

# 大断面コルゲートカルバートの施工時および地震時の挙動に関する研究

岩楯 敞広<sup>1</sup>・木村 秀成<sup>2</sup>・車 愛蘭<sup>3</sup>

<sup>1</sup>東京都立大学大学院 工学研究科土木工学専攻 教授  
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail: rock-tak@ecomp.metro-u.ac.jp

<sup>2</sup>日鐵建材工業 (〒135-0042 東京都江東区木場 2-17-12)

E-mail: hkimura@n-kenzai.co.jp

<sup>3</sup>東京都立大学工学研究科土木工学専攻博士課程 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail: cheai@ecomp.metro-u.ac.jp

本研究は、コルゲートカルバートの日本における実用化を図るための基礎資料を得ることを目的に、1/16スケールモデルによる振動台模型実験と解析、実規模相当モデルによるフィールド実験と解析を実施し、阪神・淡路大震災相当の大地震時に対する構造物・地盤の応答特性、構造物に作用する動土圧、構造物ひずみなどを把握するとともに、施工過程の構造物の応答特性や土圧の変化等について検討し、地震時および施工時の安全性について検討・評価したものである。

**Key Words** : *Corrugated Culverts, Field Test, Shaking Table Test, Hanshin-Awaji Earthquake, Seismic Response Analysis*

## 1. はじめに

コルゲートカルバートは、約 30 年前アメリカで開発され、現在上下水道、道路トンネルなど多くの実績がある。

しかし、日本に導入・適用を図るためには、耐震性安定性評価、技術指針の整備など、技術上、克服すべき多くの問題がある。このため、都立大学では、兵庫県南部地震相当の大地震に対するコルゲートカルバートの挙動について、模型振動実験と数値シミュレーション解析<sup>2),3),4)</sup>により検討を進めるとともに、実規模相当のモデルを用いたフィールド実験と数値シミュレーション解析により、施工過程の挙動について、検討を進め、地震時および施工時の安全性評価を行ってきた(写真1)。

## 2. 目的

本研究は、コルゲートカルバートの日本における実用化を図るための基礎資料を得ることを目的に、1/16スケールモデルによる振動台模型実験と解析、実規模モデルによるフィールド実験と解析を実施し、阪神・淡路大震災相当の大地震時に対する構造

物・地盤の応答特性、構造物に作用する動土圧、構造物ひずみなどを把握するとともに、施工過程の構造物の応答特性や土圧の変化等について検討し、地震時および施工時の安全性について検討・評価したものである。



写真1 コルゲートカルバートの施工状況

## 3. 模型振動実験と数値シミュレーション

(1) 実験の概要

乾燥砂(岐阜砂)を用いて、せん断土槽中(縦120cm X 横 80cm X 高さ 100cm)に2層構造の模型地盤(基盤層:20cm 表層:80cm)を作成し、国生・岩楯の相似則(構造物と地盤のせん断剛性比が同じに設定)<sup>1)</sup>を考慮し、実物の 1/16 の塩化ビニール製のコルゲートカルバートモデルを作成した。模型の寸法は、長軸約 65.0 cm, 短軸約 47.5 cm の楕円形に近い構造であり、板厚は約 2 mm であるが、施工時の変形を抑えるため、頂部付近(φ=45° ~ 135°)の板厚を 3mm と 1mm 厚くするとともに、両肩部(φ=45°, 135°)には、スラストビームが取り付けられている。

地盤・構造物の変位、加速度応答、構造物ひずみおよび構造物に作用する動土圧、せん断土圧を調べるため、加速度計 15 個、土圧計 8 個、せん断土圧計 4 個、ひずみ計 18 個、変位計 4 個を用いた(図 3-1)。

振動試験前の埋め戻しによる構造物のひずみや挙動、土圧などを計測し、埋戻し完了時の静的な初期土圧、初期ひずみについて検討した。

正弦波スイープ試験(20gal, 200gal, 2Hz ~ 30Hz)およびランダム波入力試験(Ko-Motion:神戸気象台の観測波形(NS成分):最大振幅は、100%(818gal)50%(414gal), 時間軸を相似則を考慮し 1/15, 1/5, 1/1 の 3 種類として実施し、各入力に対する構造物・地盤の応答特性、動土圧、構造物のひずみについて検討した。

