

鉄筋コンクリート製地中構造物の 変形性状と損傷状態に関わる実験的考察

石川博之¹・末広俊夫¹・金津 努²・遠藤達巳²・松本敏克²

¹正会員 東京電力株式会社（電力中央研究所に派遣中）（〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646）

²正会員 財団法人電力中央研究所 構造部（〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646）

強震下におけるボックスタイプの鉄筋コンクリート製地中構造物の終局限界状態を具現化することを目的として、既往の鉄筋コンクリート製試験体の静的載荷試験結果を再整理・再評価した。構造物の変形に基づく耐震性能照査に資する観点から、試験体のひびわれ発生、鉄筋降伏、被りコンクリートの剥離・剥落等の各損傷状態とその変形性状との関係に着目し考察を行った。その結果、曲げ／せん断の破壊モードに対応した試験体の変形性状、とくに、試験体の耐荷力の低下とそれに関わる損傷状態の関係を明らかにした。

Key Words: in-ground RC culvert, static loading test, plastic deformation, damage, limit state design

1. はじめに

著者らは、鉄筋コンクリート製ボックスカルバートの合理的な耐震設計手法を策定するための基礎資料を得ることを目的に、実構造物の約 3.5 分の 1 の鉄筋コンクリート製試験体を用いた静的載荷試験を実施し、試験体が終局状態に至るまでの非線形挙動並びに限界変形性能について解析的手法を交えて検討している。^{1) 2) 3)}

また、これらを発展させ地盤と構造物の連成を考慮した大型振動台実験並びに非線形数値解析による塑性変形域における挙動評価に関する研究を進めている。⁴⁾

本報では、耐震設計に関わる基準類の改訂動向を踏まえながら、地震時の構造物の終局状態を具現化し、変形に基づく性能照査での限界状態設定の議論に資するために、先の実験的知見を再整理・再評価した。

対象とするボックスカルバート構造は高次の不静定構造物であり、一つの部材が損傷を受けても構造系全体が崩壊に至ることはまれである。部材損傷ではなく構造系の崩壊を限界状態と想定することは、合理的な評価を目指すためには重要なことと考えられる。しかし、構造系の崩壊の状態を特定することは、現状の技術レベルにおいては、実験的にも、解

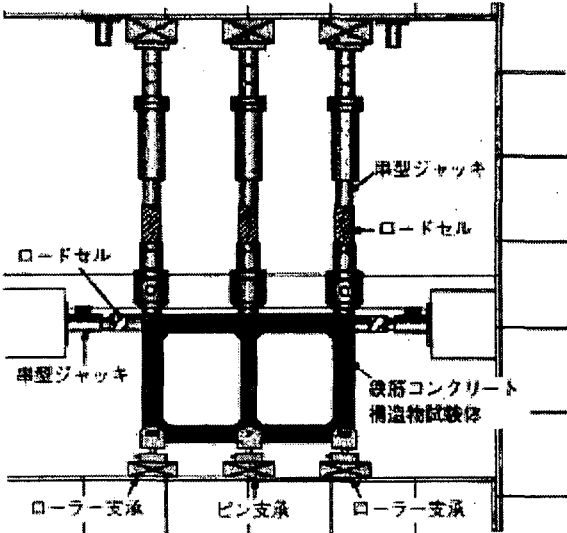


図-1 載荷装置の概略

表-1 実験パラメータ

試験体	載荷方法	上載荷重 (土被り厚)	想定破壊モード [*]
S1	一方向載荷	20m 相当	曲げ破壊
S2	正負交番載荷	20m 相当	曲げ破壊
S3	正負交番載荷	5m 相当	曲げ破壊
S4	正負交番載荷	20m 相当	せん断破壊

析的にも困難な状況にある。そこで、構造系が崩壊に至るまでの損傷過程を詳細に観察し、構造系の崩壊を安全側に回避できる特定の現象で限界状態を定義することは可能と考えられる。このような観点から、構造物の終局限界状態の具現化の議論に資するために、試験体の変形性状と損傷状態との関係を明らかにした。

2. 静的載荷試験の概要

実構造物の約 3.5 分の 1 の大型試験体を用いた静的載荷試験を表-1 に示すとおり 4 ケース実施しており、載荷方法（単調載荷、正負交番載荷）の影響、土被り厚（5m、20m）の影響及び隔壁の配筋仕様の影響等をパラメータとして検討した。

載荷方法は、図-1 に示すとおり、鉄骨フレーム及び油圧ジャッキを組み立てた載荷装置を用いて、鉛直部材頂部に鉛直荷重（土被り荷重を模擬）を載荷した後、頂版に水平荷重（地震時水平荷重を模擬）を作用させ漸増させている。

