

実大RCボックスカルバートの破壊解析への 応用要素法の適用

目黒 公郎1・長島 浩2

¹東京大学生産技術研究所助教授 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1) E-mail:meguro@iis.u-tokyo.ac.jp ²東京ガス株式会社(〒105-0022 東京都港区海岸1-5-20)

微小変形から崩壊過程までを統一的に解析可能な応用要素法(Applied Element Method, AEM)を用い て,実大RCボックスカルバートの破壊実験の追試を行い,部材耐力や構造全体としての耐力,及び変形性 能を評価することにより,応用要素法の妥当性を検討した.次に,このRCボックスカルバートを地中に埋 め,その周囲に地盤との間の滑りを助長させる低摩擦材を敷設した場合としない場合での破壊挙動の違い をAEM解析した.解析結果からは,低摩擦材を敷設したケースでは,低摩擦材なしのケースに比べ,ひび 割れ数が大幅に低下し,RCボックスカルバートの地震対策としての低摩擦材敷設の効果が示された.

Key Words :RC Box Culvert, Applied Element Method, AEM, Failure Behavior, Numerical Simulation

1.はじめに

兵庫県南部地震は,地震災害における建築・土木 構造物の崩壊挙動にいたるまでの破壊挙動の解明が, いかに重要であるかを再認識させた.地震による人 的被害を軽減するには,地震動を受ける変形性能の 評価精度を向上させることが不可欠である.近年で は数値解析技術の進歩と,計算機性能の発展に伴い, 高精度で高速な解析が可能となってきた.構造物の 複雑な破壊挙動をシミュレーション可能な理論が構 築され,解析結果を理論解や実験結果と比較分析し, その信頼性が示されれば,地震時における構造物の



破壊挙動や変形性能を定量的に評価できる.

そこで本研究では新しい非線形構造解析手法であ る応用要素法(Applied Element Method: AEM)¹⁾を 用いて,RCボックスカルバートの数値解析を試みる. そして解析結果から得られた部材耐力や構造全体と しての耐力,及び変形性能を評価することにより, 応用要素法の妥当性を検討する.さらにこのRCボッ クスカルバートを地中に埋め,その周囲に地盤との 間の滑りを助長させる低摩擦材を敷設した場合とし ない場合での破壊挙動の違いをAEM解析する.そし て,低摩擦材を敷設がRCボックスカルバートの地震 対策として効果的であることを示す.

2.応用要素法の概要

応用要素法(AEM)¹⁾では,図-1 に示すように解析 対象を仮想的に分割した要素の集合体として取り扱 う.各要素は法線方向とせん断方向の2種類のバネ でつながれている.各バネにはその位置に応じて, コンクリートと鉄筋の材料モデルが適用され (図-2), このバネを介して周囲の要素と力のやり取りを 行う.そしてバネが代表する領域の材料がその領域 に作用する応力に耐えられなくなると、バネが切断 してクラックが自然に発生するので,進行性破壊現 象もスムーズに表現することができる.更に AEM では,破壊が進行し分離独立した後も個々の要素の 運動をそのまま追跡することができ,再び衝突した 際には衝突バネを配置することで,図-3のような衝 突問題 2)を解析することができる.この様なメカニ ズムによって, AEM では微小変形領域から崩壊を 含めた大変形領域までの構造物挙動が解析できる.

AEM の精度の高さを示す 1 例として,図-4(a)に示す 1/15 スケール RC ビル模型の振動台実験のシミュ

レーション 3)を紹介する.この実験は,波形が同じで 最大振幅の違う 5 種類(最大振幅: 40,200,400, 600,800Gal)の地震動を順番にビル模型に作用して 破壊挙動を分析したものである.ここでは AEM を用 いてまったく同じ手順で破壊挙動のシミュレーショ ンを行った.図-4(b)は既に 40~600Gal の4 種類の 地震動を受けて被災し,構造体としてかなり非線形に なった状態のビルに 800Gal の地震動が作用した場合 の応答であるが,AEM の解析結果が実験結果と非常 によく一致していることがわかる.図-4(c)は入力を さらに大きくして,最大振幅 1200Gal とし,継続時 間を2倍にした場合の崩壊挙動である.実際の実験で は、安全性の問題と用いた振動台の性能の関係から、 この状態(完全崩壊)までの挙動は実現できなかっ たが,AEM を用いると完全崩壊に至るまでの挙動が 再現できることがわかる.