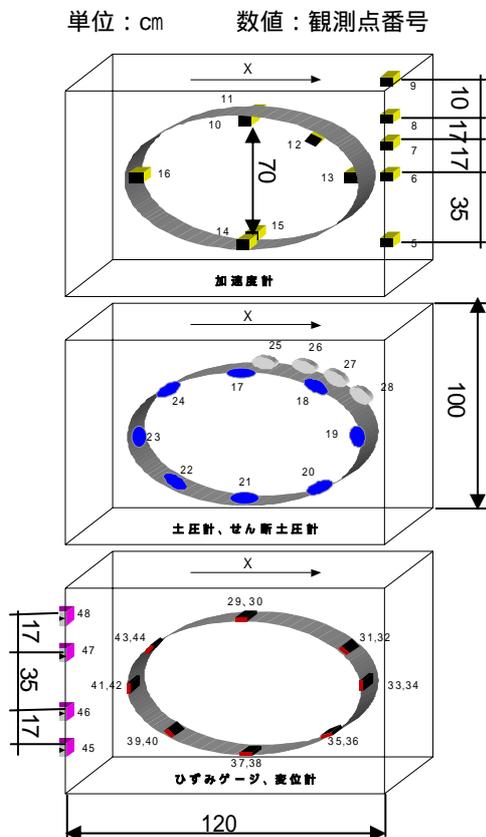


図3-1 実験用センサーの配置

(2) 実験結果

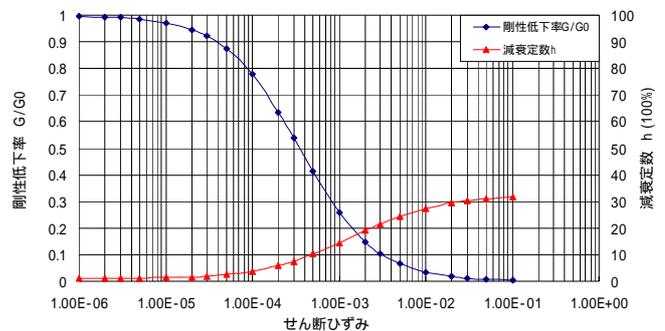
図 3-2 にモデル地盤非線形特性(G/G<sub>0</sub> - 曲線, h - 曲線)を示す<sup>1), 4)</sup>。

図 3-3 にコルゲートカルバートモデルの埋戻し完了時の初期土圧を示す。構造物頂部、側面には、ほぼ土被りに相当する静止土圧が作用しているが、底面には殆ど作用していない。

図 3-4 に正弦波 200gal 入力時のモデルに作用する動土圧分布(直土圧)を示す。分布形状は、静的な初期土圧と異なり左右逆位相となっており、両肩のスラストビーム付近で大きな値を示しているが、底部付近では、殆ど直土圧は生じていない。最大値は、初期土圧に比べて、同程度か若干小さい値となっている。肩のスラストビームに大きな動土圧作用しているが、その分構造物に作用する動土圧は低減する傾向がある。

図 3-5 に正弦波 20gal, 200gal 入力時の地盤、構造物の応答特性(共振曲線)を示す。地盤と構造物の応答特性には位相差はなく、地盤・構造物は一体となって振動している。共振点(応答倍率)は、20gal で、14Hz(5~6 倍), 200gal で 6Hz(1.5~2 倍)となっており、モデル地盤にはかなり強い非線形性が現れている。

図 3-6, 図 3-7 に、構造物の埋め戻し完了時の構造物の初期ひずみ(軸ひずみと曲げひずみ)とランダム波(Ko-motion 1/15, 100%)波入力によるひずみを比較して示す。初期ひずみは、左右対称に分布しており、軸ひずみは構造物全周にほぼ一様(圧縮ひずみ)で、比較的小さい。また、曲げひずみは、両側面(φ=0°, 180°)でかなりの大きな値を示した。一方、地震波入力に対しては、軸ひずみ、曲げひずみとも左右非対称に分布しており、両肩(φ=45°, 135°)付近で最大となった。初期状態(土被り圧)と Ko-motion による地震時のひずみを比較すると、初期状態の方が、若干大きくなっており、神戸波相当の地震入力に対しても、構造物は、破壊に至るような大きなひずみは生じていない。



$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_t}} \quad h = \frac{4}{\pi} \left[ \frac{G}{G_0} \left\{ \frac{\gamma_t}{\gamma} - \left( \frac{\gamma_t}{\gamma} \right)^2 \ln \left( 1 + \frac{\gamma}{\gamma_t} \right) \right\} - \frac{1}{2} \right] + 0.02$$

標準ひずみ : 3.5 × 10<sup>-4</sup>

図 3-2 モデル地盤の非線形特性 (G/G<sub>0</sub> - 曲線, h - 曲線)

