

実際に使用されてきた地中構造物の 地震時耐力・変形性能に関する研究 -その1 載荷実験に基づく非線形挙動の検討-

橘 泰久¹・佐藤 誠²・秋山伸一³・荒添正棋⁴

¹正会員 中部電力株式会社 土木建築部 (〒461-8680 名古屋市東区東新町1番地)

²正会員 工修 中部電力株式会社 土木建築部 (〒461-8680 名古屋市東区東新町1番地)

³正会員 工博 佐藤工業株式会社 中央技術研究所 (〒103-8639 東京都中央区日本橋本町4-12-20)

⁴正会員 佐藤工業株式会社 中央技術研究所 (〒103-8639 東京都中央区日本橋本町4-12-20)

既設地中構造物の耐震安全性照査手法の向上を目的として、実際に使用してきた地中ボックスカルバートを切り出し、載荷実験を行った。実験に用いた試験体には、材料特性にばらつきが見られた。そこで、実験結果の整理を行い、材料特性のばらつきが構造物の非線形挙動に与える影響について検討した。その結果、次のことがわかった。材料特性のばらつきは構造物の非線形挙動に大きな影響を与えない。交番載荷実験と単調載荷実験で現れる耐力の差は、載荷方法による塑性化進行の差に起因するが、載荷方法が異なっても塑性化進行が一致していれば耐力に差は生じない。一方、同一の材料特性でも、微少な差が塑性化の進行により大きな差に発展し、最終的に異なる破壊過程を示すことがある。

Key Words : non-linear behavior, cyclic loading test, uniform loading test, existing underground structure, earthquake resistant design

1. はじめに

土木構造物の耐震設計法は、許容応力度法に基づく設計法から性能照査型設計法へ移行しつつある。このような状況を眺めると、従来の設計によって構築された既設構造物についても、性能照査型設計法の観点から耐震性を照査する必要があると考えられる。

性能照査型設計法では、耐震性能を規定する上で構造物の損傷まで視野に入れている点に特徴がみられる。したがって、既設構造物の耐震安全性を照査するためには、構造物の非線形挙動や破壊過程の解明が重要になる。

著者らは既設地中構造物の耐震安全性照査手法の向上を目標に、実際に使用されてきた鉄筋コンクリート地中ボックスカルバートをを用いて載荷実験を行ってきた¹⁾²⁾³⁾。この載荷実験は現地で施工され、供用開始後約13年経過した実構造物を用いている点に大きな特徴がある。

載荷実験には、現地のボックスカルバートから切り出された数体の試験体を用いた。ボックスカルバートの材料試験によると、これらの試験体の材料特性にはある程度のばらつきが見られた。ここでは、これまでに行った載荷実験結果を整理し、このような材料特性のばらつきが構造物の非線形挙動、さらには破壊過程にどのような影響を与えるのかについて検討した。

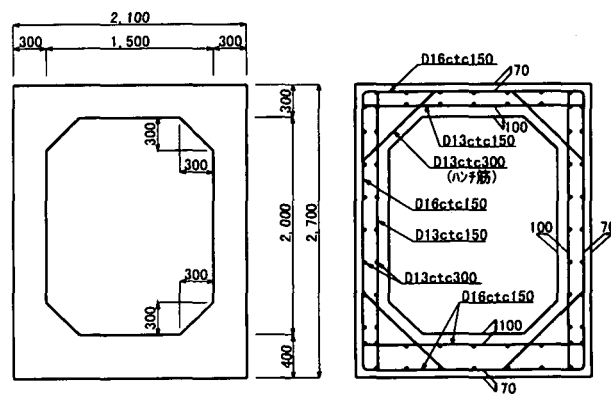


図-1 試験体の形状と配筋

2. 実験の概要

約13年間海水排水路として使用されてきた鉄筋コンクリート地中ボックスカルバートからワイヤーソーイング工法により、奥行き1.05mの試験体を切り出した。この試験体の形状および配筋を図-1に示す。試験体の切り出しに先立ち、構造物の目視調査を行ったが、構造物には有害なひび割れや鉄筋の錆などはみられず、構造物は健全な状態であった。

試験体切り出し位置の概要を図-2に示す。本論文では試験体No.1～No.3による実験を対象とする。試験体No.1およびNo.2は施工目地の左側で切り出したのに対し、試