- 実規模載荷実験に基づいた RC ボックスカ ルバートの AEM による破壊挙動シミュレ ーション
- 3.1 実大 RC ボックスカルバート供試体と解析 モデル



図-3 AEM による衝突現象の解析²⁾



解析対象構造物は図-5 に示す底版,頂板,側壁, 隔壁を組み合わせた RC ボックスカルバートである. 奥行幅は底版 1.9m であり,頂板,側壁,隔壁は 1.6m である.AEM では,配筋図に従って1本1本の 鉄筋の位置と量を忠実にモデルに取り込むことが可 能である.本研究でも図-6 に示す新たに導入した 斜め鉄筋(要素の辺に対して任意の角度をなした配 置が可能)を含めて,配筋図に示された全ての鉄筋 の位置と量を忠実にモデル化している.AEM におけ る鉄筋の導入法に関しては,文献4)を参照された い.本研究では,5cm×5cmのAEM 要素を用いて解 析モデルを作成した.境界条件は実験と同様,試験 体を床に固定させるためのPC 鋼棒要素について,X 方向,Y 方向,回転方向を固定した.全要素数は 3,082 個である.

載荷方法は静的交番載荷であり,図-5(b)に示す

図-6 斜め鉄筋モデル

٠X

モデルの上部の両側に取り付けた載荷板に 1step あた り 0.5mm の強制変位を水平方向に作用させる.図-7 に載荷スケジュールを示す.また本来この試験体は 地中に埋設されて土圧の影響を受けているものなの で,実験では,左右側壁と頂板に取り付けられた載荷 板に図-8 に示すように,それぞれ水平土圧・鉛直土圧 に相当する力を矢印の方向に作用させ,地中での応力 状態の再現に努めている.AEM 解析でもこの常時荷重 の影響を考慮した上で数値計算を行った.使用した コンクリート,鉄筋,載荷板の材料特性は表1に示 す通りである.なおこの実験は曽良岡らによるもの である⁵⁾.

3.2 解析結果

ここでは,前川ら⁶⁾が開発した非線形有限要素解 析プログラム「WCOMD-SJ」による解析結果⁵⁾,



図-8 鉛直土圧・水平土圧(kN)

表-1 材料特性

	弹性係数	圧縮強度	引張強度	降伏強度
	2.80×10^{7}	4.39×10 ⁴	3.10×10 ³	-
コンクリート(側壁・開壁・頂版)	2.77×10^{7}	2.51×10^{4}	2.30×10^{3}	-
鉄菌	1.91 × 10 ⁸		-	3.70 ×10 ⁶
载荷板	1.91 × 10 ⁸	3.86×10 ⁶	3.86×10 ⁸	-

単位は全て(kN/m²)

斜め鉄筋導入前の AEM 解析の結果,斜め鉄筋導入後の AEM 解析の結果を紹介する.それぞれの場合の荷重 - 水平変位の関係を,図-9,図-10,図-11 に示す.測定対象要素は頂板中央の要素である.図-11 と図-10 を比較すると,斜め鉄筋モデルを導入したことにより荷重ピーク値が約3割増加し AEM 解析結果が実験値に近づいたことがわかる.さらに図-9 と比較すると,「WCOMD-SJ」を用いた場合では追

跡できなかった試験体の終局状態までの挙動が AEMを用いて再現できている.