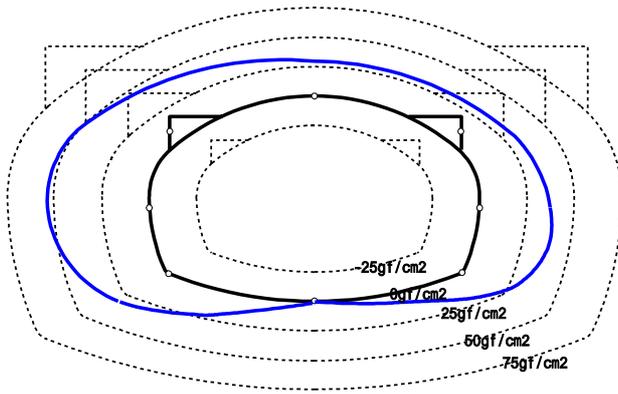


図 3-3 初期土圧の分布

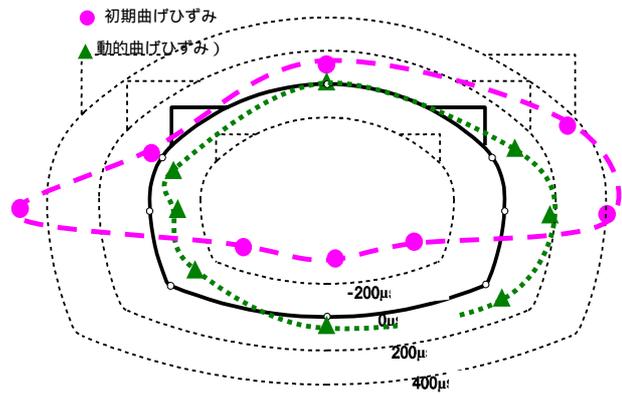


図 3-6 軸ひずみの分布

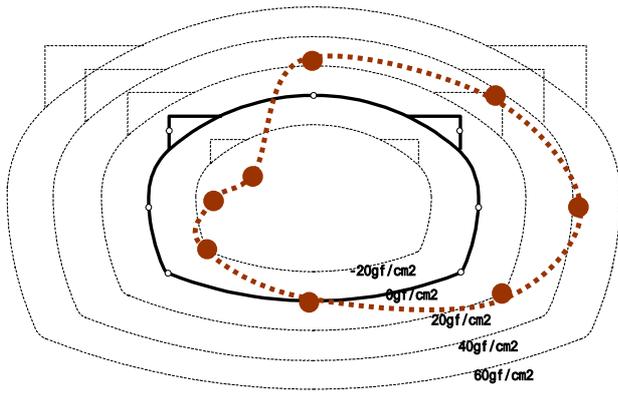


図 3-4 動土圧分布 (神戸波 1/15,100%入力)

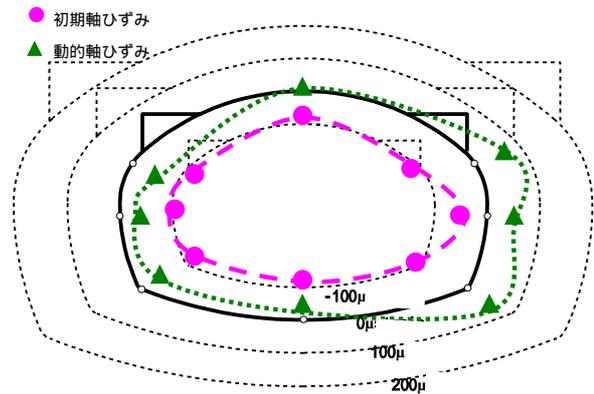


図 3-7 曲げひずみ分布

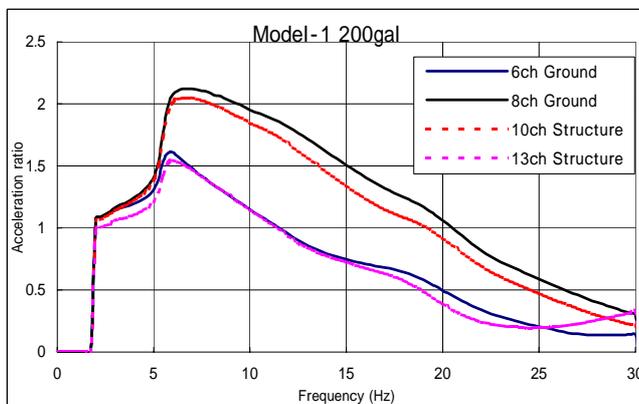
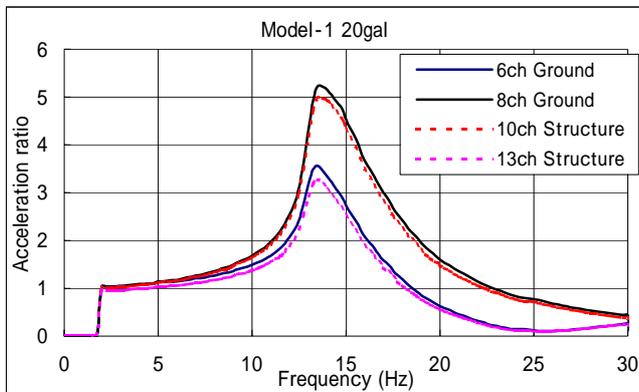


図 3-5 地盤・構造物の共振曲線

### (3) 模型振動実験の数値シミュレーション

2次元動的解析 (Super FLUSH) により正弦波スイープ入力に対する数値シミュレーション (20gal, 200gal) を実施した。地盤の非線形特性は、実験結果を用いて等価線形法により模擬した (図 3-2)。図 3-8, 図 3-9 に、20gal, 200gal 入力時の地盤および構造物の各点の共振曲線の解析値と実験値を比較して示す。また、図 3-10 にランダム波入力 (Ko-motion, 1/15, 50%) による表層地盤および構造物の天端の伝達関数 (天端と基盤の加速度応答スペクトル比) の実測値と解析値を比較して示す。解析値は、実験結果と良い対応を示しており、実験結果を精度良く再現できた。

以上、模型振動実験と解析により、大地震時のコルゲートカルバートの応答特性が明らかとなり、兵庫県南部地震相当の地震入力に対し、地盤の応答は弾性域には留まらず、強い非線形性 (ひずみレベル  $10^{-3}$  相当) を示すが、構造物作用する動土圧また構造物に生じるひずみは、分布形状は異なるが、初期の静止状態の初期土圧、初期ひずみとほぼ同等かそれ以下であり、コルゲートカルバートは、破壊には至っていないことが確認できた。

