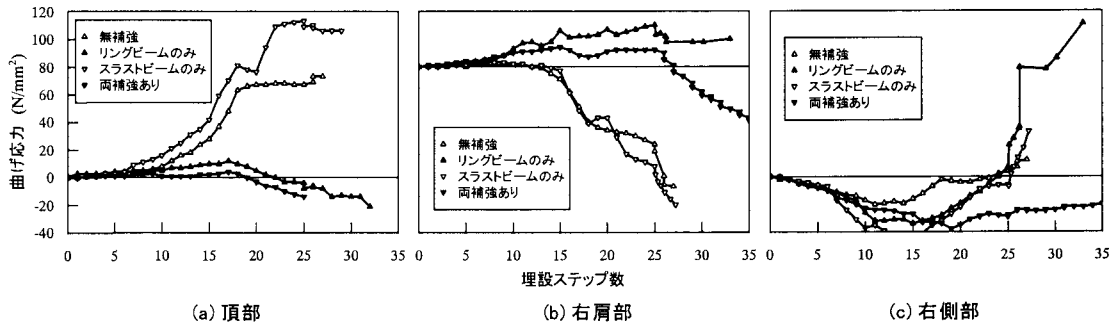


図-10 埋設過程における発生曲げ応力

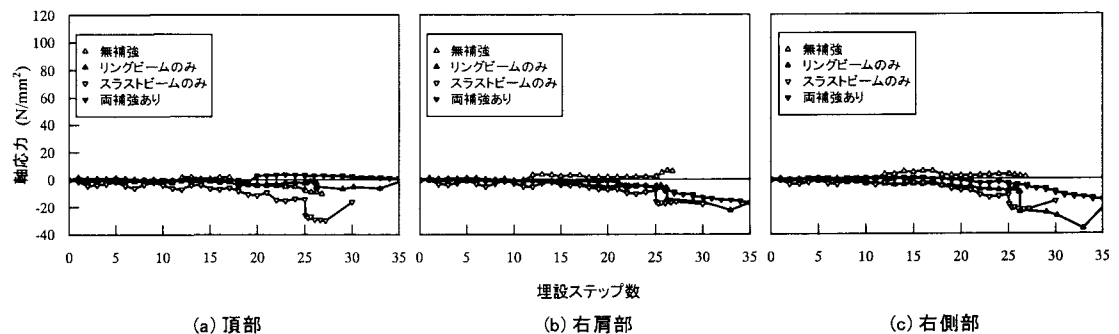


図-11 埋設過程における発生軸応力

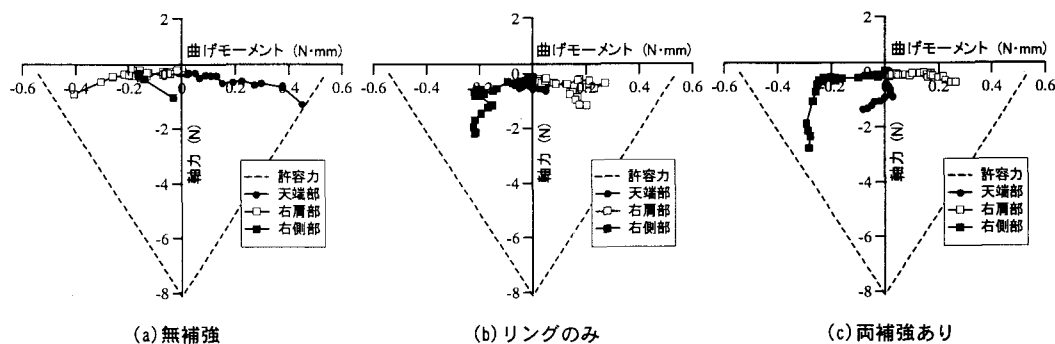


図-12 M-N 曲線

(3) M-N 曲線

以上に述べた結果をM-N曲線との関係で表示すると図-12のようになる。

無補強のケース(a)では軸力の発生はほとんどなく、埋設にともなって曲げ変形が増加する傾向がわかる。その反面、ケース(b)および(c)ではリングビームの補強効果で、頂部の曲げモーメントの発生が抑制され、軸力卓越型のモデルに変化して安全側の挙動になっていることがわかる。

また、リングビームを有する(b)および(c)について、スラストビームの効果を考察すると、これまでの結果と上図からほとんど差がないと見なせる。すなわち、スラストビームは力学的な効果をもたらすものではなく、実務においてカルバート肩部での埋設作業がやりやすくなることから、作業性の改善に効果があるものと思われる。

4. おわりに

コルゲートカルバートの補強部材のうち、力学的にはリングビームの変形抑制効果が卓越することが確認できた。特に、無補強やスラストビームでは破壊に至ったものの、リングビームを有する2つのモデルで破壊に至らなかった。このことは想定されてはいたものの、本研究のように目に見える形でリングビームの変形抑制効果を確認したのは初めての例となった。また、モデルの妥当性の確認をすることも目的であったが、リングビームを有するモデルの変形性状、曲げ応力、軸応力のすべてについて、本研究では検討できなかったが実規模の埋設実験の傾向と類似していることが確認されている。このことから、本研究におけるモデル化は妥当であったと思われる。

今後、大断面トンネルや地下空洞への適用の実現化のためには、座屈に対する検証を行うにあたって、ここで構築した模型ならびに実験方法により事前に検討することが可能となった。

参 考 文 献

- 1) 西村和夫・永吉哲哉・妹尾義和：大断面コルゲートカルバート工の中規模フィールド実験結果の分析，第57回土木学会年次学術講演会，2002。
- 2) 田村武・西藤潤・永吉哲哉：中規模断面コルゲートカルバートと周辺地盤の相互作用について，第37回地震工学研究発表会，2002。
- 3) 土木学会鋼構造委員会・座屈設計のガイドライン作成小委員会編：座屈設計ガイドライン，1987。
- 4) 田村武・林芳樹・射場茂夫：トンネルアーチの座屈解析，第13回トンネル工学研究発表会，2003。