

論文 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

曾良岡 宏*1・足立 正信*2・本田 国保*2・田中 浩一*3

要旨: 実大規模で製作したボックスカルバートの2試験体を用いて水平載荷実験を行い、主鉄筋量および内空幅の違いが構造物全体系としての水平耐力および変形性能に及ぼす影響について検討した。その結果、主鉄筋量が多いと水平耐力は大きい荷重低下時の変形が小さいこと、また、内空幅が広く主鉄筋量が少ない場合は、耐力は小さいが水平荷重が低下するときの変形は大きいこと、さらに鉛直部材のせん断破壊によって頂版の沈下量が増加することなどが分かった。

キーワード: ボックスカルバート, 実規模試験体, 載荷実験, せん断破壊, 変形性能

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、地中埋設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、地中ボックスカルバートの水平耐力および変形性能を評価することを目的として、実物大の試験体を用いた水平載荷実験と非線形有限要素法による実験のシミュレーションを行い、内空幅と主鉄筋量が構造物全体系の水平耐力および変形性能に及ぼす影響について検討した。この実験では、試験体の終局状態を把握するため常時荷重を保持できない状態に至るまで荷重を載荷している。試験体は、昭和40年代に建設された地中埋設の2連ボックスカルバートを模擬して製作したものであり、設計法および構造細目が現行設計と異なるためせん断補強鉄筋が少ないことが特徴である。また、土被り厚さは約10mで、硬質地盤上に直接設置されている。

体を気中状態でせん断変形させるが、地中では周辺地盤から土圧が常時作用しているため、これを模擬するため複数のジャッキを用いている。実験は、土被り厚さ10m相当の常時荷重を載荷した後、この常時荷重を保持した状態で、水平荷重を頂版端部から載荷することにより地震時のせん断変形を模擬した。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、層間変形角(R)で1/1000ずつ増加する変位制御で行い、各ステップの繰返し回数は1回とした。層間変形角は図-1に示す隔壁上部(A点)と底版上面(B点)の相対水平変位を試験体の高さ(AB間の距離=2.275m)で除した

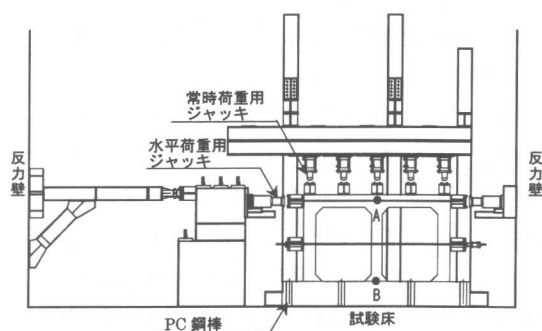


図-1 載荷装置

2. 実規模載荷実験

2.1 実験概要

図-1に載荷装置を示す。この実験では、試験

*1 東京電力(株) 原子力技術部土木調査グループ 工修(正会員)

*2 東電設計(株) 技術開発本部土木技術部(正会員)

*3 (株)大林組 技術研究所土木耐震構造研究室 工修(正会員)

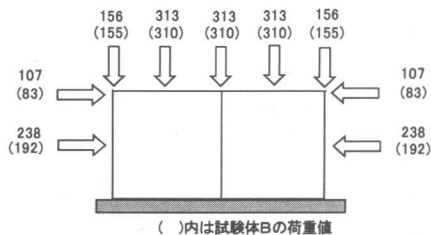


図-2 常時荷重 (単位: kN)

表-1 コンクリートの物性

試験体	部位	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
試験体A	側壁、隔壁	27	2.2	27
	頂版	23	1.8	23
試験体B	側壁、隔壁	28	2.3	28
	頂版	25	2.0	25

