

実規模載荷実験に基づく ボックスカルバートの破壊過程

本田国保¹・曾良岡宏²・足立正信³・市川卓也¹・相京泰仁⁴

¹正会員 東電設計株式会社 技術開発本部土木技術部 (〒110-0015 東京都台東区東上野 3-3-3)

²正会員 工修 東京電力株式会社 原子力技術部土木調査グループ (〒100-0011 東京都千代田区内幸町 1-1-3)

³東電設計株式会社 技術開発本部土木技術部 (〒110-0015 東京都台東区東上野 3-3-3)

⁴工修 東電設計株式会社 技術開発本部土木技術部 (〒110-0015 東京都台東区東上野 3-3-3)

In this paper, a lateral cyclic loading test for full-scale specimen was carried out. The purpose of this test is to investigate the failure process and lateral strength of underground 2-box culvert. As a result, the lateral strength drops due to the shear failure of vertical members. When the angle of inter-story displacement reaches $1/60$, lateral strength falls to approximately 50% of maximum strength, but at this stage, the specimen can support to vertical load. On the other hand, numerical simulation of this experiment with non-linear FEM analysis shows so good coincidence in P- δ curve, that it is expected that this analysis can simulate plastic behavior and failure process of RC box culvert.

Key Words : box culvert, cyclic loading test, shear failure, deformation property, failure process

1. はじめに

RC 構造物の地震時安全性を適切に評価するためには、構造物の非線形挙動や破壊過程を明らかにする必要があるが、地中RC構造物を対象とした実規模載荷実験の実績は少ない。

本研究では、不静定構造物であるボックスカルバートの破壊性状を把握することを目的として、既設地中RCボックスカルバートを模擬した実規模試験体を用いて水平載荷試験を実施した。この実験では試験体を気中で水平変形させるが、試験体の終局状態を把握するために上載荷重を保持できない状態に至るまで荷重を載荷した。

また、非線形有限要素法による実験シミュレーションを行い、構造全体としての水平耐力、変形および破壊過程について検討した。

なお、本実験の試験体は昭和40年代に建設された地中埋設2連RCボックスカルバートを模擬して作成したものであり、当時のコンクリート標準示方書の設計法に基づき、震度法と許容応力度照査により設計されたものである。構造細目も現行規定とは異なるため、せん断補強鉄筋がほとんど配置されていないことが特徴である。また、土被り厚さは約10mで、硬質地盤に直接支持されている。

2. 実規模載荷実験

(1) 実験概要

地中に埋設されたボックスカルバートの地震時挙動は、主に頂版上面に作用するせん断土圧と側壁に作用する直方向土圧に支配される。実験に先立ち、地盤連成の地震応答解析と構造物を気中状態に置き周辺から作用する土圧分布を離散化した荷重に置き換えて作用させた静的解析を行い、地中構造物の挙動を気中状態ではほぼ再現できるように実験条件を定めた。

図-1に示す載荷方法は、この検討結果に基づいて定めたものである。具体的には、まず土被り厚さ10m相当の常時荷重を複数の油圧ジャッキを用いて載荷した後、この常時荷重を保持した状態で、頂版端部に設置した油圧ジャッキを用いて、水平方向に載荷することにより地震時のせん断変形を模擬している。なお、試験体の底版はPC鋼棒を用いて試験床に固定した。

水平荷重は、試験体の層間変形角(R)で $1/1000$ ずつ増加する変位制御で行い、各載荷ステップでの繰返し回数1回の正負交番載荷とした。ここで、試験体の層間変形角は、図-1に示すA点(隔壁上部)とB点(隔壁下部)の相対水平変位をAB間の距離(試験体高さ:H=2.275m)で除したものである。

