

実際に使用されてきた地中構造物の 載荷実験に基づく非線形挙動の検討

中西浩和¹・橘 泰久²・秋山伸一³・荒添正棋⁴

¹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)

²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)

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)

Cyclic loading tests and a uniform loading test were conducted for clarifying the strength and ductility of the existing underground structure. Some test pieces were cut off from the structure by wire saw. Compressive strength of the test pieces included scattering about 10 percents from the average. This scattering came about due to concrete placing on execution. We examined how this scattering influences the relationship between load and deformation of these test pieces. It was found that this relationship of the test pieces is independent of the scattering until the resistance force drops. On the other hand, very small difference of initial crack was extended to big one on large deformation of the test pieces and shear failure arose on different member of the test pieces.

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従来の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。このような状況を見ると、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安全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見られる。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照査手法の向上を目的として、これまで実際に使用されてきた鉄筋コンクリート製地中ボックスカルバートを用いて載荷実験を行ってきた¹⁾²⁾。この実験では、実験用に製作された試験体ではなく、現地で施工された実構造物を用いている点、しかもこの構造物は供用開始後約13年が経過している点に大きな特徴がある。

この載荷実験には実物のボックスカルバートのうち、約20mの区間から試験体を数体切り出して用いている。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る。ここでは、これまでの載荷実験結果を整理し、このような材

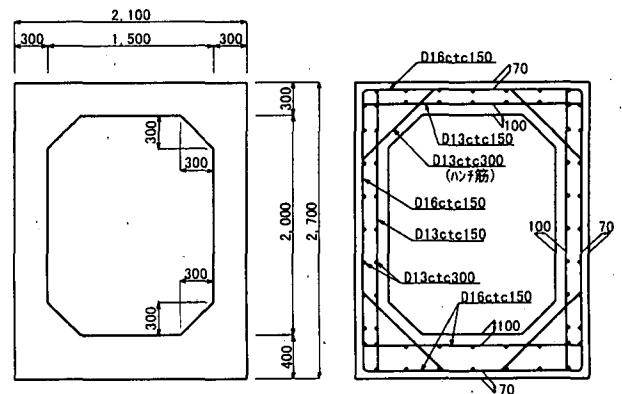


図-1 試験体の形状と配筋

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。

2. 実験の概要

(1) 試験体

実験には約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製の地中ボックスカルバートを現地にて切り出し、試験体として用いた。実験に用いた構造物の形状および配筋を図-1に示す。試験体切り出しに先立ち、構造物の目視調査を行ったが、ボックスカルバート内部

表-1 コンクリートの物性値

		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

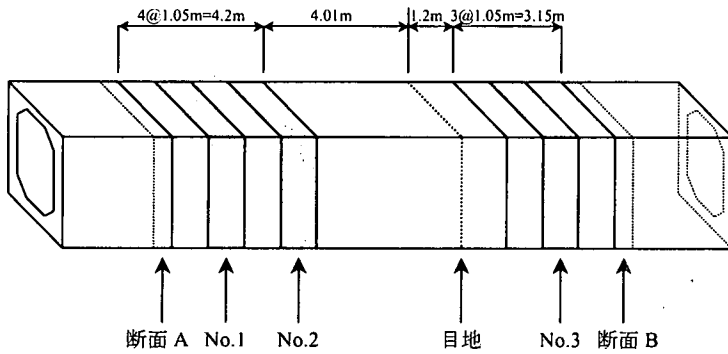


図-2 試験体切り出し位置の概要

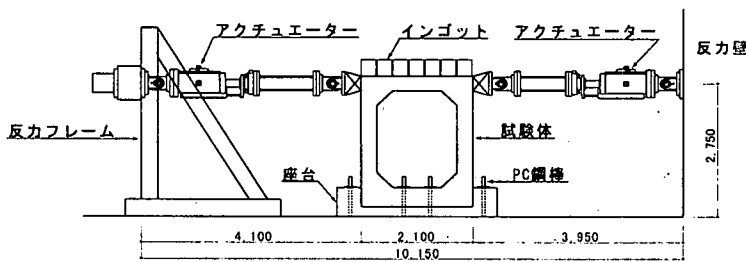


図-3 荷重装置の概要

には貝殻の付着やかたつて水路内部を流れていた海水面の跡が変色していたものの、構造物には有害なひび割れや鉄筋の錆などは見られず、構造物は健全な状態であった。

この構造物から試験体を取り出すために、電磁波レーダーを用いて構造物断面内部の鉄筋位置を測定した。この結果に基づき、次に主筋に当たらない位置の横断面をワイヤーソーイング工法により切断し、奥行き1.05mの試験体を取り出した。試験体切り出し位置の概要を図-2に示す。図中に示すボックスカルバート横断方向の実線が切り出し位置を表す。また、断面Aと断面Bは試験体の物性値を調べるための材料試験に用いるコンクリートコアの採取位置を示す。