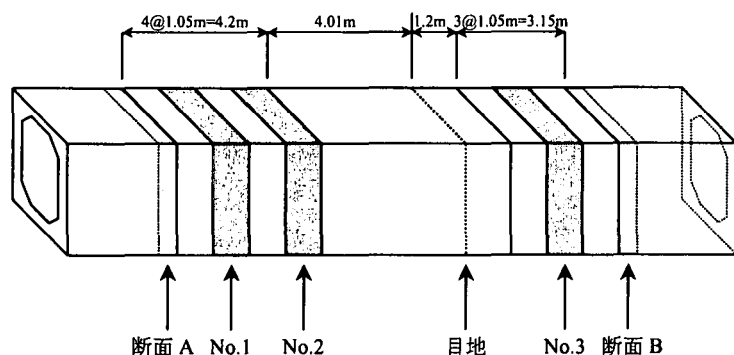


図-2 試験体切り出し位置の概要

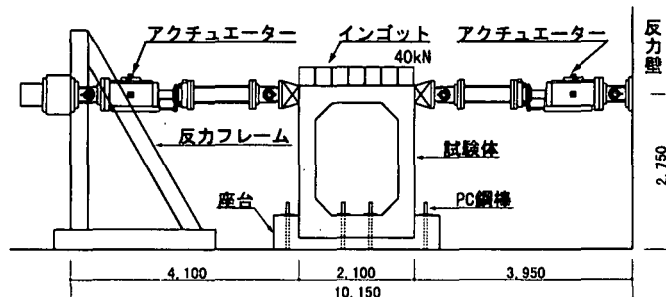


図-3 荷重装置の概要

試験体No.3は右側で切り出した。そこで、施工目地を挟んだ両側の断面Aおよび断面Bからコンクリートコアを採取し、材料試験を行った。その結果を表-1に示す。

表-1によると、コンクリートの物性値は断面Aと断面Bで強度に違いがみられる。これは目地を挟んで断面A側と断面B側で施工時期が異なったことに起因しているものと考えられる。また、ボックスカルバートの部材毎の物性値も異なる。断面Aと断面Bの圧縮強度は共に、側壁で最も高い。これは、通常の施工では、側壁と頂版を同時に打設するため、側壁のコンクリートは頂版に比べて強く拘束されることに起因していると考えられる。

さらに、鉄筋の材料試験結果を表-2に示す。鉄筋については、施工目地を挟んだ両側で同一の材種が用いられていることを確認している。したがって、試験体No.1～No.3の鉄筋の物性値は同一であると考えられる。

実験に用いた荷重装置の概要を図-3に示す。本実験では、土被り厚さ1mの上載土荷重を模擬するために、試験体上面に合計40kNのインゴットを並べた。また、地震時のせん断変形を模擬するために、側壁上端部に設置した変位制御型アクチュエーター2台から圧縮力のみ与えた。本論文では図中の左方向への荷重を正方向荷重、また、その反対を負方向荷重とする。

実験ケースを表-3に示す。交番荷重実験は、2回の正負交番とし、徐々に変位量を増やし、構造物がせん断破壊するまで荷重を繰り返した。一方、単調荷重実験では初めに部材が塑性化するまで負方向に荷重した後、構造物が破壊するまで正方向に荷重した。

表-1 コンクリートの物性値

部材		断面 A	断面 B
頂版	圧縮強度(N/mm ²)	27.4	25.5
	引張強度(N/mm ²)	2.39	2.74
	弾性係数(kN/mm ²)	35.6	34.0
側壁	圧縮強度(N/mm ²)	37.2	35.5
	引張強度(N/mm ²)	3.10	2.94
	弾性係数(kN/mm ²)	33.0	32.5
底版	圧縮強度(N/mm ²)	25.1	29.0
	引張強度(N/mm ²)	2.16	2.50
	弾性係数(kN/mm ²)	29.9	32.2

表-2 鉄筋の物性値

D13(SD345)	降伏強度(N/mm ²)	381.9
	弾性係数(kN/mm ²)	171.3
D16(SD345)	降伏強度(N/mm ²)	379.3
	弾性係数(kN/mm ²)	164.0

表-3 実験ケース

実験ケース	試験体 No.	荷重方法
実験-1	No.1	交番荷重
実験-2	No.2	交番荷重
実験-3	No.3	単調荷重

3. 実験結果の概要

荷重実験において、試験体の頂版中央で計測された変位と荷重の関係を図-4に示す。また、実験終了後のひび割れ状況を図-5に示す。図中の太線は試験体の破壊の原因となったせん断ひび割れを示す。