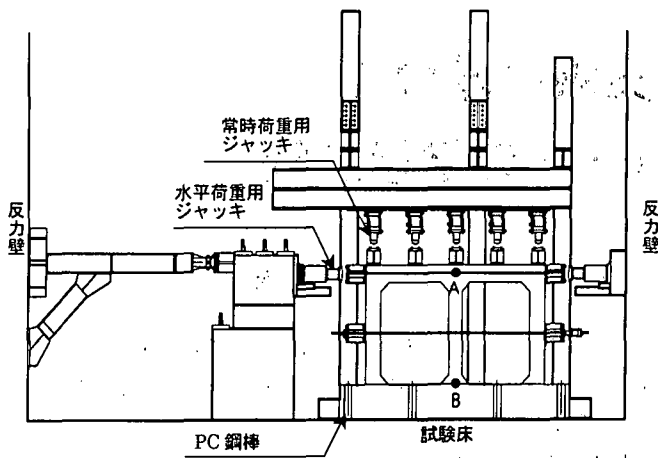


図-1 荷重装置

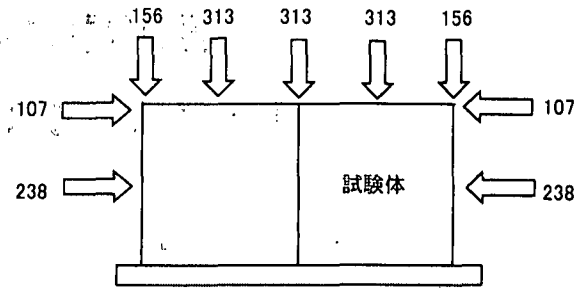


図-2 常時荷重 (単位: kN)

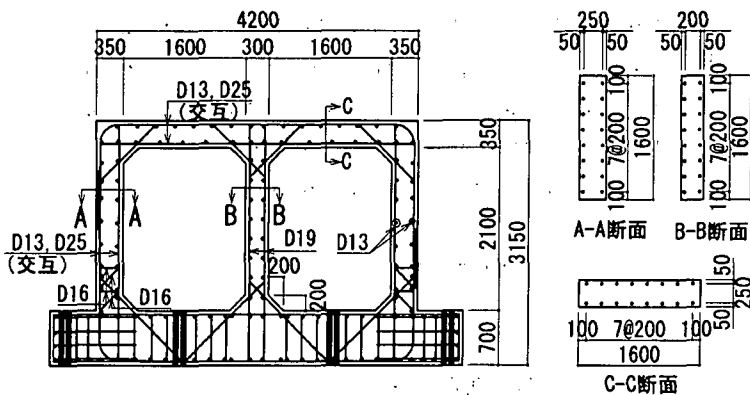


図-3 試験体配筋図 (単位: mm)

表-1 コンクリートの物性値

部位	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
側壁・隔壁	27	2.2	27
頂版	23	1.8	23

表-2 鉄筋の物性値

種類	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
D13	379	185
D16	383	184
D19	385	189
D25	369	189

図-2 に土圧荷重を集中荷重に置き換えた常時荷重を示す。この常時荷重による隔壁の軸圧縮応力度は 1.30MPa、側壁では 0.56MPa となる。なお、鉛直土圧載荷用の油圧ジャッキは試験体の水平変形に追従して水平方向に移動できるため、鉛直土圧荷重に起因する水平力はほとんど発生しない。

図-3 に試験体の形状寸法と配筋を示す。試験体は、幅 4.2m、高さ 2.45m、奥行き 1.6m、隔壁の部材厚は 30cm、側壁および頂版の部材厚は 35cm である。底版の実際の部材厚は 35cm であるが、本実験では底版を試験床に固定するため著しい損傷が生じないように厚さ 70cm、奥行き 1.9m とした。

主鉄筋は D13 と D25 が交互に配置されている。引張鉄筋比は、隔壁 0.57%、側壁および頂版で 0.53% である。せん断補強鉄筋は、側壁下端位置にスターラップと折り曲げ筋が 2 組ずつ配置されている。

なお、試験体の製作にあたっては、試験体を立てた状態でコンクリートを打設した。

表-1 および表-2 に試験体コンクリートおよび鉄筋の材料試験結果を示す。コンクリートの物性値は、載荷実

験終了後に隔壁 2 箇所および頂版 1 箇所から採取したコア供試体を用いて確認した値である。なお、底版コンクリートの強度は 43N/mm² である。鉄筋は SD345 を用いている。

