

論文 FEM によるボックスカルバートの非線形挙動の分析

飯塚敬一^{*1}・足立正信^{*1}・本田国保^{*1}・武田智吉^{*2}

要旨：鉄筋コンクリート製二連ボックスカルバートの水平載荷実験結果に基づき、二次元非線形 FEM によるシミュレーション解析を行い、不静定構造物の非線形挙動について検討した。この実験シミュレーションから、実験で得られた延性的な荷重-変位応答、ひび割れ性状やエネルギー吸収能などを精度良く把握することができた。また、隔壁部材をせん断破壊させた実験に対するシミュレーションでも、せん断破壊性状を把握することができ、ここで用いた非線形 FEM 解析により、不静定構造物の変形性能や耐荷力を適切に評価できることが分かった。

キーワード：ボックスカルバート、非線形 FEM、実験シミュレーション、非線形挙動

1. はじめに

コンクリート構造物の耐震設計は、構造物の耐用期間中に起こり得る地震(設計用想定地震動)の頻度を考慮して、構造物が保有すべき耐震性能を照査する設計体系になりつつある。特に、平成 8 年度に制定された「コンクリート標準示方書 耐震設計編」¹⁾で明記されているレベル 2 地震動のような強地震動に対しては、構造物の非線形性を考慮した耐震設計が必要となるが、そのためには、コンクリート構造物の変形性能や耐荷力といった耐震性能評価法や破壊メカニズムを的確に把握される解析・評価技術を確立する必要がある。

本研究は、複雑な非線形挙動を呈するボックスカルバート構造の耐震性能を解析的なアプローチによって適切に評価できる可能性を探るために、岡村・前川らによって開発された二次元非線形 FEM 解析プログラムを用いて水平載荷実験²⁾に対するシミュレーション解析を行い、荷重-変位応答の非線形性やひび割れによる損傷状況について検討した。また、二連ボックスカルバートの隔壁をせん断破壊させた実験に対するせん断破壊挙動についても検討した。

2. 実験シミュレーション

2.1 解析手法とモデル化

実験シミュレーションに用いた解析プログラムは、岡村・前川らによって開発された『WCOMD-SJ(ver.7.0)』³⁾であり、構成則についても、弾塑性破壊モデル(Maekawa and Okamura, 1983)など、そのプログラムに組み込まれているものを使用した。解析モデルは、図-1に示すとおり、全幅 2.54m、全高さ 1.48m、奥行き 0.4m、部材厚 20cm(隔壁のみ 14cm)である。そのモデル化は、2次元 8 節点アイソパラメトリック平面要素で行っており、断面方向の要素分割は部材に配置されている内外の軸方向筋とその間のコア部を考慮して 3 分割とした。各要素の剛性は、コンクリートと軸方向筋やせん断補強筋の鉄筋比による等価剛性としている。また、側壁および隔壁下部の隅角部は弾性要素としているほか、ハンチ始点位置には局所的な不連続変形挙動が表現される離散ひび割れモデルに基づく‘接合要素’を考慮した。

解析に用いた材料定数は、要素試験から得られた表-1に示す値を用いた。なお、コンクリート強度については、圧縮は円柱供試体強度の 0.85 倍、引張強度は 0.7 倍とした。その根拠は、

*1 東電設計(株) 技術開発本部土木技術部(正会員)

*2 東京電力(株) 電力技術研究所耐震グループ

表-1 材料定数

		単位体積重量 (N/mm ³)	弾性係数 (kN/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
コンクリート		21.0	16.6~21.0	21.7~27.9	1.47~1.96
		単位体積重量 (N/mm ³)	弾性係数 (kN/mm ²)	降伏点強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
鉄筋	主筋(D10)	77.0	188	348	507
	(D19)	77.0	197	570	748
	スタ-ラップ ^o (D6)	77.0	177	368	475
	(D10)	77.0	188	379	560

圧縮については、上迫田らが行った一軸圧縮強度に関する実験検討⁴⁾から、円柱供試体強度が 29.4 N/mm² 程度では、実験試験体の強度は円柱供試体の 0.85~0.9 であること、また、引張強度については、初期剛性を実験と一致させた弾性解析から得られたひび割れ発生時の引張応力が円柱供試体強度の 70%であったことによっている。

スカルバート構造の非線形挙動に影響を及ぼす主因子として考えられた土被り厚と荷重パターンの 2 つのパラメータを組み合わせた 3 つの実験(S1, S2, S3)と、隔壁のせん断破壊を狙った実験(S4)の計 4 つの実験に対して行った。実験シミュレーションの検討ケースを表-2 に示す。