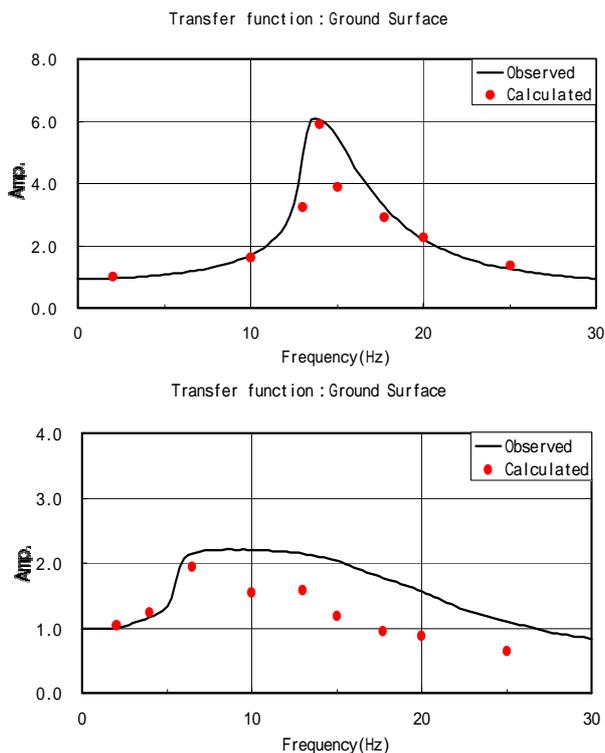


図3-8 地盤・構造物の共振曲線実験値と解析値の比較 (20gal入力)

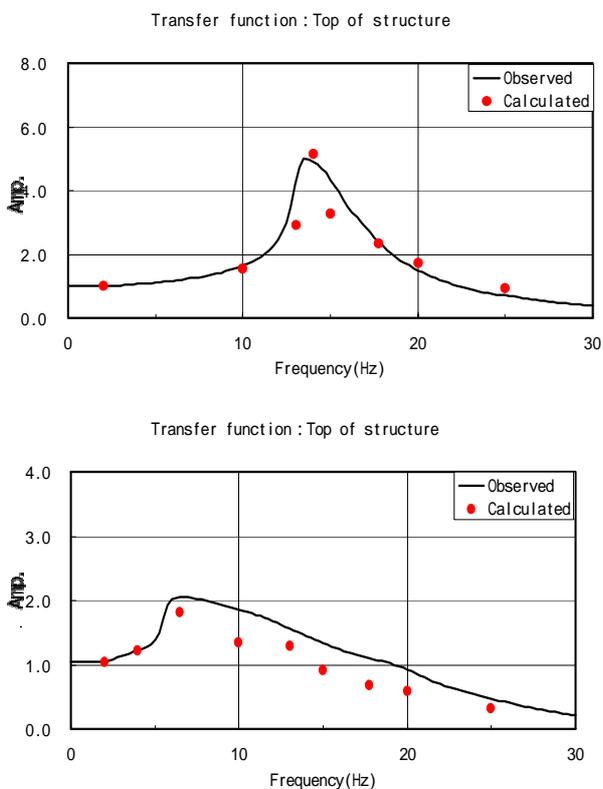


図3-9 地盤・構造物の共振曲線実験値と解析値の比較 (200gal入力)

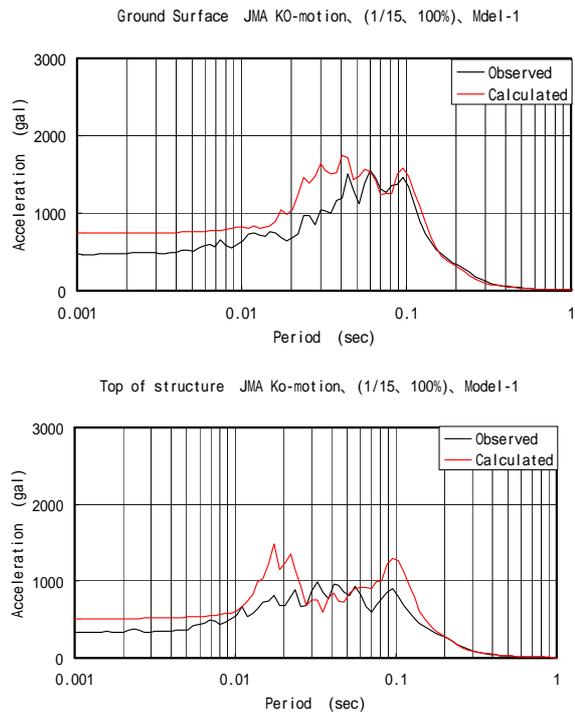


図3-10 ランダム波入力(神戸波1/15, 100%入力)による表層時地盤と構造物天端の伝達関数(加速度応答スペクトル比)の実験値と解析値の比較

#### 4. 実規模モデルによるフィールド実験

##### (1) 実験概要

##### 実験地盤と施工方法

頁岩を支持地盤( $V_s=250\text{m/s}$ )とした実験ヤードを約 60cm 掘削・転圧して基床部を作成し、その中にコルゲートカルバートモデルを組立設置した。裏込め施工は、裏込め材として現地土を用い、1ステップ 200mm の地盤厚さで左右交互に転圧(裏込め施工:1~32 ステップ)し、モデル天端まで埋戻し地盤を作成した。さらに、天端からは、盛土を1ステップ 300mm 厚さで転圧(盛土施工:33~44 ステップ)し埋戻しを行い、地盤を作成した。完成地盤の寸法は、高さ 7m、上底の幅約 11 m、傾斜 1:1.5 の台形状の盛土地盤で、この中に土被り約 4 mで、コルゲートカルバートが埋設されている(写真1)。