計測は変位および鉄筋ひずみを主体に実施した。水平および鉛直変位は接触型変位計を用いて各部材の端部と中央部で計測し、鉄筋ひずみはひずみゲージを用いて部材端部および中央部で計測した。

(2) 水平荷重-水平変位履歴

図-4 に水平荷重と水平変位(層間変形角)の履歴を示す。荷重および変位の符号は、試験体を左方向に水平載荷した場合を正としている。図-4 中に示した①~⑦は、図-5 に示す鉄筋が降伏した部位と対応しており、数値は降伏した順序である。

同図から、試験体の挙動は大観すれば脆性的な挙動といえる。層間変形角 $R=7/1000$ までは耐力低下せず安定していたが、 $R=8/1000$ 以降において後述する隔壁および側壁のせん断破壊によって急激に荷重低下している。また、荷重低下後は残留変位が大きくなった。

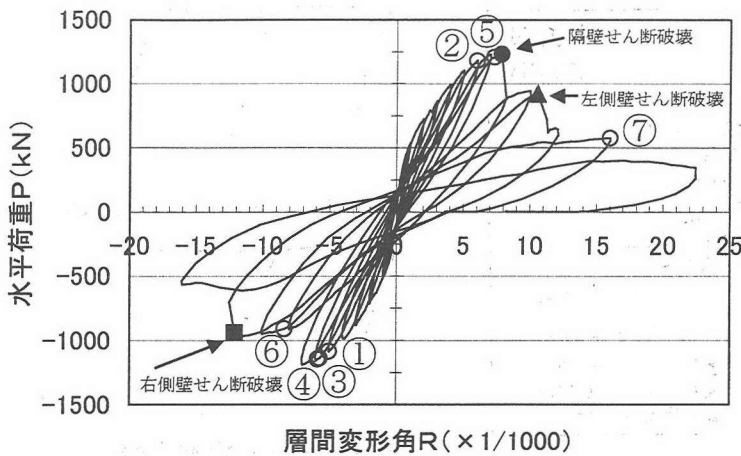


図-4 水平荷重-水平変位履歴

主鉄筋の降伏は、図-5 に示すとおり側壁、隔壁、頂版の順に生じたが、隔壁および側壁の降伏は荷重低下直前に生じていることが分かる。頂版の降伏は荷重低下後であった。

(3) ひびわれ状況

図-6 にひびわれ状況を示す。

層間変形角 $R=6/1000$ の時点では、隔壁上下部および側壁下部において曲げひびわれが斜め方向に進展している。隔壁には斜めひびわれも発生している。

$R=8/1000$ の時点では、正側荷重において隔壁上部にそれまでに生じた斜めひびわれが大きくなっており、図-4 に示す荷重低下と一致している。この荷重低下は約 300kN であり、最大水平荷重の 25% に相当する。

$R=12/1000$ の時点では、正側荷重中に左側壁で、また、負側荷重中には右側壁に斜めひびわれが生じ、この時点でも水平荷重が急激に低下した。荷重低下は正側、負側ともに約 300kN であり最大水平荷重の 25% に相当する。側壁の斜めひびわれは、下部に配置されたせん断補強鉄筋位置よりやや上側で生じている。

全ての鉛直部材がせん断破壊した後の $R=16/1000$ の荷重でも、水平荷重は最大荷重の約 50% を保持している。また、後述するように常時荷重も保持しており、試験体が崩壊することはなかった。さらに、 $R=22/1000$ (水平変位 51mm) では、水平荷重は約 400kN で最大水平荷重の 30% まで低下した。写真-1 は実験終了時の損傷状態であるが、実験終了段階では主鉄筋のはらみ出し、かぶりコンクリートの剥落、側壁に配置されたスタレープの破断も生じた。