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

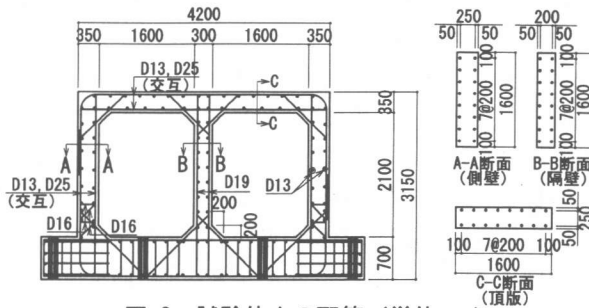


図-3 試験体 A の配筋 (単位: mm)

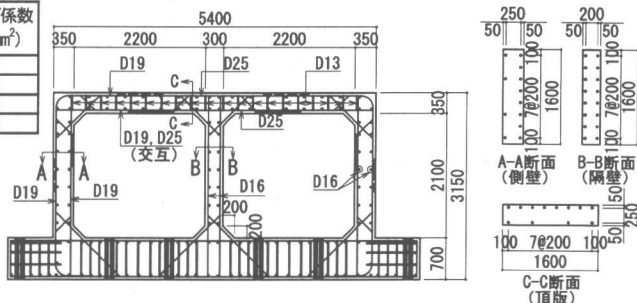


図-4 試験体 B の配筋 (単位: mm)

値とした。

図-2 に常時荷重を示す。常時荷重は、予備解析結果に基づき頂版および側壁に作用する土圧(分布荷重)を模擬できるように集中荷重に置き換えている。常時荷重による軸圧縮応力度は隔壁で約 1.3MPa、側壁では約 0.6MPa となる。なお、鉛直荷重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、鉛直荷重による水平方向力はほとんど発生しない。

図-3 および図-4 に試験体の形状寸法と配筋を示す。試験体 A は幅 4.2m、高さ 2.45m、奥行 1.6m (底版は 1.9m) で、部材厚は隔壁 30cm、側壁および頂版は 35cm である。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のみスターラップと折曲鉄筋を配置した。

試験体 B は試験体 A より 1.2m 広く、引張鉄筋比は隔壁 0.40%、側壁 0.24~0.48%、頂版では 0.24%~0.84% であり、全体として試験体 A より

少ない鉄筋量である。頂版にはせん断補強鉄筋比 0.13% のスターラップを配置した。

表-1 および表-2 に材料の物性値を示す。コンクリートの物性値は、実験終了後に隔壁のせん断破壊部近傍および頂版からコア抜きした円柱供試体を用いて測定した。

2.2 実験結果

(1) 水平荷重-水平変位履歴

図-5 および図-6 に水平荷重-水平変位(層間変形角)履歴を示す。図中には鉄筋降伏および部材がせん断破壊した時点も示した。ここで、荷重と変位の符号は左方向水平載荷時を正としている。

試験体 A は層間変形角 8/1000 (18mm) の載荷中に隔壁がせん断破壊して水平荷重が最大荷重の約 25% 低下した。さらに 12/1000 の載荷中に側壁がせん断破壊して荷重低下した。層間変形角が 22/1000 (50mm) に達すると常時荷重を保持できなくなったため載荷を終了した。主鉄筋の降伏は層間変形角 5/1000 で側壁下端から始ま