コルゲートカルバートモデル:材質はスチールで、寸法はスパン 5897mm×ライズ 3186mm×長さ 2300mm×板厚 4mm の楕円形に近い薄肉構造の構造物である。変形に富む構造なので、施工時の変形を抑えるため、長手方向に対し数m間隔で、スラストビーム・リングビームと呼ばれる補強板を取り付けた。計測は、スラストビーム、リングビームを取り付けた断面(D断面)と取り付けしていない断面(A断面、B断面など)(図 4-1)で行い、その効果について比較検討した。ここでは、D断面に対する検討結果を示す。

計測用センサー

D断面には、計測用センサーとして、変位計 8 個、ひずみ計をコルゲート内面に 7 個、補強リングフランジに 4 個、土圧計をコルゲート外面に 5 個に設置した(図 4-2)。

計測項目

施工過程(44 の各ステップ毎)の土圧、構造物ひずみ、変位の時系列を計測し、構造物に作用する土圧と構造物に発生する軸力、曲げモーメントの経時変化について検討した。

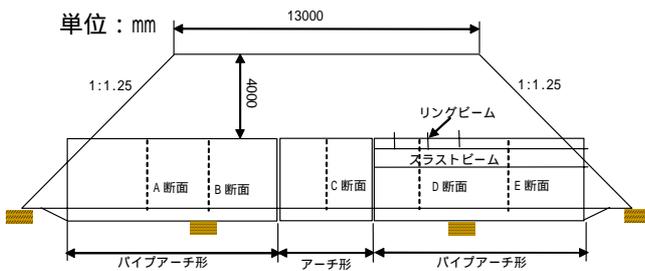


図 4-1 実規模モデルの施工完了図

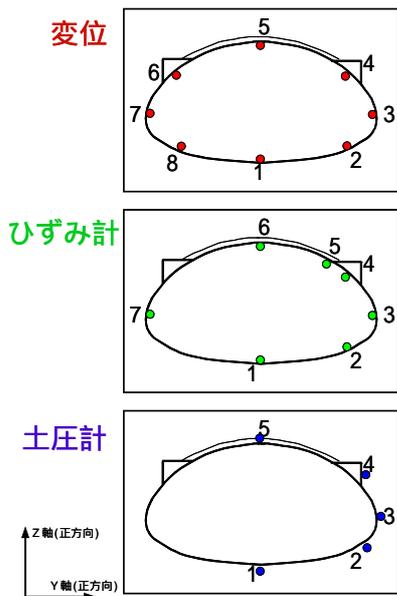


図 4-2 センサーの配置

(2) 実験結果

図 4-3, 図 4-4, 図 4-5, 図 4-6 に、施工過程の構造物天端(測点 5, or 6)の鉛直変位、軸応力、曲げモーメントおよび鉛直土圧の経時変化を示す。

鉛直変位は、裏込め施工過程においては、埋戻しおよび転圧による構造物に作用する水平土圧の増大に伴い上部外側に凸(+)に変形し、ステップ 28(構造物が 90%埋戻された段階)で約 3.6cm(最大)となった。天端までの埋戻し過程(ステップ 32 まで)では、殆ど変化しないが、上部盛土の施工(ス

テップ 33 以降)に入ると、上載荷重の増大に伴い、鉛直土圧の作用により、鉛直変位が急激に減少し、埋め戻し完了時(土被り約 4m, 44 ステップ)には、若干内側(-)に変形している(図 4-3)。

リングビームやスラストビームが無い断面では、変形は、ある断面ある場合より小さくなり、リングビームやスラストビームは裏込め施工時の変位の抑制に効果を発揮することが確認された。

軸力は、裏込め施工過程(ステップ 1~32)では、ほとんど増加しないが、埋戻し過程(ステップ 32~)に入ると、土被りに比例して、圧縮側に増大する傾向が得られた(図 4-4)。

曲げモーメントは、裏込め施工過程では、埋め戻し高さが、ステップ 20 以降(構造物の中央より上)になると急激に増大し、ステップ 32(構造物天端)で最大となる。その後、埋め戻し過程(ステップ 33~)に入ると、鉛直土圧の増大に伴い減少するが、ステップ 36 で、ほぼ一定となり、埋戻し完了時においても構造物天端では、正の曲げモーメントが残存している(図 4-5, 図 4-6)。

この結果、施工過程においては、コルゲートは、変形、曲げモーメントとも、裏込め施工完了時に最大となることがわかった。

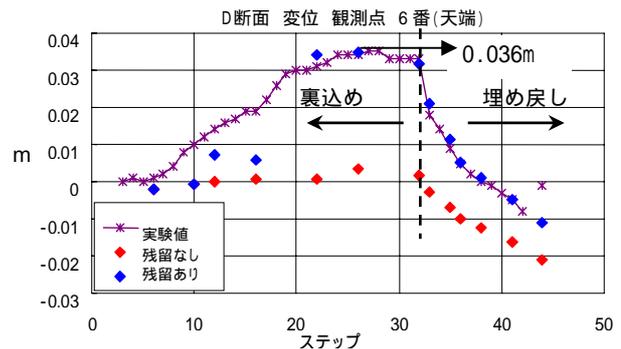


図 4-3 天端でのモデル鉛直変位の経時変化 (実験値と解析値の比較)