表-2 検討ケース

検討 ケース	解析条件		備考
	荷重パターン	土被り厚	
S 1	単調荷重	20m	
S 2	正負 交番 荷重	20m	
S 3		5m	
S 4		20m	隔壁のせん断破壊

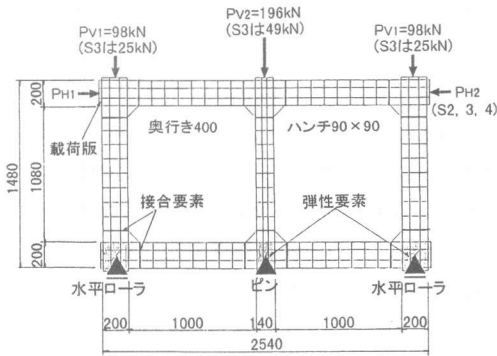


図-1 解析モデル図 (寸法単位 ; mm)

解析は、地中埋設構造物の挙動を模擬するため、図-1 に示すように、初期ステップとして、頂版両端部および中央部に土被り厚(5m,20m)に相当する鉛直荷重を荷重制御で加えた後、試験体をせん断変形させるよう、側壁上部より水平強制変位を荷重する方法で行った。

2.2 検討ケース

実験シミュレーションは、地中埋設のボックス

3. 解析結果

3.1 S1の解析結果

シミュレーション解析で得られた結果のうち、荷重-変位応答(P-δ)を図-2 に示す。なお、同図に示す水平変位は、試験体の隔壁位置での頂底板間の相対変位である。

解析と実験結果を比較すると、ひび割れ前の弾性状態から鉄筋降伏や最大荷重点辺りまでの非線形領域の応答はおおむね一致していることが分かる。この P-δ 図に示す○印と□印は、実験および解析において、それぞれ最初に鉄筋降伏が現れた時点を示しているが、初期鉄筋降伏が生じた時点の荷重は、実験が 98kN、解析が 93kN であり、良好に一致している。また、こ

の初期鉄筋降伏から各部位で鉄筋降伏が次々に生じる辺りでは、試験体の剛性が著しく低下しており、その剛性低下は、初期剛性に対して40～70%と大きく、鉄筋降伏がこの種構造系の非線形性(剛性低下)に大きな影響を及ぼすことが分かる。しかし、解析においても、このように鉄筋降伏が各部位で生じ、系全体の剛性が著しく低下しても系が崩壊するような脆性的な挙動は現れず、むしろ、不静定構造物特有の応力の再配分機構により、延性的な状態を保持し続けることが確認された。

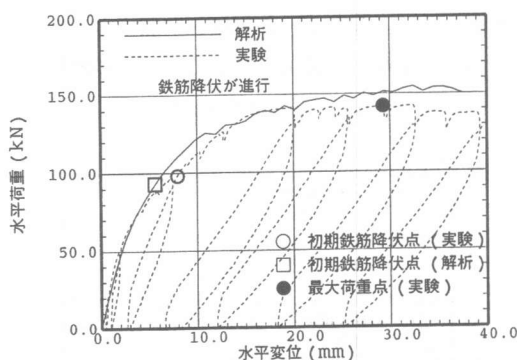


図-2 S1の荷重-変位応答

次に、ひび割れ性状をみるため、実験と解析で得られたひび割れ図を図-3および図-4に示す。試験体全体のひび割れ性状を比較すると、ひび割れが部材端部の隅角部付近に集中する傾向にあること、また、各部位で引張側で生じたひび割れが変形が大きくなるに従い、部材中央から圧縮側に向かって斜め方向に進展していく性状など実験で確認された損傷状態をよく模擬していることが分かった。なお、実験では、底版隅角部でもひび割れは生じていたが、解析においては、モデル化した支承部でのひずみの局所化を避けること、その支承部を弾性体としても、全体系の変形挙動に大きな影響を及ぼさないと判断して底版隅角部を弾性要素とした。

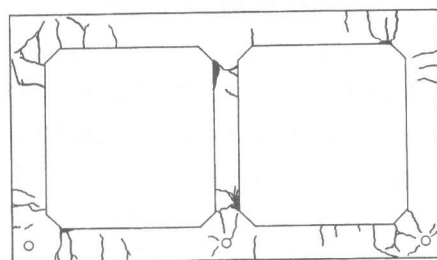


図-3 S1のひび割れ図(実験)