実験-1では、正負ともに水平変位18.5mm(部材変形角1/100rad)の時に最大耐力(正側で386kN, 負側で363kN)を示した。さらに、変位が増すにつれて徐々に耐力は低下し、水平変位74mm(1/25rad)付近に達したところで左側壁下端部付近にせん断破壊が発生した。

実験-2では、正負ともに水平変位が18.5mm(1/100rad)の時に最大耐力(正側で378kN, 負側で367kN)を示した。さらに、変位を増すにつれて徐々に耐力は低下し、74mmの2サイクル目の途中である正側65.3mmで上床版中央部付近でせん断破壊が発生した。

実験-3では部材の塑性化が進行した状況での単調荷重を試みた。上述の交番荷重実験によると、水平変位が18.5mm(1/100rad)で最大耐力を示した後に耐力が低下するため、この付近では部材が塑性化すると判断し、最大耐力を示す変位の2倍となる37mm(1/50rad)まで負方向に荷重した後、試験体が破壊するまで正方向に荷重した。

負方向に37mmまで水平変位を与えた時の耐力は435kNであった。一方、正方向荷重に移ると最大耐力は36mmの時に340kNであった。その後、耐力の大幅な低下が見られないまま100mm付近まで変位を与えたところ、左側側壁下端部にせん断破壊が発生した。