(4) 鉛直変位履歴

図-7 に頂版の鉛直変位履歴を示す。頂版中央部の鉛直変位は、隔壁がせん断破壊する前までは水平変位の増加

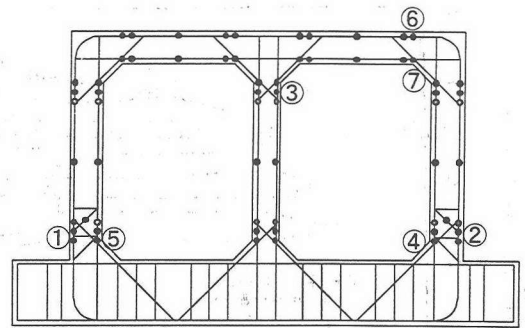


図-5 主筋の降伏位置と順序

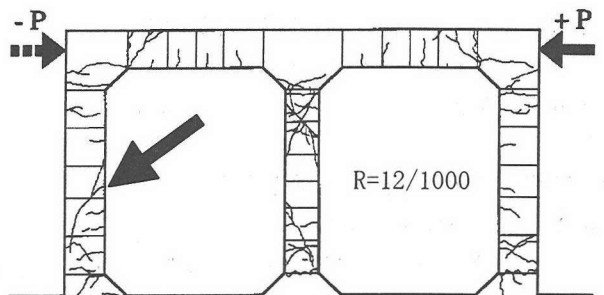
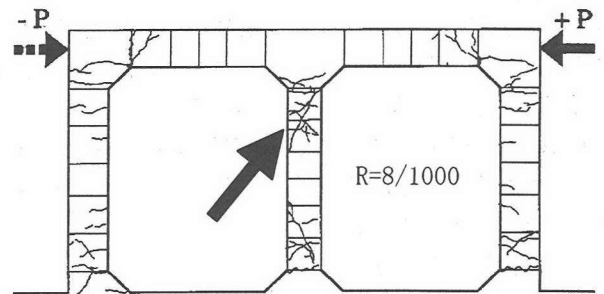
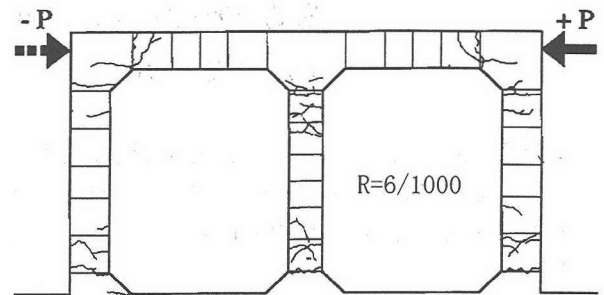


図-6 試験体のひびわれ分布

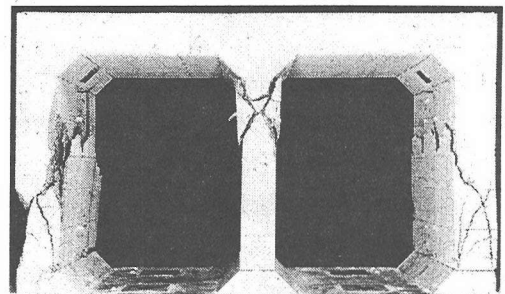
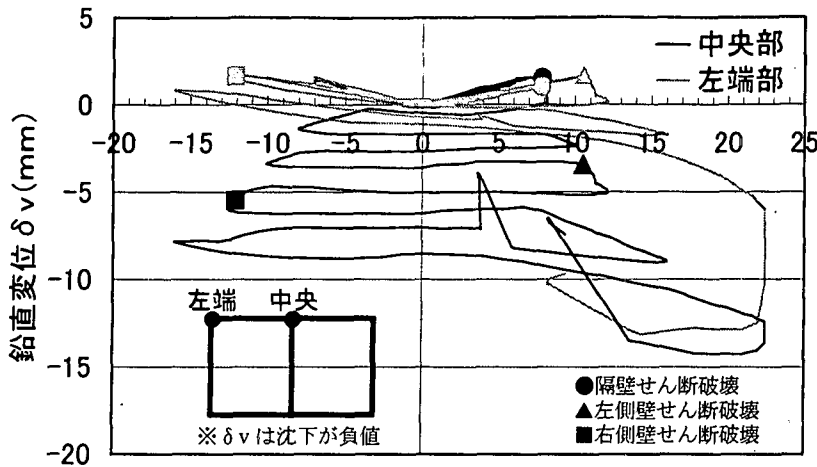