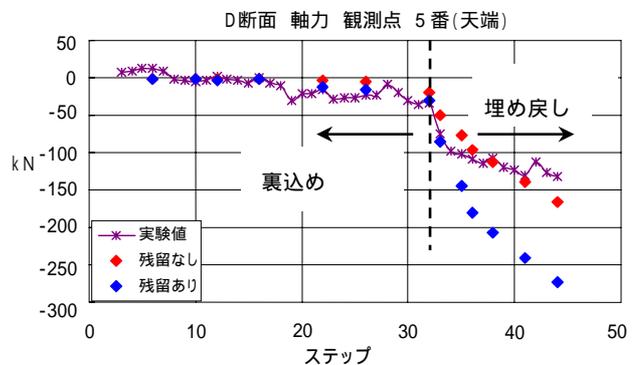


図 4-4 天端でのモデルに発生する軸力の経時変化 (実験値と解析値の比較)

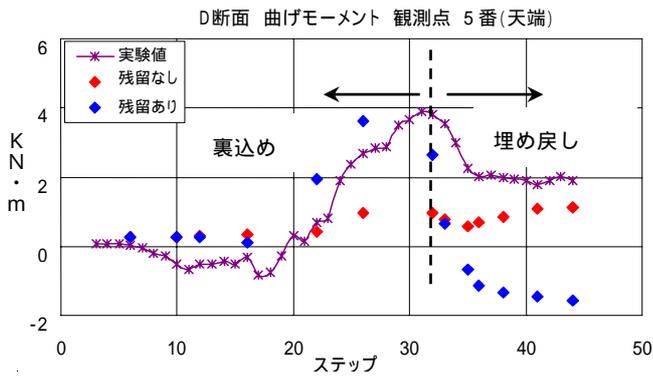


図 4-5 天端でのモデルに発生する曲げモーメント (実験値と解析値の比較)

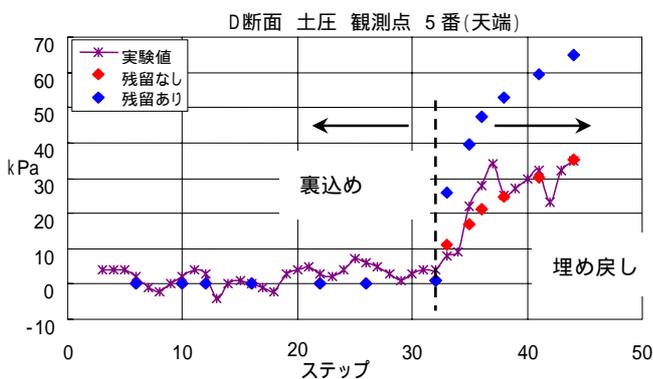


図 4-6 天端に作用する鉛直土圧の経時変化 (実験値と解析値の比較)

## 5. フィールド実験の数値シミュレーション

コルゲートカルバーとの施工時の応答特性および施工後の地震時安定性について、2次元有限要素法解析プログラム「TDAP」を用いて、解析的に検討を行った。

### (1) 地盤 - 構造物連成系の施工過程の応答解析 (静的自重解析)

#### 解析条件

a) 静的解析では、地盤モデルとして、支持基盤 1 層、裏込め部 7 層、被覆 1 層、盛土 6 層計 15 層の平面ひずみ要素モデル(合計約 4000 要素)とした。また、カルバートを梁モデル(約 100 要素)にモデル化した。図 5.1 に、モデル近傍のメッシュ図を示す。

b) 地盤物性は、現地土質試験結果や締固め程度に基づき設定した。支持基盤の変形係数:  $=300,000\text{kN/m}^2$  で、裏込め材:  $E=15,000\text{kN/m}^2$ 、盛土材:  $E=20,000\text{kN/m}^2$  である。

#### 解析ケースと荷重

a) 本解析では、施工過程を忠実に再現し、施工過

程を 13 ステップに分けて、ステップ毎の盛土の自重による静的解析(残留なし)を実施し、構造物の変形、軸力、曲げモーメントおよび土圧を計算し実験値と比較した。

b) さらに、裏込め施工時の転圧に伴う側面の水平土圧の増加(約 2 倍)を考慮した場合(残留あり)を追加し検討を行った。

#### 解析結果

a) 天端の鉛直変位、軸力、曲げモーメント、土圧の計算値を実験値と比較して、前章の図 4.3 ~ 図 4.6 に示す。b) 計算値と実験値の一致度は良いとはいえないが、傾向的には対応していると考える。特に、鉛直変位、埋め戻し過程における転圧の影響を強く受けており、これによる側面の土圧増加を考慮した場合(残留あり)には、両者の一致度にかかなりの向上がみられた。

b) 図 5.2、図 5.3 に、施工完了時におけるモデルに発生する軸力と曲げモーメントを示す。施工完了時の分布形状は、軸力、曲げモーメント両方とも、ほぼ左右対称で応力集中は見られない。曲げモーメントの値は、裏込め施工完了時の約 1/2 に低下した。軸力の値は、埋め戻し完了時で、最大-280kN となった。