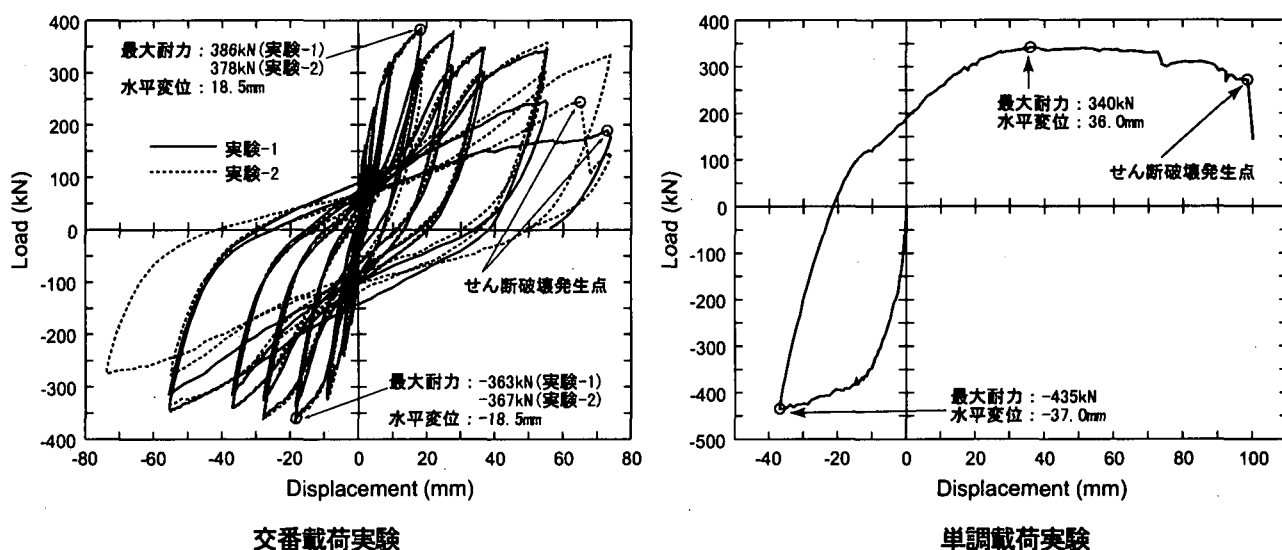


図-4 試験体頂版中央における荷重・変位曲線

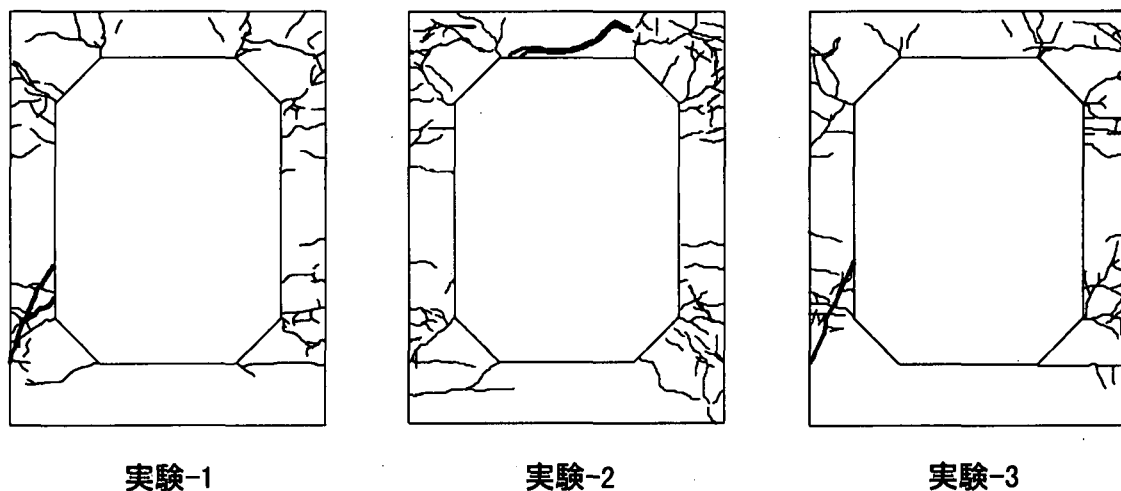


図-5 試験体のひび割れ状況

4. 実験結果の比較と考察

まず、材料特性が同一と考えられる試験体No.1とNo.2を用いた交番載荷実験(実験-1, 実験-2)の結果を比較する。図-4の荷重・変位曲線を見ると、確かに最大耐力となる水平変位18.5mm(1/100rad)を過ぎ、37mm (1/50rad)までの履歴曲線は極めて良く一致している。ところが、水平変位37mmのサイクルを越えると、両者は次第に異なる履歴曲線を描くようになる。そして、最終的には異なる載荷サイクルでかつ異なる部材でせん断破壊に至る。

これらの結果から、材料特性が同一であれば、最大耐力を越えて次第に耐力が低下する付近までは非線形挙動に大きな差異は見られない。本実験の場合、水平変位で37mm(1/50rad)までの範囲がこれに相当する。

一方、同じ材料特性であっても、例えば、ひび割れの発生位置などは両者で微妙に異なる。実験初期に現れるこうした微妙な差は、最大耐力時の変位程度までは荷重変位曲線に大きな影響は与えない。しかし、水平変位

が37mmを越えて部材の塑性化が深く進行した状態に至ると、次第に差が大きくなり、その結果、最終的に両者は異なる終局状態を迎えたと考えられる。

つぎに、試験体No.1, No.2とは材料特性が異なる試験体No.3を用いた単調載荷実験(実験-3)を交番載荷実験(実験-1, 実験-2)の結果と比較する。図-6には単調載荷実験と交番載荷実験による荷重・変位曲線包絡線を示す。図中、負方向載荷側の包絡線は正側に反転して示す。図-6によると、水平変位が0mmから9.3mm(1/200rad)程度までの区間では単調載荷実験による負方向載荷の曲線と交番載荷実験による包絡線が良く一致している。したがって、この区間では載荷方法の違いや材料特性のばらつきによる影響は小さいと考えられる。

ところが、水平変位が9.3mm(1/200rad)を越えると、これらの曲線は載荷方法によって互いに差が現れる。ここで、水平変位18.5mm(1/100rad)における耐力に注目すると、繰り返し載荷の影響を含まない単調載荷実験の負方向載荷が最も大きく約400kN、次に交番載荷実験の正方向載

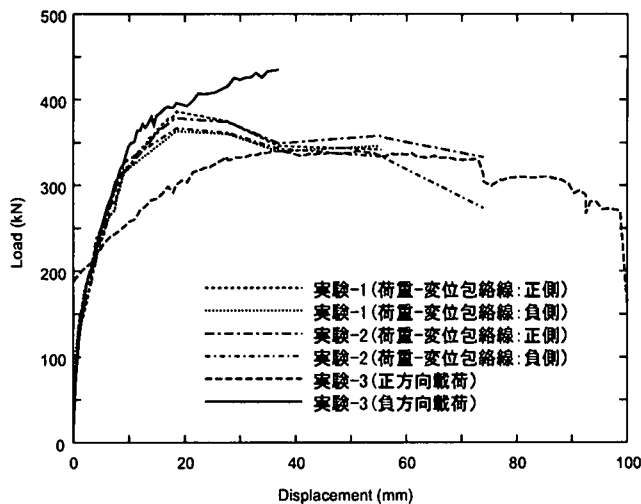


図-6 単調載荷実験と交番載荷実験の比較

荷で約380kNとなり、繰り返し載荷の影響を最も多く受ける交番載荷試験の負方向載荷が最も小さく約360 kNとなる。ここからさらに変位が増大すると、単調載荷実験の耐力は水平変位37mm(1/50rad)まで増加を続けたが、交番載荷実験では18.5mmから耐力が低下する。