写真-1 実験終了時の試験体



層間変形角R(×1/1000)

図-7 鉛直変位履歴

に伴い伸び上がっているが、隔壁がせん断破壊した直後から沈下に転じている。その後の荷重では、前のステップの水平変位を越えると 2~3mm 単位で沈下量が増加していく。

左端部では、左側壁がせん断破壊した直後から沈下が始まる。隔壁の場合と異なり、正側荷重時の沈下が負側荷重より大きくなっている。これは正側荷重では左側壁の圧縮力が増加するためと考えられる。

R=16/1000 の荷重ステップまでは、頂版中央部および端部とも水平荷重を除荷すると沈下は収まる。この荷重ステップでの頂版中央の残留沈下量は約 7mm で、鉛直ひずみに換算すると 1/325 となる。

R=22/1000 に達したところで、中央部および端部の沈下量が急激に増加して常時荷重を保持できない状況に至る。この荷重ステップで計測された最大沈下量は約 14mm で、鉛直ひずみに換算すると 1/163 となる。

(5) 試験体の変形と鉄筋ひずみ履歴

図-8 に、R=8/1000 の荷重ステップで、隔壁のせん断破壊により荷重が低下する前と後の試験体の変形を示す。隔壁では部材上部が大きく変形しており、図-6 に示した隔壁部の斜めひびわれの進展と一致している。また、隔壁下側の水平変位は荷重低下後に減少している。

図-9 に隔壁下部、頂版中央および側壁上部における主鉄筋のひずみ履歴を示す。図中の●、▲、■印はそれぞれ隔壁上部がせん断破壊した時点、左側壁がせん断破壊した時点および右側壁がせん断破壊した時点に対応する。