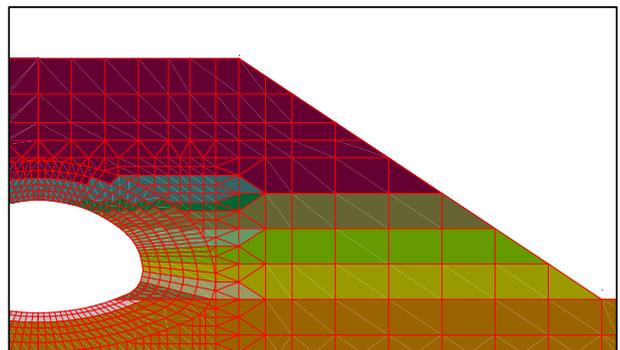


図 5-1 モデル近傍のメッシュ

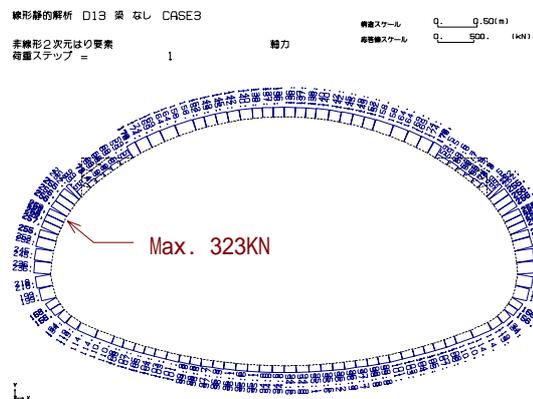


図 5-2 施工完了時の軸力分布図

線形静的解析 D13 梁 なし CASE3  
 手続形2次元はり要素 1 曲げモーメント  
 荷重ステップ = 1  
 縦軸スケール  $Q_x = 0.50(m)$   
 横軸スケール  $Q_y = 5.0 (KN.m)$

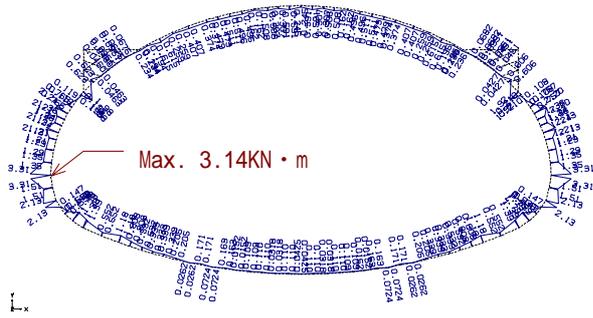


図5-3 施工完了時の曲げモーメント分布図

## 6. 地盤 - 構造物連成系の地震時応答解析 (動的解析)

### (1) 解析条件

施工完成後のコルゲートカルバートの大地震時の応答特性を評価するため、2次元時刻歴応答解析(TDAP)を用いて地盤・構造物連成系モデルによる動的解析を実施した。

#### a) 解析モデル

盛土部およびコルゲートカルバートは、静的解析の場合と同じである。ただし、支持基盤の厚さを30mとし、その下に基盤層( $V_s=400m/s$ )を想定し、固定境界とした。構造物の中心から両側45m位置に水平ローラの側方境界を設けた(図5-4)。

地盤の材料物性に関しては、静的解析と同様、現地土質試験に基づいて設定した。ただし、地盤物性の非線形特性については土質試験データがないため、過去の研究成果や文献などを参照し対応するものを数種類選んで設定した。ここでは、実験モデルの解析と同様、図3-2に示す近似曲線を用いて、1次元自由地盤の等価線解析を実施し、地盤全域の収束物性値を求め、2次元解析に適用した。

b) 入力波：L2地震動を想定し神戸地震波(Ko-Motion, 1/1, 100%) (最大水平加速度：818gal)を基盤から入力した。

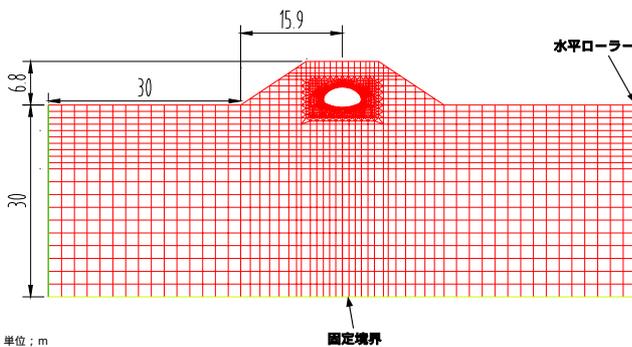


図6-1 地盤-構造物解析モデル

### (2) 解析結果

(a) 図6-2, 図6-3, 図6-4に、神戸波入力( $2E=818gal$ )による構造物の加速度、軸力と曲げモーメントの分布図である。

構造物周辺の最大加速度は、約300galに低下し、非線形性の影響が現れている。また、軸力および曲げモーメントの分布をみると、静的の場合と異なり1次モード(Cos分布)を示し  $\pm 45^\circ$  と  $\pm 135^\circ$  方向で大きな値(符号は逆転)を示した。しかし、最大値は、軸力( $N = 58.2kN$ )、曲げモーメント( $M = 7.75kN \cdot m$ )となり、地盤の非線形の影響により施工過程の値より、軸力で1/6に減少、また、曲げモーメントは、施工過程の最大値(32ステップ)とほぼ同等の値を示した。

本解析結果から、周辺地盤が崩壊するなどして偏土圧が作用しなければ、阪神・淡路大震災相当の地震力に対しても、コルゲートカルバートは、破壊に至らないことを確認した。

動的解析 D13 梁 なし G変化  
 応答加速度 時刻 = 5.359 sec (Tx) (Ty) (Tz)  
 縦軸スケール  $Q_x = 0.50(m)$   
 横軸スケール  $Q_y = 2.0 (m/sec^2)$