図-2に示すように、試験体は施工目地を挟んで左側から4体、右側から3体の合計7体を切り出している。このうち、本論文では試験体No.1～No.3の3体を用いた実験を対象とする。ここで、試験体No.1およびNo.2は施工目地の左側で切り出されたのに対し、No.3は右側で切り出された試験体である。そこで、施工目地を挟んだ両側の断面Aおよび断面Bから採取したコンクリートコアを用いて材料試験を行った。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ボックスカルバートの部材毎に異なる。特に、圧縮強度は側壁で最も高い。通常の施工では、ボックスカルバートのコンクリートを打設する場合、まず、底版を打設し、養生後、側壁と頂版を同時に打設する。したがって、側壁のコンクリートは打設により頂版に比べて強く拘束されるため、圧縮強度が高くなったものと考えられる。

また、断面Aと断面Bの物性値を比較すると、頂版と

側壁では断面Aでの圧縮強度が高いが、底版では断面Bの方が高い。そして、これらの断面における物性値のばらつきは総じて1割程度である。このように、本試験体は実験用に製作された試験体とは異なり、現場施工による影響を反映しているという特徴を有する。

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。

(2) 荷重方法

実験に用いた荷重装置の概要を図-3に示す。本実験では現地における土被り厚さ1mの上載土荷重および地震時に地盤から与えられるせん断変形を考慮して荷重した。上載土荷重については試験体上面に合計40kNのインゴットを並べ、等分布荷重として荷重した。一方、水平方向には側壁上端部に設置した変位制御型油圧アクチュエーター2台を用いて圧縮力を交互に加えることにより、地震時のせん断変形を模擬した。なお、本論文では右側のアクチュエーターによる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呼ぶ。

表-3に実験ケースを示す。表-3より、ここでは交番荷重実験と単調荷重実験を取り上げる。交番荷重実験では正方向荷重から開始し、目標変形に対する正負交番荷重を2回繰り返した後、新しいステップに移り構造物が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

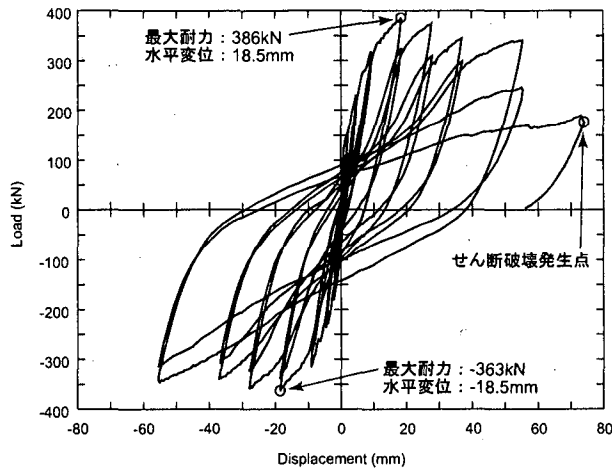


図-4 頂版中央の荷重-変位曲線 (実験-1)

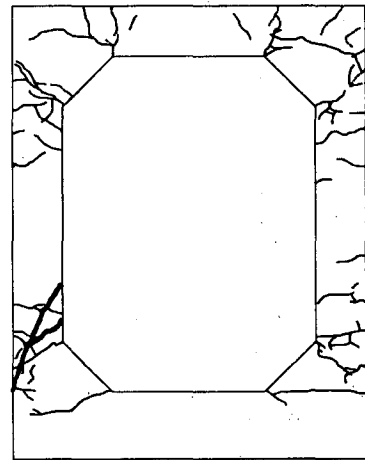


図-5 ひび割れ状況 (実験-1)