隔壁下部の鉄筋ひずみ (B 点) は隔壁上部がせん断破壊するまで増加するが、せん断破壊後は減少し、その後水平変位が増大してもほとんど増加していない。

頂版内側の鉄筋ひずみ (A 点) は、隔壁がせん断破壊するまでは圧縮域にあるが、隔壁がせん断破壊した後は

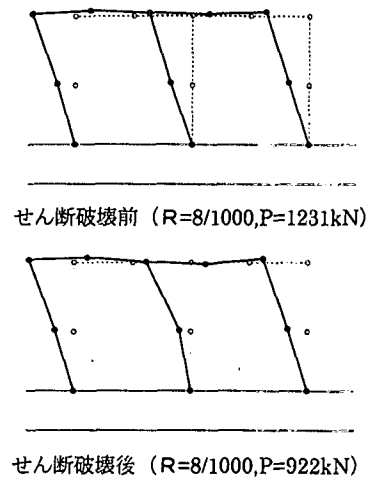


図-8 試験体の変形

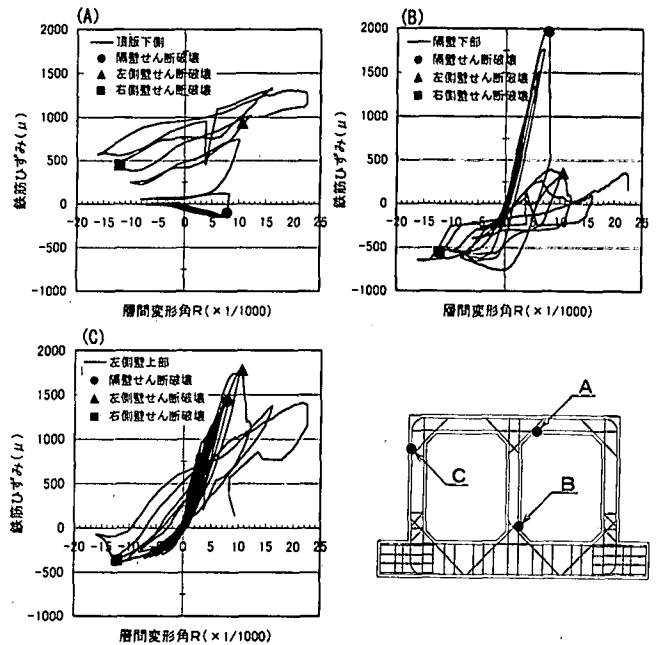


図-9 鉄筋ひずみ履歴

引張域に転じている。ただし、最大引張ひずみは 1400 μ 程度で降伏 (2000 μ) には至らない。

左側壁外側 (C 点) の鉄筋ひずみは、隔壁がせん断破壊した後も増加するが、左側壁がせん断破壊した直後から減少する。このように、鉄筋ひずみ履歴は部材のせん断破壊とそれに伴う耐荷機構の変化に関連している。

以上から、本試験体の破壊過程を以下のように推定できる。まず、隔壁がせん断破壊すると隔壁の水平耐力が失われて系全体の水平荷重は低下する。また、頂版がたわみ、頂版中央部下側の鉄筋ひずみが増加するが、降伏ひずみには達しないため上載荷重を支持できなくなる。といった崩壊機構には至らない。この上載荷重の分担については、隔壁が負担していた上載荷重の一部が側壁に伝達されるので、鉛直部材の軸力分担率も変化して側壁の軸力が大きくなっていく。その後、側壁もせん断破壊

すると、隔壁の場合と同様に水平力が解放されて構造全体としての水平荷重は低下し、側壁でのせん断ずれによって頂版の沈下量が増加し、上載荷重を支えられなくなったと考えられる。

なお、全ての鉛直部材にせん断ひびわれが生じた後も最大荷重の30%の水平耐力を保持できたのは、ひびわれ面での噛み合わせや主鉄筋のダウエル効果によるものと考えられる。

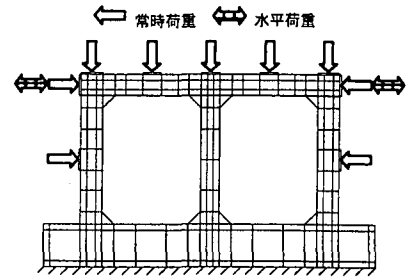


図-10 解析モデル

3. 二次元有限要素解析

(1) 解析方法

試験体の破壊過程を解析的に検討するために、非線形有限要素解析プログラム「WCOMD-SJ」¹⁾を用いて実験シミュレーションを行った。

図-10に解析モデルを示す。試験体は底版を含めてひびわれの発生や進展が有限要素内で平均的に考慮される分散ひびわれモデルに基づくRC平面要素でモデル化した。

部材断面方向の要素分割は、鉄筋が無いコア部をモデル化するために3分割とし、要素幅は両側でかぶりの2倍(10cm)、断面中央のコア部は10~15cmとした。部材軸方向については部材厚さを目安に30cm程度で分割している。載荷版は弾性要素を用いてモデル化した。また、モデル下端の境界条件は完全固定とした。

解析に用いたコンクリートおよび鉄筋の材料定数は表-1および表-2に示す試験値に基づいて設定した。

(2) 解析結果

図-11に水平荷重-水平変位履歴の比較を示す。解析は最大荷重点に至るまでの挙動は実験結果と良く一致している。最大荷重点以降については、実験ではせん断ひびわれによってかぶりコンクリートの剥落や主鉄筋の座屈なども生じているが、解析はこのようなモデルが考慮されていないにもかかわらず、実験結果をほぼ再現できている。

図-12に頂版中央の水平変位-鉛直変位の比較を示す。最大荷重点までは解析と実験はほぼ一致する。しかし、最大荷重点 ($R=8/1000$) 以降の領域では、実験は沈下しているが、解析では沈下することはなく水平荷重が低下した後も伸び上がるように変位しており、実験での挙動と異なっている。

図-13は解析で得られた試験体のひびわれ分布(主引張ひずみ)のうち、水平荷重が低下する前($R=7/1000$)と低下した後($R=8/1000$)を示したものである。実験でのひびわれは水平荷重が低下する直前では部材隅角部に集中しており、その性状は曲げひびわれが斜め方向