図-12 は頂版中央変位+5.1cm 時における斜め鉄 筋導入後の試験体の変形図である.要素の変位をわ かりやすくするために,作図に際しては変位を3倍 に拡大して表現している.この図を見ると,実験で 発生した左右側壁,隔壁のひびわれの状況が AEM を用いて再現できることがわかる.また荷重ピーク



以降に発生した頂板の内側における曲げひび割れも 確認することができた.これらの結果から,斜め鉄 筋のモデルが隅角部の補強に効果的に作用し,構造 物全体の耐力が上昇することが確認できた.また,斜 め鉄筋導入の結果,載荷直後から構造物全体系の耐 荷機構が完全に低下するまでの非線形挙動を AEM を用いて高精度に追求できることが確認できた.

4. 地盤変位が及ぼす RC ボックスカルバート の破壊挙動シミュレーション

4.1 周辺地盤を含めた解析モデルの作成

地中構造物の地震時挙動は,地上構造物とは異な り,周辺地盤の影響を強く受ける.そこで本研究で は,周辺地盤までをAEMでモデル化し,周辺地盤の 挙動が構造物に及ぼす影響を検討する.周辺地盤は 埋戻土と硬質地盤から構成されており,構造物は硬 質地盤上に直接設置されている(図-13).モデル化 した土被り厚は2.0mと設定したが,解析対象構造物 では11.5mの土被り厚となっていることから,地盤 最上端に鉛直土圧,地盤側面に側方土圧(静止土圧 係数 K₀=0.5)を作用させることにより,地中での応 力状態を再現した.解析モデルとしては,廉価な PC 環境での解析を行うために,記憶容量と計算時間を 考慮し,5cm×5cmのAEM要素14,940個(RC構造物 要素2,096個,周辺地盤要素12,844個)から成るモ デルを作成した.

荷重載荷方法は静的一方向載荷であり,図-14 に 示すように地盤側面に強制変位を水平に作用させる. また構造物 - 地盤間のはく離を AEM 解析において 表現するために,構造物 - 地盤間の法線バネは,引張 域では相互作用無しとして応力 0 とした.また接線 バネの降伏応力はモールクーロン式で与え,降伏後 の剛性を0とした(図-15)⁷⁾.

	ag	低摩擦材なし	低摩擦材あり
埋戻土(<u>。</u>)	2 0000	1.41cm	1.74cm
RC 構造物 (c)	2.000	1.39cm	0.58cm
埋 <u>戻</u> 土(。)	E 00	3.87cm	4.26cm
RC構造物 (c)	9.00CM	3.84cm	2.06cm

表-3 埋戻土・構造物層間変位



図-17 層間変位

また本解析では,埋戻土 - 構図物間に低摩擦材を 模擬した要素(埋戻土のせん断剛性の1/10)を設定 し,地盤の滑りが構造物に与える影響⁸⁾について検討 した(図-16).コンクリート,埋戻土,硬質地盤,低 摩擦材要素の材料特性は表-2の通りである.

4.2 解析結果

解析結果として,表-3にモデル地盤の最上端変位 a。に対する構造物と埋戻土の層間変位量を示す.測



定対象要素は,図-17に示すように構造物では頂版 中央要素であり,埋戻土では隔壁軸上の要素である。

低摩擦材なしのケースでは,構図物と埋戻土の層 間変位量の値に大きな差異は見られなかったが、低 摩擦材を敷設したケースでは,埋戻土の層間変位量 が構造物の変位量を大きく上回る結果となった.ま た低摩擦材を導入したことにより,構造物の層間変 位量は小さくなっている.この結果から,AEMを用 いて, 地盤と構造物間の滑りを助長させる低摩擦材 の敷設が,地盤水平方向変位に対して構造物の変形 量を抑制する効果があることを確認出来た.図-18 と図-19は,それぞれ低摩擦材のない場合とある場 合に,入力変位(ステップ数50,100,150,200ステ ップ)に応じて発生した構造物のひび割れ損傷状況 を示している.図-20は表層地盤変位(変位入力ステ ップ数に対応)と累積破壊バネ数(ひび割れ発生箇 所数に対応)との関係を示したものである.これら 3つの図の結果を総合すると,以下のようなことが 結論づけられる.