試験体は、図-2 に示すとおり、高さ 1.48m、幅 2.54m、奥行き 0.4m）とした。配筋は、図-3、図-4 に示すとおり、S1 ～ S3 試験体については実構造物の代表的な配筋量（主引張鉄筋比：約 0.5%，せん断補強筋比約 0.2 ～ 0.3%）とし、S4 試験体については隔壁がせん断破壊するように配筋を調整している。

3. 実験結果の再評価

ここでは、試験結果のうち、試験体の変形性状と損傷状態の關係に着目して考察する。

詳細については、文献¹⁾²⁾を参照されたい。

(1) 曲げ破壊型試験体

S1 ～ S3 試験体については曲げ破壊先行となった。その実験結果を図-5 に示す。(a)には試験体の変形性状と損傷過程を示し、(b)には損傷過程における鉄筋降伏箇所とその順序を示している。

どの試験体の荷重履歴も同じような傾向を示している。すなわち、変形の増大に応じて荷重が増大し、最大耐荷力に到達した後もしくは同程度の荷重を維持できる状態があり、その後、次第に荷重が低下するものの急激に耐荷力を逸することはない。また、損傷状況については、次のような過程を経るこ

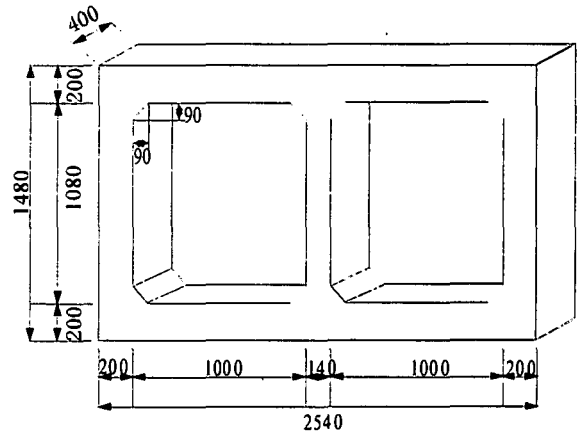


図-2 試験体概要

(単位：mm)

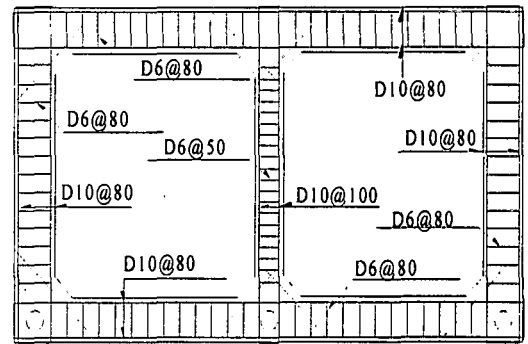


図-3 S1～S3 試験体の配筋

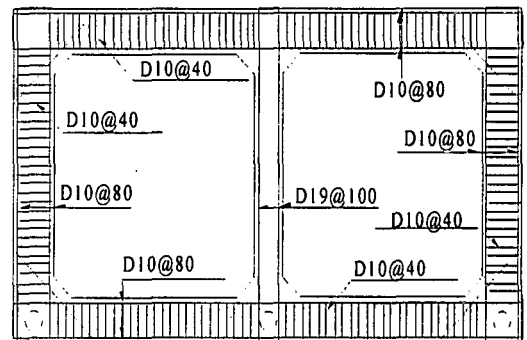
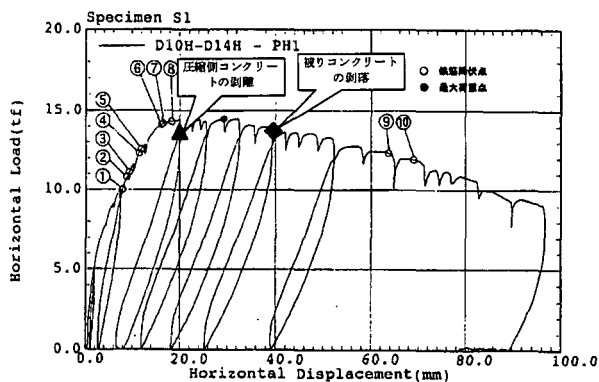