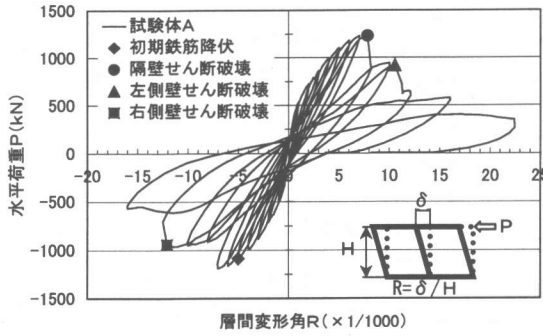


図-5 試験体 A の水平荷重-水平変位履歴

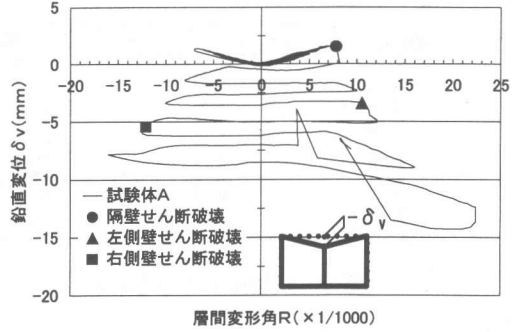


図-7 試験体 A の鉛直変位-水平変位履歴

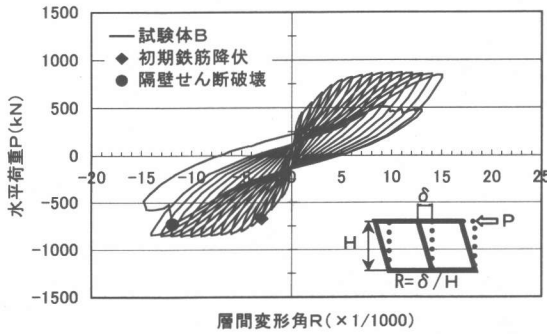


図-6 試験体 B の水平荷重-水平変位履歴

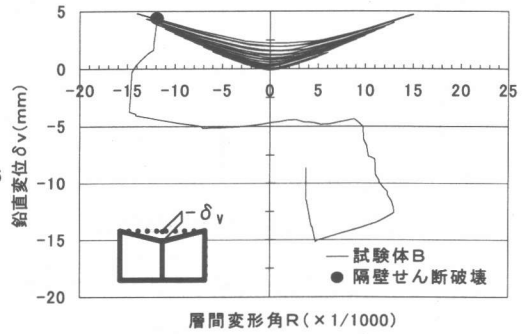


図-8 試験体 B の鉛直変位-水平変位履歴

り、せん断破壊後は頂版端部でも降伏している。

試験体 B は層間変形角 15/1000 (34mm) において隔壁がせん断破壊して最大荷重に対して約 35% の荷重低下を生じ、その直後から頂版の沈下量が急増して常時荷重を保持できなくなった。主鉄筋の降伏は層間変形角 3/1000 で側壁下端から始まり、9/1000 に達した時点では鉛直部材上下端部は全て降伏している。なお、隔壁の主鉄筋は層間変形角 5/1000 で降伏したことから降伏変位の約 3 倍の変位においてせん断破壊したことになる。残留変位は、試験体 A と同様に主鉄筋が降伏すると大きくなるが、部材がせん断破壊した後では著しく増加している。

試験体 B は試験体 A と比較して水平耐力は小さいが延性的な挙動を示した。これは、試験体 B は主鉄筋量が少ないため小さい荷重レベルで鉄筋が降伏し、部材の作用せん断力が試験体 A と比べて小さく、隔壁のせん断破壊が遅れたためと考えられる。

(2) 鉛直変位-水平変位履歴

図-7 および図-8 に頂版中央部 (隔壁接合位置) における鉛直変位と水平変位の履歴を示す。同図には部材がせん断破壊した時点を示した。

試験体 A の頂版中央部は、隔壁がせん断破壊した ($R=8/1000$) 直後から沈下し始め、水平変位が大きくなるにつれて徐々に増加していくことが分かる。これは主として鉛直部材のせん断破壊により鉛直変位が進むためである。実験で計測された頂版中央の最大沈下量は 14mm であり、これを鉛直軸ひずみに換算すれば約 1/160 となる。

試験体 B も部材がせん断破壊するまでは試験体 A と同様に頂版中央部が伸び上がるが、隔壁がせん断破壊した直後から急激に沈み込んで M 型に変形する挙動を示した。実験の最終段階では頂版中央の内側主鉄筋も降伏している。計測された頂版中央の最大沈下量は 15mm であり、鉛直軸ひずみに換算すれば約 1/150 となる。