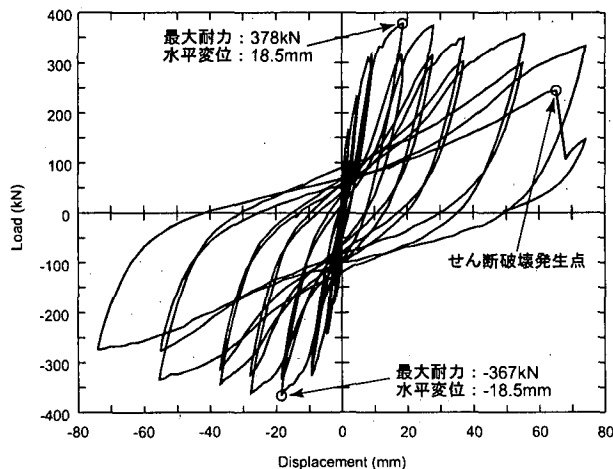


図-6 頂版中央の荷重変位曲線 (実験-2)

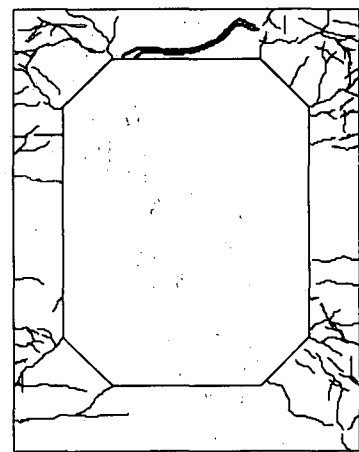


図-7 ひび割れ状況 (実験-2)

物が破壊するまで正方向に荷重した。

さて、交番荷重実験に用いられた試験体No.1とNo.2は、図-2に示すようにどちらも断面A側で切り出されたものであるから、これらの材料特性は同一であると考えられる。したがって、実験-1と実験-2では同様の結果が得られると期待される。一方、単調荷重実験に用いた試験体No.3は断面B側から切り出されたものであるから、前記の試験体とは材料特性が異なる。さらに、荷重方法も異なるために、交番荷重実験の結果とは少なからず差異が現れることも予想される。これらの事柄を念頭に置きながら、次に実験結果を見てゆくことにする。

3. 実験結果の概要と考察

(1) 実験結果の概要

まず、交番荷重実験の結果から見てゆく。実験-1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、実験終了後のひび割れ状況を図-5に示す。また、実験-2による頂版中央の変位と荷重の関係を図-6に、

実験終了後のひび割れ状況を図-7に示す。図-5と図-7において、太線で示されたひび割れ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、最大耐力は正側および負側ともに頂版の水平変位が18.5mm(部材変形角1/100rad)に達したところで発生し、それぞれ386kN、-363kNとなった。ここから水平変位が増加するにつれて構造物の耐力は低下し、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。一方、実験-2においても最大耐力は水平変位18.5mmで発生し、正側で378kN、負側で-367kNとなった。その後、水平変位を増加させると耐力も低下し、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。

つぎに、単調荷重実験の結果を見る。実験-3における試験体頂版中央の変位と荷重の関係を図-8に、実験終了後のひび割れ状況を図-9に示す。

本実験では、通常行われる一方向荷重とともに、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、その後耐力が低下する結果が得られて

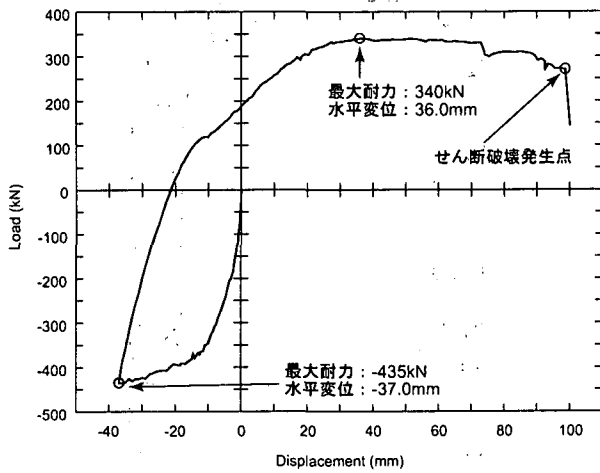


図-8 頂版中央の荷重変位曲線 (実験-3)



図-9 ひび割れ状況 (実験-3)