図-4 S4 試験体の配筋

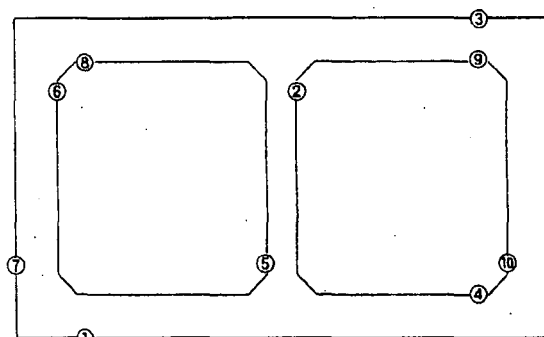
ととなる。

①曲げひびわれの発生→②引張鉄筋に降伏発生→③多くの隅角部で引張鉄筋が降伏→④被りコンクリートの剥離発生→⑤被りコンクリートの剥落→⑥圧縮鉄筋の座屈発生

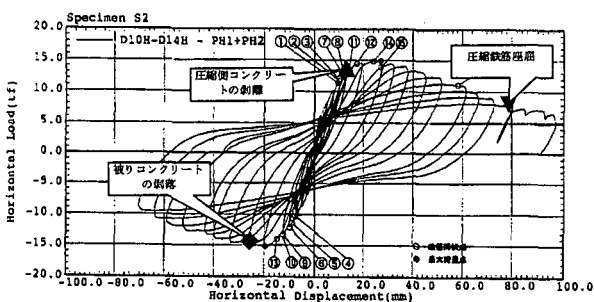
各ケースの相互比較を容易にするために、試験体の隔壁上下端間の水平相対変位を試験体高さで除した無次元量（層間変形角）と、荷重を無次元量（水平荷重／最大荷重）として変形特性を整理した。



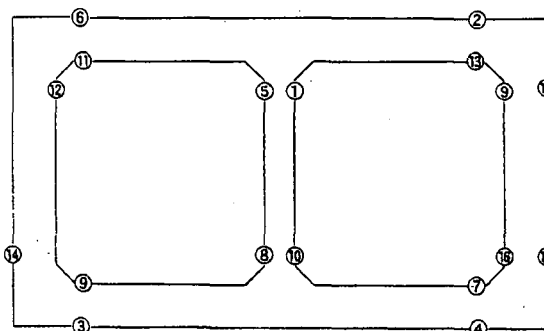
(a-1) S1試験体の荷重変位曲線



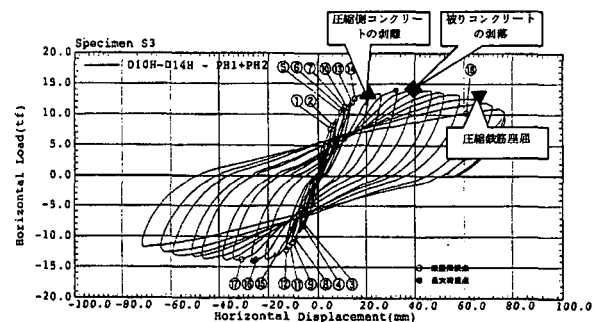
(b-1) S1試験体の鉄筋降伏状況



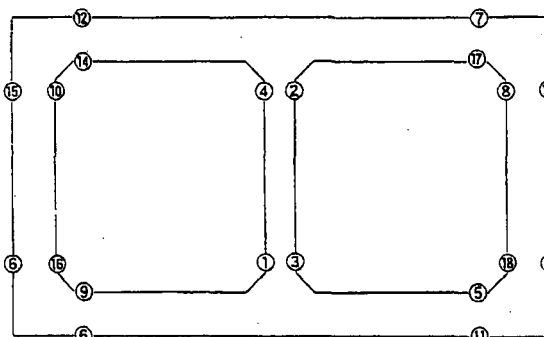
(a-2) S2試験体の荷重変位曲線



(b-2) S2試験体の鉄筋降伏状況



(a-3) S3試験体の荷重変位曲線



(b-3) S3試験体の鉄筋降伏状況

図-5 曲げ破壊試験体の

耐力および変形特性

図-6 に無次元化された荷重－変位曲線を示す。最大耐力に至るまでの領域では、載荷方法によらず試験体の履歴形状は変わらない。また、試験体の変形性状と損傷状態の関係は、以下のように評価できる。

- ・ ほぼすべての隅角部で塑性ヒンジを形成した後に最大耐力に達する。これは、被りコンクリートが剥離し始める時点とほぼ同時である。
- ・ 被りコンクリートが剥落しても、耐力力が低下し始める。
- ・ 圧縮鉄筋が座屈しても、鉛直荷重を保持しており試験体は崩壊しない。