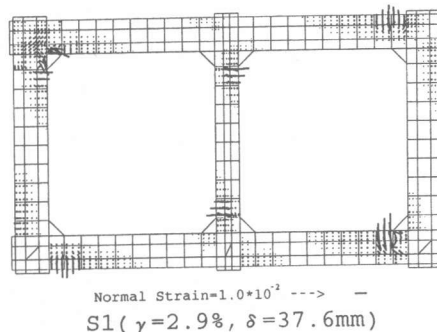


図-4 S1のひび割れ図(解析)

3.2 S2およびS3の解析結果

実験と解析で得られたP-δ応答を図-5および図-6に示す。なお、S2およびS3の検討は、いずれも正負交番載荷で行っているため、P-δ図に示す横軸の変位は、正加力側(試験体を右側に変形)を+表示で、負加力側(試験体を左側に変形)を-表示としている。

P-δ応答を比較すると、S2およびS3とも、正負両側の応答経路の包絡線はよく一致している。また、最初に鉄筋降伏が現れる荷重を比較すると、実験では、S2でP=112kN(正)、100kN(負)、S3でP=76kN、77kNであるのに対し、解析では、S2でP=96kN、98kN、S3でP=83kN、85kNであり、両者の差は10%程度である。このことから、耐震性能の一つの指標と考えられる鉄筋降伏レベルでの構造物耐力について精度良く予測できるものと考えられる。ただし、鉄筋降伏以降の非線形領域では、例えば、変形がδ=15～20mmとなる辺りのヒステリ

シスループをみると、実験では、除荷経路が逆S字型でループの中央がくびれるような形状であるのに対し、解析では、大きく外側に膨らむ紡錘型の形状となっており、解析と実験の結果が整合していない。これは、この試験体のような断面寸法が小さい構造系では、ある程度変形が大きくなると、被りコンクリートの剥落や圧壊によるひび割れの進展、あるいは、鉄筋とコンクリートとの付着劣化といった損傷によって、軸方向筋とせん断補強筋で囲まれたコア部の拘束が緩和してしまい、それが全体系の挙動に大きく影響を及ぼすものと考えられるが、本解析で用いた RC 要素で、このようなメカニズムを適切に評価することが困難であったためと考えられる。

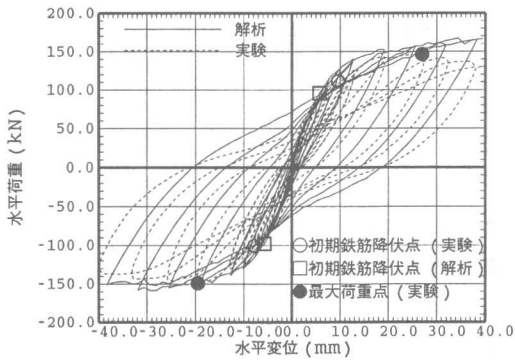


図-5 S2の荷重-変位応答

次に、正負交番载荷の条件から得られる履歴曲線から、エネルギー吸収量および履歴減衰を比較する。ここでは、S2の実験と解析から求められたエネルギー吸収量と等価粘性減衰数を図-7および図-8に示す。これらの値は、耐震設計上、構造全体系のねばりとして評価される塑性変形能や、非弾性効果の指標として評価されるものである。これらの図から、実験結果をみると、試験体の変形が大きくなるに従い、高いエネルギー吸収能や大きな減衰効果が現れていることが分かるが、解析においても、これらの傾向は良く捉えられており、不静定構造物で期待される大きな塑性変形能を消散エネルギーといった観点から評価する上でも、この解析プログラムが有効であることが分かる。

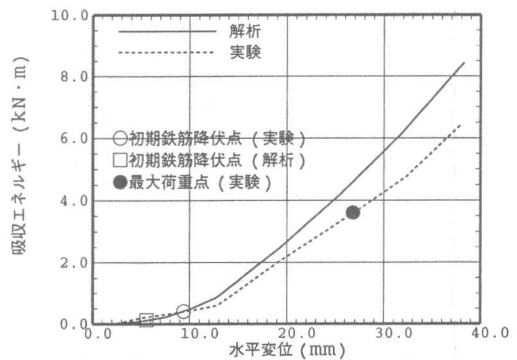


図-7 水平変位-エネルギー吸収量の関係(S2)