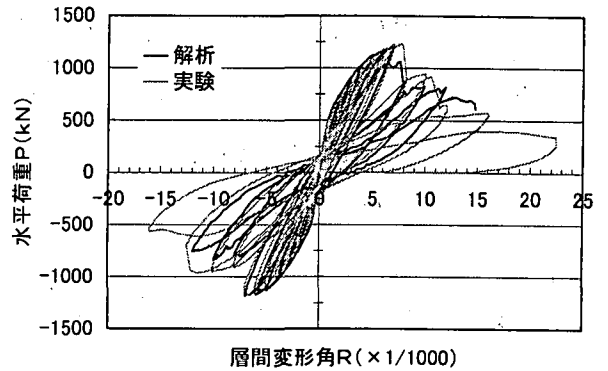


図-11 水平荷重-水平変位履歴の比較

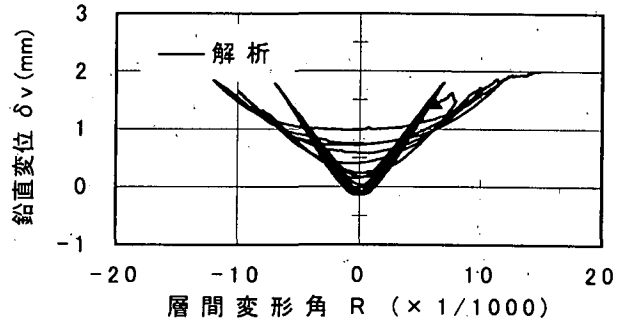
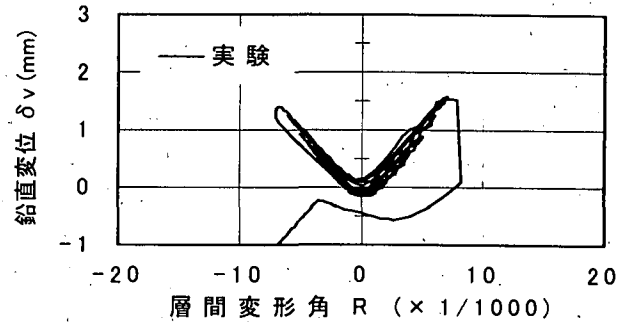