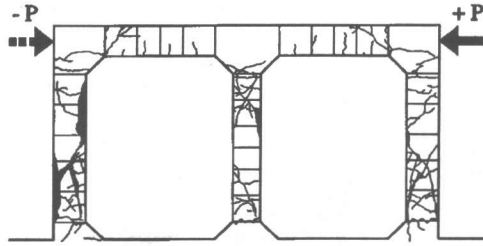


図-9 試験体 A のひびわれ

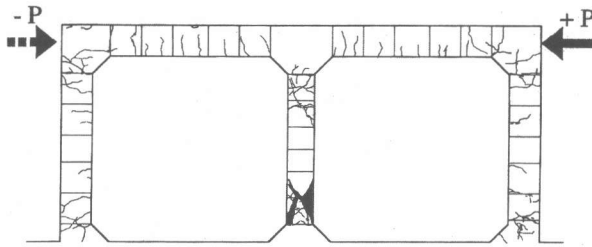


図-10 試験体 B のひびわれ

試験体 B の鉛直変位が急増したのは、水平変形が大きくなってから隔壁がせん断破壊したためにせん断ひびわれ面が上下方向にずれやすいこと、隔壁の主鉄筋が少ないためにダウエル効果が小さいことからせん断破壊後の軸剛性の低下が著しく、さらに、頂版の主鉄筋量が少ないことに加え、内空幅が広いのでたわみが大きくなるためと考えられる。

(3) ひびわれ性状

図-9 および図-10 に実験終了段階のひびわれスケッチを示す。試験体 A の斜めひびわれは、層間変形角 5/1000 前後において隔壁の上下でほぼ同時に発生し、8/1000 の正側載荷で上部の斜めひびわれが急激に進展してせん断破壊した。側壁の斜めひびわれは、スパンのやや中央側で発生しており、特に、スパン中央から外側に向かうひびわれが卓越していた。

試験体 B の斜めひびわれは、隔壁の上下のみに生じており側壁には生じていない。隔壁上部のコア部（部材断面中央部）の斜めひびわれは層間変形角 12/1000 の時点で生じたが、実験終了まで著しい進展はなかった。一方、隔壁下部の斜めひびわれは層間変形角 6/1000 の時点で

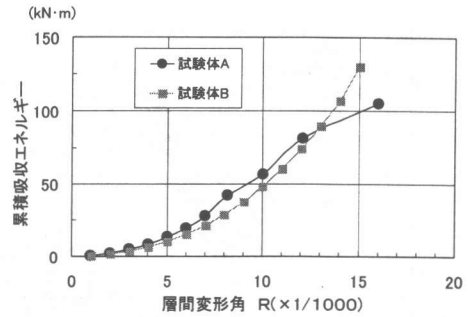


図-11 累積吸収エネルギー

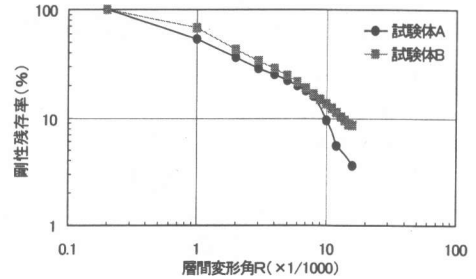


図-12 剛性残存率

発生し、この斜めひびわれが 15/1000 の負側載荷中に急激に開口して荷重低下を生じた。さらに、次のステップの正側載荷（右方向載荷）を行ったところ、これに交差する斜めひびわれが発生して、その後、常時荷重を保持できない状況に至る。

(4) エネルギー吸収

図-11 に試験体の累積吸収エネルギーの比較を示す。ここで、累積吸収エネルギーは水平荷重-水平変位履歴曲線によって囲まれる面積をエネルギー量として、それを累積したものである。隔壁のせん断破壊により水平荷重が低下する直前（試験体 A は $R=7/1000$ 、試験体 B は $R=14/1000$ ）における累積吸収エネルギー量を比較すると、試験体 B は試験体 A の約 3 倍となっている。しかし、常時荷重を保持できた載荷ステップまで（試験体 A は $R=16/1000$ 、試験体 B は $R=14/1000$ ）で比較すれば両者の累積吸収エネルギー量はほぼ同じになっている。