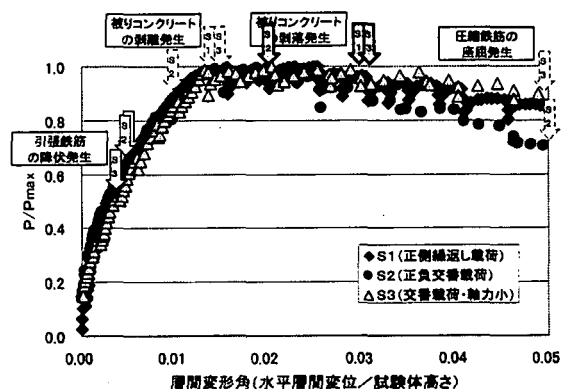


図-6 試験体の変形性状と損傷状態の対応

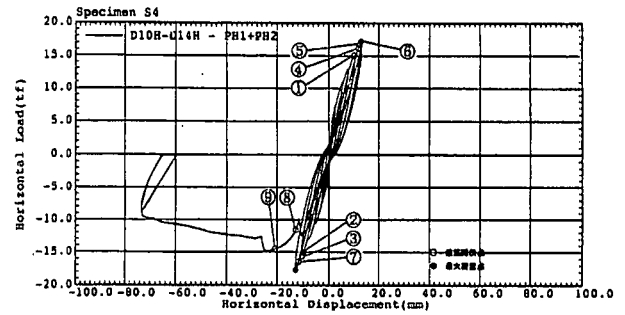
(2)せん断破壊型試験体

試験体 S4 についてはせん断破壊先行型となった。その実験結果を図-7に示す。

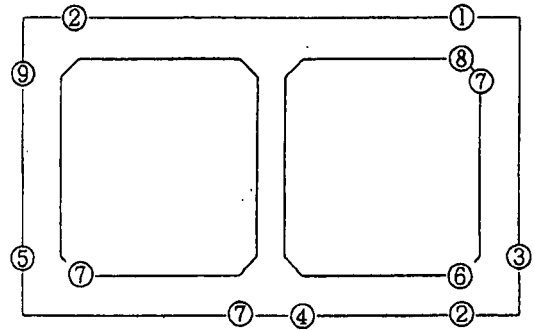
試験体の損傷状況は、曲げ破壊先行型の試験体とは大きく異なり、荷重が最大耐力到達と同時に急激に低下し、隔壁部分にせん断破壊が生じている。曲げ破壊先行型の試験体の履歴と比較して、最大耐力程度程度の荷重を維持できる状態がないのが特徴的である。

隅角部においては、引張鉄筋が降伏し、いくつかの塑性ヒンジが生ずるものの、すべての隅角部に塑性ヒンジが生成する以前に隔壁がせん断破壊を起こしており、塑性変形が小さいうちに耐力を逸している。また、隔壁のせん断破壊時には、斜めひびわれが拡大し、ひびわれ貫通により、ひびわれ面のせん断ずれが生ずるものの、被りコンクリートの剥離・剥落といった事象は生じていない。

したがって、損傷状態とその進展過程は、曲げ破壊型試験体と異なり、塑性変形が小さいうちに急激に耐力力を失ってしまうため、構造物の終局限界状態の具現化においては、破壊モードを考慮する必要があることを裏付ける結果となっている。



(a) S4試験体の荷重変位曲線



(b) S4試験体の鉄筋降伏状況

図-7 せん断破壊試験体の耐力力および変形特性

4. まとめ

鉄筋コンクリート製地中構造物の終局限界状態を具現化することを目的として、ボックス構造を用いた既往の静的載荷試験結果を再整理・再評価した。

構造物の各種損傷状態とその変形性状の關係に着目し考察を行ったが、その結果、曲げ／せん断の破壊モードに応じて構造物の変形性状は大きく異なっていた。各破壊モードに対応した試験体の変形性状、とくに、構造物の耐力力の低下とそれに関わる損傷状態の關係は、以下のように評価できる。

- ・曲げ破壊先行型の場合には、各隅角部に塑性ヒンジを形成し、最大耐力力到達以降も十分な靱性がある。被りコンクリートの剥落した後、耐力力は低下し始める。
- ・せん断破壊先行型の場合には、構造系の塑性変形が小さいうちに部材がせん断破壊し、全体構造系の耐力力が急激に低下する。

参考文献

- 1) 武田智吉, 石川博之, 足立正信: 鉄筋コンクリート製ボックスカルバートの非線形挙動の定量的評価, 電力土木 No.279, pp.72-76, 1999.1
- 2) 本田国保, 足立正信, 石川博之, 長谷川俊明: 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, Vol.21, No.3, pp.1261-1266, 1999.7
- 3) 飯塚敬一, 足立正信, 本田国保, 武田智吉: FEMによるボックスカルバートの非線形挙動の分析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.1267-1272, 1999.7
- 4) 松本敏克, 松尾豊史, 宮川義範, 松本恭明, 岡市明大: RC地中構造物の耐震性能に関する大型振動台実験とその解析(その4) 静的載荷試験による RC 試験体の変形性能, 第 55 回土木学会年次学術講演会