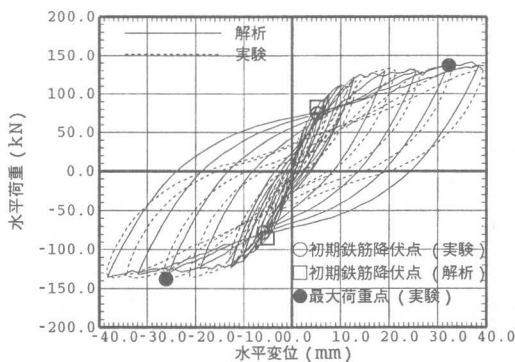


図-6 S3の荷重-変位応答

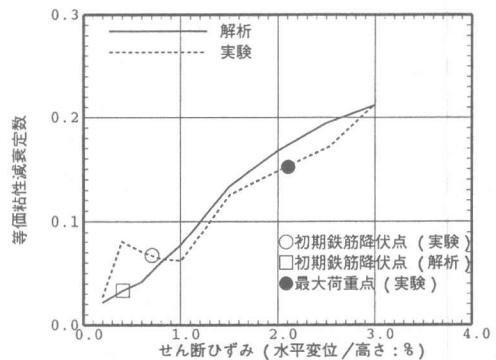


図-8 水平変位-等価粘性減衰定数の関係(S2)

3.3 S4の解析結果

S4は、隔壁をせん断破壊させたものであるが、これは、鉛直荷重(土被り厚)を支える鉛直部材のうち、隔壁のみがせん断破壊した場合、全体系の耐荷機構にどのような影響を与えるのか、また、部材レベルでは、非線形FEMでせん断破壊挙動が適切に捉えられるのかを調べるのが目的であった。

実験と解析で得られたP- δ 応答を図-9に示す。包絡線は正負とも、鉄筋降伏辺りで解析の方がやや硬い傾向がみられるが、この傾向はS1~S3ケースでも同様であった。この理由としては、試験体材料の水セメント比がW/C=0.7とやや大きく、ブリージング水によってコンクリートと鉄筋の付着力が小さくなった可能性があり、解析で、このような付着力の低下を適切に見積ることができなかつたためと考えられる。また、隔壁に斜めひび割れが生じた時点(実験では-12.96mm、解析では-9.12mm)以降をみると、隔壁のせん断破壊が進行しても、全体系の挙動は脆性的にはならず、むしろ、延性的な挙動を呈していたが、解析においても、実験結果とは差があるものの、傾向的には延性的な挙動を捉えることができています。

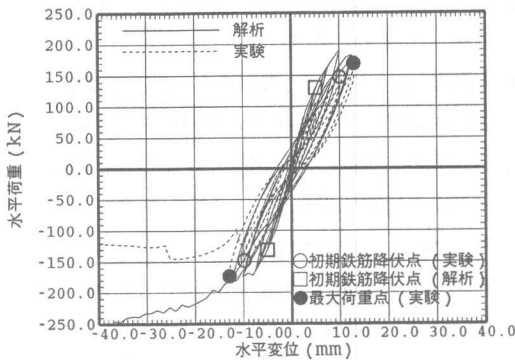


図-9 S4の荷重-変位応答

実験で観察されたひび割れ図を図-10に、また、解析で得られた斜めひび割れ発生時点のひび割れ図を図-11に示す。実験では、隔壁上部で生じた斜めひび割れが部材中央部に向か

って軸方向筋に沿ったひび割れ(割裂ひび割れと考えられる)に進展していくことが確認されていたが、解析でも、部材上下部で生じた曲げひび割れが斜めひび割れに進展していく性状を捉えている。当初、隔壁のせん断破壊挙動の検討では、断面分割数を1としていたが、そのようなモデル化では、隔壁での斜めひび割れを再現することが出来ないことが分かり、斜めひび割れを生じさせるには、要素を軸方向筋があるRC部と断面コアの無筋部を分けてモデル化する必要があることが分かった。ただし、それでも実験で現れた斜めひび割れが断面を貫通するまでの挙動を追うところまでは出来なかつた。解析で斜めひび割れを圧縮域の要素を貫通させるには、要素分割数と各要素に与える特性を工夫する必要があると考えられる。

以上から、部材レベルでのせん断破壊挙動と、構造物レベルでは、部材の一つが破壊しても不静定構造物で期待される応力の再配分機構によって延性的な挙動を呈するという両者の挙動を比較的精度良く捉えることができたといえる。