低摩擦材なしのケースでは,小さな変位入力(小 さな入力ステップ数)からひび割れが発生するだけ でなく,その進展も早い.一方低摩擦材を敷設した ケースでは,ひび割れが発生する入力ステップが低 摩擦材を敷設しなかったケースに比べて大幅に遅れ るとともに,その後のひび割れの進展具合も緩やか になる.

5 まとめ

本研究では,微小変形から崩壊過程までを統一的 に解析可能な応用要素法(Applied Element Method, AEM)を用いて,実大RCボックスカルバートの破壊 実験の追試を行い,部材耐力や構造全体としての耐 力,及び変形性能等を評価することにより,AEMの妥 当性を検討した.またその結果をRC構造の非線形破 壊解析法として有名なWCOMD-SJの結果と比較したと ころ,WCOMD-SJでは追跡できなかった終局状態まで の破壊挙動がAEMを用いて再現できることがわかっ た.

次にこのRCボックスカルバートを地中に埋め,そ

の周囲に地盤との間の滑りを助長させる低摩擦材を 敷設した場合としない場合での破壊挙動の違いを AEM解析した.解析の結果,低摩擦材を敷設したケ ースでは,低摩擦材なしのケースに比べ,ひび割れ 数が大幅に低下し,RCボックスカルバートの地震対 策としての低摩擦材敷設の効果が示された.

参考文献

- 1) Meguro, K. and Tagel-Din, H : A pplied element method for structural analysis: Theory and application for linear materials, Structural Eng./Earthquake Eng., JSCE, Vol.17, No.1, 21s-35s, 2000.
- Hatem. Tagel-Din and K. Meguro : Applied Element Method for Dynamic Large Deformation Analysis of Structures, Structural Eng./Earthquake Eng., JSCE, Vol.17, No.2, 215s-224s, 2000.10.
- 3) H. Tagel-Din and K. Meguro : Analysis of a Small Scale RC Building Subjected to Shaking Table Tests Using Applied Element Method, Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering, 8 pages, 2000.2.
- Kimiro MEGURO and Hatem Tagel-Din : Applied Element Simulation of RC Structure under Cyclic Loading, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 127, No. 11, pp.1295-1305, 2001.8.
- 5) 曽良岡宏・足立正信・本田国保・田中浩一:地 中ボックスカルバートの変形性能に関する実験 的研究,コンクリート工学年次論文集,Vol.23, N0.3,2001.
- 6) 岡村甫・前川宏一:鉄筋コンクリートの非線形 解析と構成則,技報堂出版, pp.15-19, 1991.
- 7) 土木学会:土木構造物の耐震設計入門,2001.
- 8) 佐藤博,大嶋義隆,大川尚哉,坂哲,宮澤昌弘, 保立豊:せん断土圧低減材を用いた地中ボック スカルバートに関する実験的研究,免震・制震 コロキウム講演論文集,pp.287-294,2000.11

(2003.7.10 受付)

APPLIED ELEMENT SIMULATION OF FAILURE BEHAVIOR OF FULL-SCALE RC BOX CULVERT STRUCTURE

MEGURO Kimiro and NAGASHIMA Hiroshi

The response of RC culverts tested under cyclic loading was simulated using the Applied Element Method (AEM). The analysis was compared with the results obtained with the WCOMD-SJ program, also used for the nonlinear analysis of RC structures. Although WCOMD-SJ and AEM simulated the structural behavior, only the later could estimate the ultimate response. After validating the model, the RC culvert was analyzed under horizontal loadings considering the soil-structure interaction effect. Two cases were considered; in one the soil was directly in contact with the RC culvert while in the other a low friction membrane was placed in between. The simulation showed that the structure showed fewer cracks in the latter case. These results demonstrate the membrane ability to improve the seismic behavior of RC culverts.