(5) 剛性残存率

図-12 に構造物全体としての剛性残存率の履歴を示す。ここで、構造物の剛性は水平荷重を水平変位で除した割線剛性であり、剛性残存率

はこの割線剛性をひびわれ開始前の割線剛性で除した値とした。

同図より、剛性低下は両試験体ともひびわれ発生から鉄筋降伏までの範囲で著しいことが分かる。主鉄筋降伏時の剛性残存率は試験体 A で 22%、試験体 B では 34%であり、隔壁のせん断破壊後は両試験体とも 10%以下となっている。主鉄筋降伏後は部材がせん断破壊しているが、剛性残存率の変化は比較的小さい。

3. 二次元有限要素解析

3.1 解析概要

試験体の変形挙動を部材の荷重分担率の観点から検討するため、岡村・前川¹⁾が開発した有限要素解析プログラム「WCOMD-SJ」を用いて正負交番繰返し解析を行った。

図-13 に解析モデルの例を示す。試験体は、底版も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。要素分割は、部材の厚さ方向に 3 分割し、部材軸方向は部材厚を目安に分割した。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。

3.2 解析結果

(1) 荷重-変位履歴

図-14 および図-15 に解析と実験の荷重-変位履歴の包絡線を示す。同図から、解析は隔壁がせん断破壊によって荷重低下するまでの範囲において実験結果を再現できている。

(2) ひびわれ性状

図-16 および図-17 に解析における水平荷重低下後のひびわれ分布を示す。実験では主に部材端部に曲げひびわれが集中していたが、解析でもその傾向を再現できている。また、実験では図-9 および図-10 に示したように隔壁で明確な斜めひびわれが現れているが、解析でも隔壁の斜めひびわれが大きく進展しており、両者の結果はよく一致している。

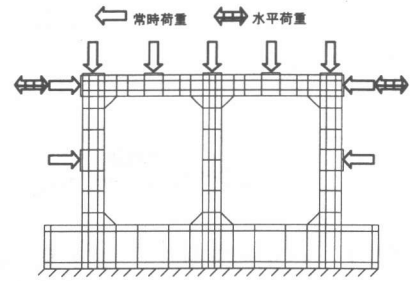


図-13 解析モデル(試験体 A)

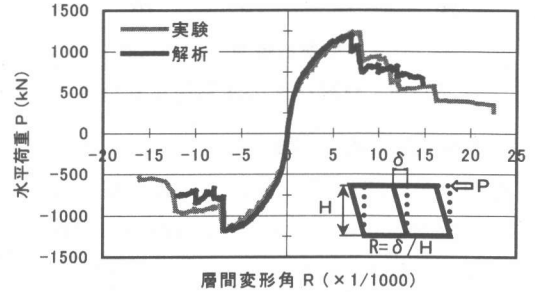


図-14 試験体 A の荷重-変位履歴の比較

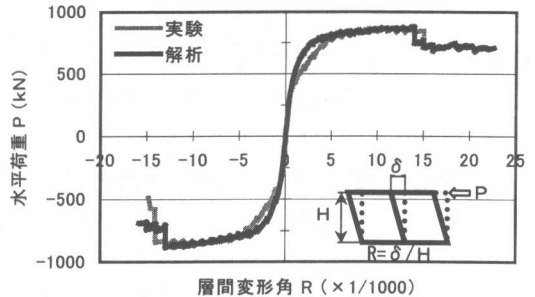


図-15 試験体 B の荷重-変位履歴の比較

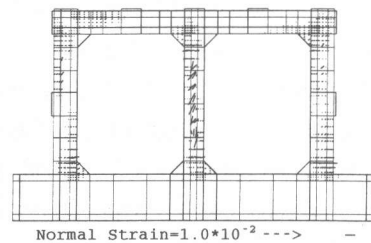


図-16 試験体 A のひびわれ分布 (R=8/1000)