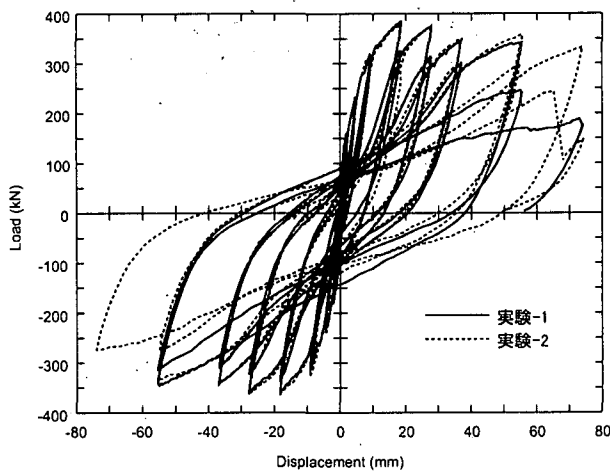


図-10 交番載荷実験の比較

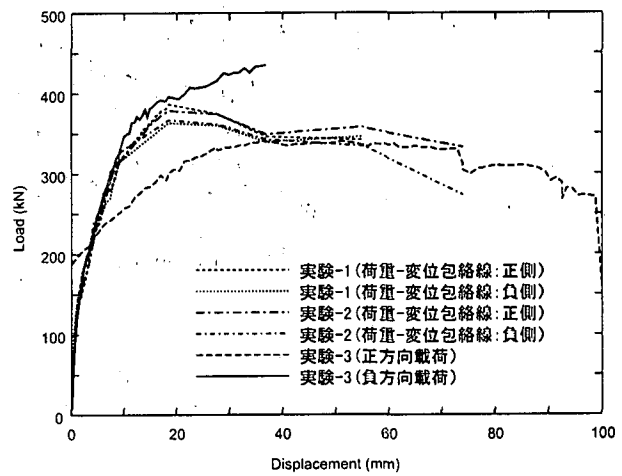


図-11 単調載荷実験と交番載荷実験の比較

いることから、この付近では部材が塑性化していると判断し、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することにした。

実験結果を見ると、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付近まで変位が増加し続けたところ、98mmで左側側壁下端部にせん断ひび割れが現れ、この部分で破壊が発生した。

(2) 実験結果の比較

まず、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-10には図-4と図-6に示した頂版中央の荷重と変位の関係を重ね合わせて示す。これらの実験に用いた試験体の材料特性は、先に述べたように同一と考えられる。そこで、図-10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を過ぎ、37mm (1/50rad)のサイクルまでは荷重-変位曲線のピークおよび履歴曲線の形状ともに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り、さらには荷重-変位のピークにも差が現れるようになる。そして、最終的には異なる載荷サイクルでせん断破壊に至る。しかも、これらのせん断破壊は図-5および図-7に示すように、異なる部材で発生している。

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試験体毎の非線形挙動に差異は見られない。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、骨材の形状や骨材同士のかみ合い方までは一致しないため、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、その後、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、次第に顕著な差に広がる。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.3を用いた単調載荷実験(実験-3)の結果を交番載荷実験(実験-1, 実験-2)の結果と比較する。図-11には単調載荷実験による荷重-変位曲線および交番

載荷実験による荷重-変位曲線の包絡線を示す。ここで、単調載荷実験については、水平変位-37mmまでの負方向載荷による曲線を反転して正側に示し、正方向載荷による曲線は水平変位が正側の部分について示している。このように表示すると、負方向載荷の曲線は初期に塑性化の影響を含まない通常の一方方向載荷曲線として見ることができる。また、交番載荷実験についても、負方向載荷側の包絡線を正側に反転して示している。

図-11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見られない。

ところが、水平変位が9.3mm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ようになる。ここで、水平変位18.5mm(1/100rad)における耐力を見ると、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)まで増加を続けるのに対し、交番載荷実験では37mmまで耐力が低下する。

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、7および9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。これらのことから、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。これらの結果から、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、同一の材料特性であ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ものと思われる。

(3) 破壊過程についての検討

これまでに示してきた実験結果によると、実験-1と実験-3では左側側壁下端部がせん断破壊しているのに対し、実験-2では頂版がせん断破壊している。特に、実験-1と実験-2は試験体の材料特性が同一であり、どちらも交番載荷という同じ載荷方法によっているにも関わらず、最終的には異なる部材が破壊する結果となった。ここでは比較的簡易な骨組み解析を通して、このような差異が現れた原因について検討する。

検討に用いた試験体のモデルを図-12に示す。このモデルは試験体のハンチ部を剛域とした骨組みモデルである。部材の断面定数は表-1、2に示した物性値の平均を考慮して設定した。計算では鉛直方向から自重と上載荷重を作用させるとともに、モデルの右側壁上端部に水平力を作用させた。ここで部材に発生する曲げモーメントが曲げ耐力⁴⁾を越えた箇所を塑性ヒンジとし、さらに荷重を増加させながら部材端部4箇所がすべて塑性ヒンジになるまで逐次計算を行った。