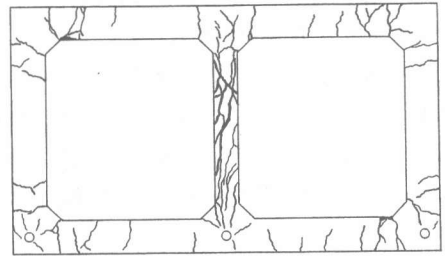


図-10 S4のひび割れ図(実験)

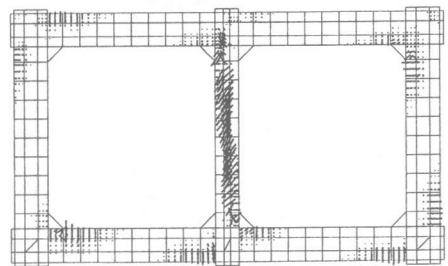


図-11 S4のひび割れ図(解析)

3.4 接合要素の影響

この実験シミュレーションでは、図-1のモデルに示すように、全ての隅角部のハンチ始点に、この非線形FEM解析プログラムに用意されている離散ひび割れモデルに基づいた‘接合要素’⁹⁾を考慮している。それは、実験において隅角部付近にひび割れが集中することが確認されており、このような局所的な不連続な挙動が系全体の変形挙動に与える影響が大きいと考えられたためである。そこで、検討ケースS1を用いて、解析における接合要素の影響について調べてみた。

接合要素の有無によるP- δ を図-12に示す。接合要素を考慮しないケースAと接合要素を考慮したケースBを比較すると、初期の段階から両者は乖離しており、初期剛性で比較すると、ケースAの方がケースBに比べて約2.2倍大きくなっている。解析において、初期の段階から違う応答を示すのは、ここで用いた接合要素はコンクリートのひび割れの有無に拘わらず、微小な変形からその不連続な挙動として表現される特性を有するからである。また、接合要素を考慮したケースBは実験結果とよく一致していることも分かる。これは、実験において試験体を製作する段階では、多少なりとも乾燥収縮等によって微細な欠陥が生じるが、この初期欠陥が本試験体のような部材寸法の小さな構造物に

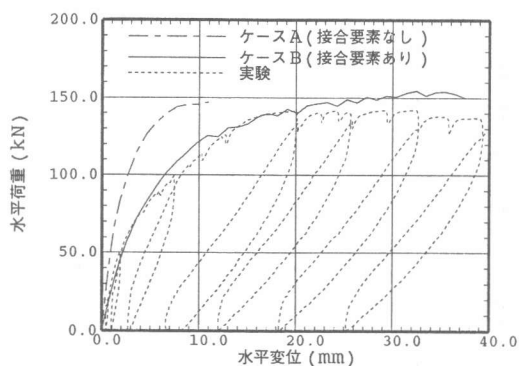


図-12 接合要素の影響

及ぼす影響は実構造物よりかは大きいと考えられ、そのような影響を解析で表現する一つの手段として、隅角部に不連続挙動を表現できる接合要素が有効であったためと考えられる。ただし、実構造物の非線形挙動の評価における接合要素の必要性については検討の余地があると思われる。

4. まとめ

今回行った非線形FEMによる実験シミュレーションによって、実験で得られた荷重-変位応答、ひび割れ性状など不静定構造物特有の非線形挙動を精度よく把えることができた。また、S4のせん断破壊実験に対するシミュレーションから、部材に生じた斜めひび割れも精度良く把えることができた。

謝辞；

本検討に当たり、東京大学前川宏一教授には、多大な協力と御指導を、また、清水建設技術研究所長谷川俊昭氏には、貴重なアドバイスを頂きました。ここに、感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 土木学会；コンクリート標準示方書 耐震設計編 [平成8年制定]
- 2) 本田国保, 足立正信, 石川博之, 長谷川俊昭；水平載荷によるボックスカルバートの変形性能の実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, 1999.7(投稿中)
- 3) Shawky.A ; Nonlinear Static and Dynamic Analysis for Underground Reinforced Concrete, University of Tokyo, 1999.4
- 4) 上迫田, 前川宏一, 岡村甫；コンクリートの一軸圧縮強度, 第四回コンクリート工学年次講演会講演論文集, 1982
- 5) 三島徹也, Bujá Bujadham, 前川宏一, 岡村甫；鉄筋コンクリート離散ひび割れモデルを構成する材料モデルの開発, 土木学会論文集 No442/V16, 1992.2