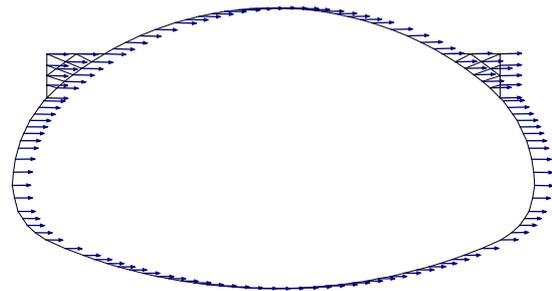


図6-2 神戸波入力による加速度分布

動的解析 D13 梁 なし G変化  
 手続形2次元はり要素 時刻 = 5.359 sec  
 縦軸スケール  $Q_x = 0.50(m)$   
 横軸スケール  $Q_y = 100. (kN)$

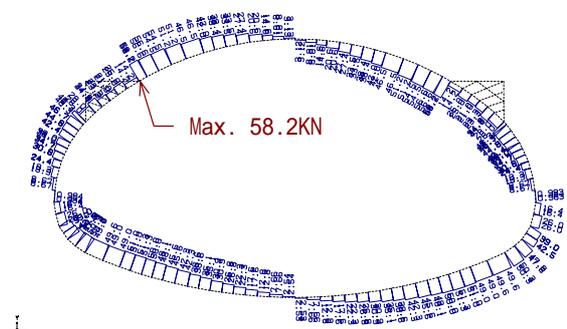


図6-3 神戸波入力による軸力分布

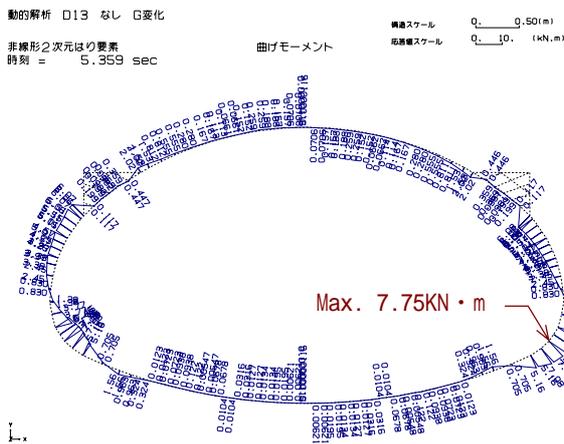


図6-4 神戸波入力による曲げモーメント分布

## 7. まとめ

以下に結果をまとめて示す。

模型振動実験と解析により、阪神大震災相当の地震入力に対して、コルゲートカルバートに作用する動土圧、構造物ひずみは、分布形状は異なるが、その大きさは、初期土圧、初期ひずみ相当であり、構造物は破壊に至っていないことを確認した。また、数値解析結果は、実験結果と良い対応を示し、解析モデル、解析法の妥当性が評価できた。

実規模相当のモデルのフィールド実験と解析により、コルゲートカルバートの施工過程の応答特性や作用土圧を評価した。裏込め施工時に、転圧による側面土圧の増加や曲げモーメントや断面変形が最大となるが、盛土施工時には減少し施工完了時には一定の値となった。これらの値は、許容範囲であり、

施工過程で極端な偏土圧が作用しなければ、安全であることを確認した。L2地震動を想定し、施工完了後のモデルに対し神戸波を入力と構造物の応答、ひずみ等について検討した結果、これらの値は、施工時の曲げモーメントとほぼ同じであり、また、軸力で約1/6となり、周辺地盤が破壊しなければ、阪神大震災相当の地震入力に対しても破壊に至るような挙動を示さない事を確認した。今後、これらの成果をベースとして、設計基準の構築に向け検討を進めたい。

謝辞：本研究は、コルゲートカルバート技術協会との共同研究の一環として実施したものであり、同技術委員会の皆様には多大なご協力を得た。ここに記して、厚く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 国生剛治, 岩楯敬広: 軟弱地盤の非線形震動特性についての模型振動実験と解析, 土木学会論文報告集, 第285号, pp.57~67, 1979.5
- 2) 岩楯敬広, 車愛蘭, 木村秀成, 庭田敏行: 大断面コルゲートカルバートの模型実験と解析, 第37回地盤工学研究発表会, E-14, 894-895, 2002.7
- 3) 岩楯敬広, 車愛蘭, 木村秀成: 地下大断面コルゲートカルバートの模型振動実験と数値シミュレーション解析, 第11回日本地震工学シンポジウム, pp.1179-1184, 平成14年12月
- 4) Takahiro Iwatate, Hidenari Kimura, Ailan Che et al: 'Scaled Model Shaking Tests and Numerical Analyses on Dynamic Response of Embedded Long Span Corrugated Steel Culverts' Structural Dynamics, EURPDYN 2002, p943-948, September, 2002.

(2003.7.1受付)

## DYNAMIC AND STATIC STABILITIES OF EMBEDDED CORRUGATED STEEL CULVERT DURING DUE TO EARTHYQUAKE STRONG MOTION AND EXECUTION PROCESS

TAKAHIRO IWATATE, HITENARI KIMURA, AILAN CHE

In order to clarify the seismic stability of embedded corrugated steel culvert due to strong earthquake motions like the Hyogoken-nanbu Earthquake, the scaled model shaking table tests and its simulation analyses were conducted, and to verify the stability of it during execution, the field tests of the prototype models and its simulation analyses were also conducted

From these studies, the static and the dynamic responses and strains of the models and the static and dynamic earthpressures acted on the models were evaluated, and it was verified that the structures did not exceed the allowable plastic deformation and did not collapse completely due to strong earthquake motions like Hyogoken-nanbu earthquake, and during execution.