ここでは部材の初期剛性を用いて線形計算を行っているが、実際には実験で見られたように、ひび割れの発生に伴い部材剛性も低下するため、菅野らによる剛性低下率算定式⁵⁾を用いて部材降伏時の断面力から剛性低下率を算出した。その結果、試験体全体で部材剛性の低下率は平均10%程度であったことから、試験体全体の平均的な低下剛性を10%として変位を算出した。

計算から得られる頂版中央の荷重と変位の関係を図-13に示す。骨組み解析結果の曲線に示された数字は塑性ヒンジとなる位置を示す。また、この図には比較のため、図-11に示す実験結果の曲線のうち最大耐力付近までの包絡線も合わせて示す。

図-13において、解析結果を実験結果と比較すると、解析から求められる耐力は実験から得られた耐力よりも1~2割程度低い値を示す。ただし、荷重-変位曲線の形状を比べると、解析結果は実験結果と同様な傾向を示している。したがって、実験結果に対する概略検討としてはこのような解析も妥当であると考えられる。

さて、骨組み解析では塑性ヒンジが形成される位置がすべて側壁であり、頂版は含まれない。そこで、塑性

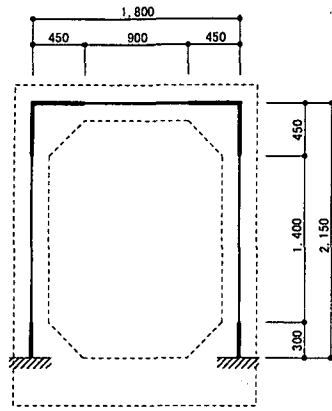


図-12 骨組みモデル

表-4 塑性ヒンジ形成時のせん断力とせん断耐力の比較

No.	側壁		頂版		
	位置	S (kN)	S_u (kN)	S (kN)	S_u (kN)
①	右側壁上	116	164	136	203
②	左側壁下	149	212	151	206
③	右側壁下	141	199	162	207
④	左側壁上	200	222	207	211

S: 発生せん断力, S_u : せん断耐力

ヒンジが形成されるときは側壁部のせん断力およびせん断耐力とともに頂版におけるせん断力とせん断耐力を表-4に示す。表-4によると、塑性ヒンジが形成される時の発生せん断力はすべての部材でせん断耐力を越えていない。しかしながら、これらのせん断耐力は発生せん断力に対して十分余裕があるとは言えない。

この結果から見て、試験体が大きく変形した状態では、側壁と頂版のどちらにおいてもせん断破壊が起りうると推察される。そして、このような状態の基で、せん断破壊が側壁で起るのかあるいは頂版で起るのかは、先に述べたように、実験初期の段階で現れる微少な差によって決定されると考えられる。

4. まとめ

これまで使用されてきた実物の地中ボックスカルバートを試験体に用いて交番載荷実験および単調載荷実験を行い、試験体および実験結果について比較検討した。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って現れたと考えられる。
- (2) 載荷実験の結果、(1)に示した試験体の材料特性のば

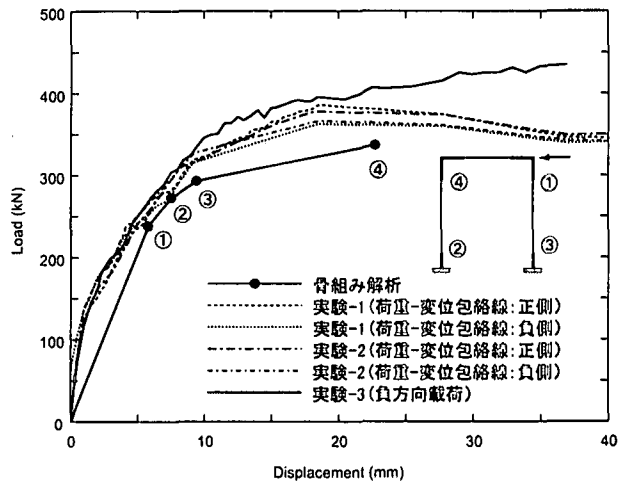


図-13 解析結果と実験結果(包絡線)の比較

らつきによる影響は見られない。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) 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る塑性化の進行の差に起因する。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。
- (4) 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、最終的には異なる部材でせん断破壊を起こした。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。
- (5) 骨組み解析によると、頂版および側壁のせん断耐力は発生せん断力を上回るものの、どちらも十分な余裕はない。この結果から見て、試験体が大きく変形した状態では、側壁と頂版のどちらにおいてもせん断破壊が起る可能性がある。

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, 57-59, 1999.