荷重-変位曲線にこのような差が現れるのは、載荷方法によって構造物の塑性化の進行が異なることに起因する。すなわち、単調載荷実験では交番載荷実験に比べて、塑性化の進行が少ないために、同一変位における耐力は交番載荷実験よりも単調載荷実験の方が高い。

さらに、水平変位が37mm以上の曲線に目を向けると、単調載荷実験による正方向載荷の耐力は340kN付近で一定になる。一方、交番載荷実験による包絡線では耐力の低下が収まり、しかも単調載荷実験の曲線に重なっている点が注目される。

図-5によると、3体の試験体の状況は最終的なせん断ひび割れなど多少の差異はあるが、概略的に見れば同じようなひび割れ分布である。すなわち、この区間では上述した載荷方法の違いによる塑性化の進行に差はなく、3体の試験体が同一の状態にあると考えられる。そのため、単調載荷と交番載荷の差があるにも関わらず、両者の曲線は互いに重なり合う。さらに、これらの結果には、単調載荷実験と交番載荷実験の間で材料特性のばらつきに起因する差は見られない。

以上の結果をまとめると、材料試験結果に見られる材料特性のばらつきは、鉄筋コンクリート構造物の非線形挙動に大きな影響を与えない。また、交番載荷実験と単調載荷実験で耐力に差が現れるのは、載荷方法の違いによって生じる塑性化の進行の差に起因する。換言すれば、載荷方法が異なっても、塑性化の進行が一致していれば、耐力に差は生じない。これらの結果は既設構造物の耐震安全性を検討する上で重要な知見であると考えられる。一方、同一の材料特性と言っても微少な差は存在

し、塑性化の進行に伴ってこれが大きな差に発展し、最終的に異なる破壊過程を示す場合があることは注目すべき点であろう。構造物の破壊過程解明を進める上で、この点は、今後さらに検討を要すると思われる。

5. まとめ

実物の地中ボックスカルバートを試験体に用いて載荷実験を行った。その結果は次のとおりである。

- (1) 試験体に用いた実物のボックスカルバートの物性値には部材毎に変化が見られた。また、施工目地を挟んだ両側で切り出された試験体相互の物性値には1割程度のばらつきが見られた。このような材料特性の差異は施工時の影響により現れたと考えられる。
- (2) 載荷実験の結果を比較検討したところ、上記の材料試験に見られた材料特性のばらつきによる影響は実験結果には見られなかった。この結果は、既設構造物の耐震安全性を照査する上で、重要な知見であると考えられる。
- (3) 試験体の材料特性が同一であり、かつ同一の交番載荷による2つの実験を行ったところ、最大耐力を過ぎて耐力が低下する付近までの履歴曲線は同等であった。しかし、最終的には異なる部材でせん断破壊が発生した。これは2つの試験体に現れた初期の微少な差が塑性化の進行に伴い大きな差に発展したためと考えられる。
- (4) 交番載荷実験と単調載荷実験で耐力に差が現れるのは、載荷方法の違いによって部材の塑性化の進行に差が現れるためである。一方、載荷方法が異なっても塑性化の進行が一致していれば両者に差は生じない。

参考文献

- 1) 平松住雄, 橋泰久, 秋山伸一, 荒添正棋: 実際に使用されてきた地中構造物を用いた地震時耐力・変形性能照査に関する載荷実験, 第1回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, 土木学会技術推進機構, pp.175-178, 2000.
- 2) 橋泰久, 平松住雄, 秋山伸一, 荒添正棋: 実際に使用されてきた地中構造物の載荷実験, 第55回土木学会年次学術講演会概要集, I-B141, 2000.
- 3) 荒添正棋, 平松住雄, 秋山伸一, 橋泰久: 実際に使用されてきた地中構造物の変形性能に関する検討, 第55回土木学会年次学術講演会概要集, I-B144, 2000.
- 4) コンクリート標準示方書・設計編, 土木学会, 1996.
- 5) 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 許容応力度設計法, 日本建築学会, pp.57-59, 1999.