図-12 鉛直変位-水平変位履歴の比較

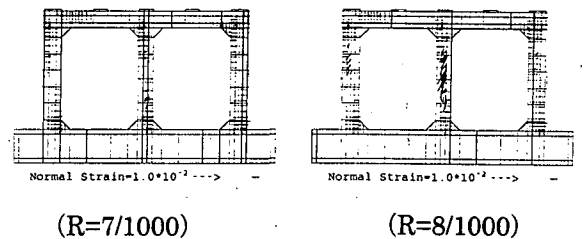


図-13 ひびわれ分布

に進展したものであったが、解析でもほぼ同様な性状を表現できている。また、水平荷重が低下した直後のひび

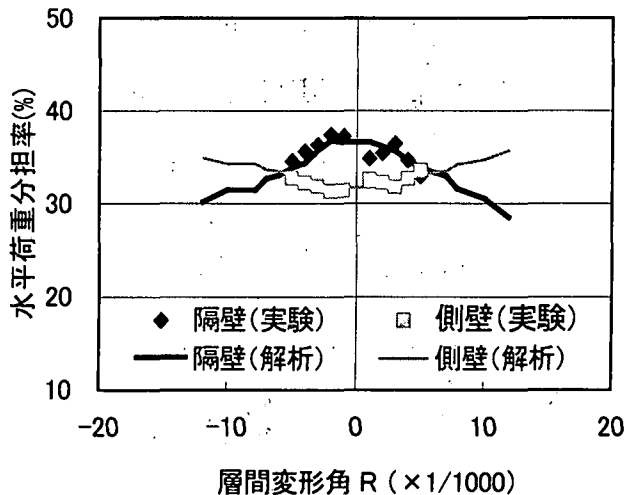


図-14 水平荷重分担率

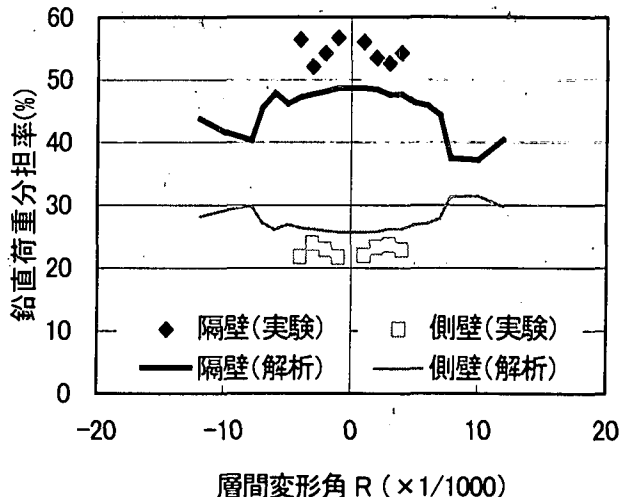


図-15 鉛直荷重分担率

われ性状は、隔壁のコア部に斜め方向のひびわれが進展していることから、せん断破壊によって水平荷重が低下したと推測できる。

(3) 荷重分担率

図-14 に実験および解析から推定した鉛直部材の水平荷重（せん断力）の分担率を示す。実験によるせん断力は、計測された鉄筋ひずみおよび材料の応力-ひずみ関係を用いて平面保持を仮定することにより、断面内の力の釣り合いから曲げモーメントを推定し、部材軸方向の曲げモーメントの分布から求めた。ただし、この推定法は斜めひびわれ後や鉄筋降伏後はその方法に問題があると考えられたため、 $R=5/1000$ までの範囲を表示した。

$R=5/1000$ までは、実験と解析の荷重分担率は一致している。側壁の荷重分担率は30~35%、隔壁は35~40%で隔壁の分担率が大きい。また、水平変位が大きくなるにつれて両者の分担率は接近し、 $R=8/1000$ 以降は側壁の分担率が隔壁を上回っている。隔壁のせん断ひびわれにより水平荷重の負担能力が小さくなったためと考えられるが、解析はこれを表現できているといえる。

図-15 に鉛直部材の鉛直荷重（軸力）の分担率を示す。実験は $4/1000$ までの範囲を表示した。荷重分担率は、隔壁 50~60%、側壁 20~25%であり、隔壁は側壁の2倍の鉛直荷重を負担している。水平変位が大きくなると隔壁の分担率は減少し、側壁は逆に増加していく傾向は水平力の場合と同様である。

解析による隔壁の鉛直荷重分担率は、水平変位が増加すると減少しており、この傾向は実験と同じである。鉛直荷重の分担率が大きく変わるのは $R=8/1000$ であり、図-4 に示した荷重低下点と一致することから、荷重分担率の変化からもせん断破壊を予測することが可能と考えられる。

4. まとめ

本研究では、部材のせん断破壊によって荷重低下する実規模の試験体を製作して水平載荷試験および非線形有限要素法による実験シミュレーションを行った。本研究で得られた主な成果は以下のとおりである。

- ①試験体は層間変形角 $R=8/1000$ で隔壁がせん断破壊した。この段階では上載荷重を保持しており、構造物全体は崩壊しない。
- ② $R=12/1000$ 以降で両側壁がせん断破壊したが、 $R=16/1000$ に達しても隔壁の軸ひずみは0.3%程度であり、上載荷重を保持していた。
- ③隔壁のせん断破壊に伴って、それまで負担していた水平力の一部を側壁が負担する。また上載荷重も頂版を介して側壁が負担することで系全体は安定を保つ。
- ④材料非線形を考慮した有限要素解析は、部材のせん断破壊とそれによる構造物全体系としての耐力低下を適切に表現できる。また、鉛直部材の荷重分担率の変化を定性的に評価できる。

謝辞：本研究を実施するにあたり、東京大学前川宏一教授並びに電力中央研究所金津努部長から貴重なご指導をいただきました。ここに厚く謝意を表します。

参考文献

- 1)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，1991