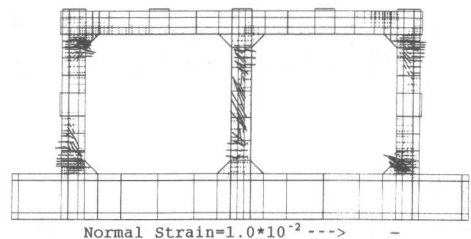


図-17 試験体 B のひびわれ分布 (R=14/1000)

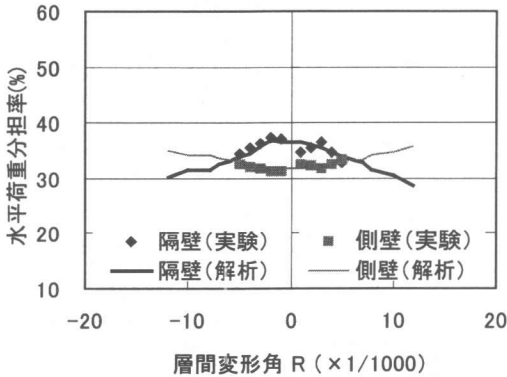


図-18 試験体 A の水平荷重分担率

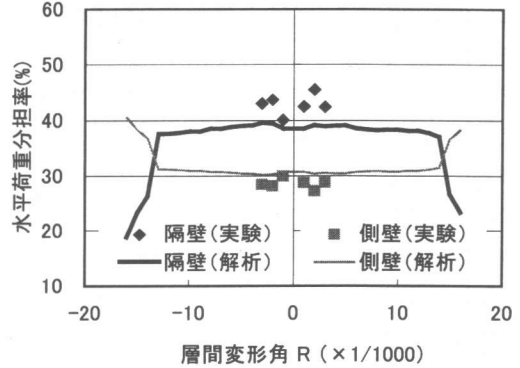


図-19 試験体 B の水平荷重分担率

(3) 水平荷重の分担率

図-18 および図-19 に隔壁および側壁の水平力の分担率を示す。実験の荷重分担率は平面保持を仮定して主鉄筋の計測ひずみから曲げモーメントを推定し、その変化率から求めたせん断力の割合である。ただし、斜めひびわれ発生後や鉄筋降伏後はこの推定方法に問題があると考えられるため、試験体 A は層間変形角 5/1000 まで、試験体 B は 3/1000 までを表示した。

水平荷重の分担率は、鉄筋降伏前の段階では実験と解析はほぼ一致する。試験体 A、B いずれも隔壁の分担率が大きく、試験体 A では 35~38%、試験体 B は 38~40% である。試験体 A の分担率は水平変位の増加に伴い徐々に変化し、せん断破壊後は隔壁と側壁の分担率の大小関係が逆転する。試験体 B の分担率も試験体 A と同様の傾向を示すが、水平変位の増加に伴う分担率の変化はやや緩やかである。荷重分担率が逆転するときの層間変形角は試験体 A で約 7/1000、試験体 B では約 14/1000 であり、実験において隔壁のせん断破壊による荷重低下点とほぼ一致している。

以上より、荷重分担率の変化から構造物の水平荷重低下時の変形を予測することも可能と考えられる。

4. まとめ

本研究では、実物大で製作したボックスカルパートの水平載荷実験と材料非線形を考慮した

非線形有限要素解析を行った。本研究の範囲内で得られた主な成果は次のとおりである。

- 1) 主鉄筋量が多い試験体 A は、主鉄筋量の少ない試験体 B と比較して、水平耐力は大きい荷重低下時の変形は小さい。
- 2) 主鉄筋量が少なく内空幅が広い試験体 B は、鉛直部材のせん断破壊直後に沈下量が増加して常時荷重を保持できなくなった。
- 3) 2 試験体の水平耐力および荷重低下時の変形は異なるが、常時荷重を保持できる変形量はほぼ同じであった。
- 4) 剛性残存率は、ひびわれから鉄筋降伏までの範囲で著しく低下し、鉄筋降伏時の剛性残存率は 22~34% となった。
- 5) 材料非線形を考慮した非線形有限要素解析により、部材のせん断破壊とそれに伴う構造物全体系としての耐力低下を適切に表現できる。

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