

論文 底面薄肉ボックスカルバートの曲げ載荷試験

小林 三剛^{*1}・松岡 智^{*2}・江良 弘樹^{*3}・川上 洵^{*4}

要旨：本研究は、鉄筋コンクリート製ボックスカルバートの底版部底面を切欠いた場合のひび割れ荷重を明らかにするために曲げ載荷試験を行い、材料非線形及び多方向ひび割れを考慮した非線形解析による結果との比較検討を行ったものである。切欠きの無い従来型と比べて薄肉化を図った場合でも、変位、ひずみ等から、従来型と同等以上のひび割れ荷重が保持できることが明らかになった。底面の切欠きにより基礎地盤との接地面が減少されるため、地盤反力は大きくなるが、地耐力が十分確保できる基礎地盤において、切欠き付き底面薄肉カルバートはその特徴を生かした設計施工が可能であることを示した。

キーワード：カルバート、ひび割れ、地耐力、曲げ、ひずみ、非線形解析

1. はじめに

カルバートは、人道や水路などの地下空間を確保するための構造物であり、許容地盤反力が 200kN/m^2 程度の砂質地盤において図-1のような基礎上に設けられる。¹⁾ 形状や用途によりボックスカルバートの他に、図-2(c)のように門形で底版がなく、側壁の下端にフーチングを設けた構造の門形カルバートなどがある。

しかし、底版のない門形構造とすると、閉合断面でないため全体剛性が低く変形しやすくなることと、地盤反力も大きくなるため、基礎地盤が良好な場所にしか設置できない欠点もある。

一般にカルバートの設計において作用する荷

重は、図-2(a)に示すように、死荷重、活荷重、衝撃、土圧、水圧及び、それらの鉛直荷重に釣り合うような地盤反力などである。特に、カルバートの底版部の設計では、全鉛直方向荷重をカルバートの全外幅で除した等分布の地盤反力として作用させている。²⁾

本研究は、一般的な従来のボックスカルバート図-2(a)及び、切欠き付き底面薄肉ボックスカルバート図-2(b)の曲げ載荷試験³⁾により、底版中央、側壁ハンチ端部におけるひび割れが生じるまでのひずみ及び、ひび割れ発生時の荷重(以下、ひび割れ荷重)の関係を明らかにした。

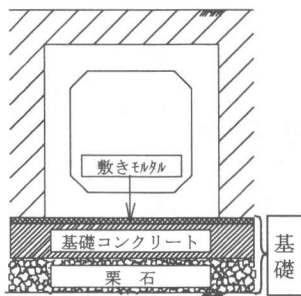


図-1 施工状況

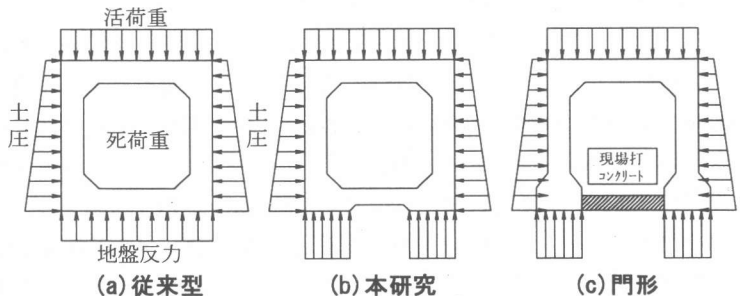


図-2 設計荷重

*1 ランデス(株) 企画開発本部ランデス研究所 工修(正会員)

*2 ランデス(株) 企画開発本部技術開発部 (正会員)

*3 ランデス(株) 企画開発本部ランデス研究所 工修(正会員)

*4 秋田大学 工学資源学部 土木環境工学科 教授 工博(正会員)

表-1 使用材料の物性値 (単位: N/mm²)

(a) コンクリート

| Type | 圧縮強度 | 曲げ強度 | 割裂強度 | 弾性係数 |
|------|------|------|------|--------------------|
| A, B | 36.0 | 4.44 | 2.79 | 3.16×10^4 |
| C | 36.4 | 4.76 | 2.70 | 3.21×10^4 |

(b) 鉄筋

| 材種 | 降伏点 | 引張強度 | 弾性係数 |
|--------|-----|------|--------------------|
| SD295A | 354 | 493 | 1.91×10^5 |

また、切欠き幅を全外幅で除した値を、切欠き幅率 α 、切欠き厚を部材厚で除した値を、切欠き厚率 β と定義し、切欠き幅及び切欠き厚を変化させたときのひび割れ荷重との関係を示し、薄肉化の有効性及び、実用性について検討するものである。

2. 試験概要

2.1 供試体

鉄筋コンクリート製プレキャストボックスカルバートの供試体作製に用いたコンクリート及び鉄筋の材料物性値を表-1に示す。

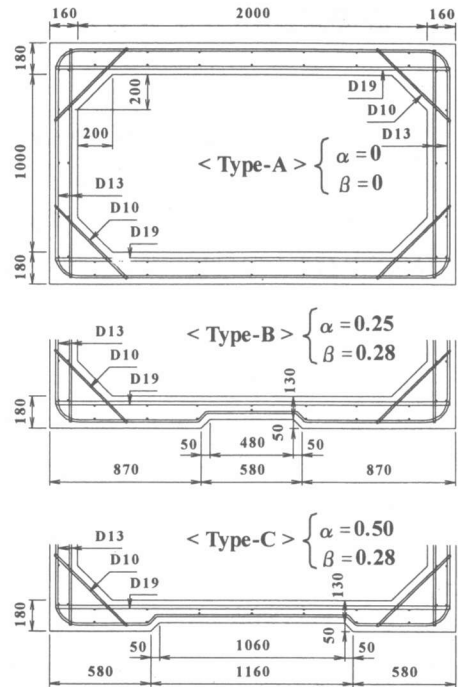
供試体形状、寸法及び配筋を図-3に示す。

内寸法 2000×1000mm 供試体を製作し、側壁厚は 160mm、底版厚は 180mm、ハンチは 200mm、奥行き方向は 500mm とする。従来型の切欠きの無い形状を基準の Type-A とする。

Type-A の底版全外幅 2320mm に対し、底版中央部底面を 580mm ($\alpha=0.25$)幅で切り欠き、薄肉化を行ったモデルを Type-B、1160mm ($\alpha=0.50$)幅で行ったモデルを Type-C とする。Type-B、Type-C 薄肉部の底版厚は 130mm、切り欠き厚は 50mm ($\beta=0.28$)とする。

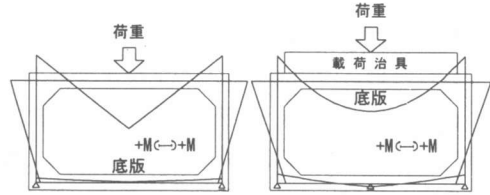
供試体 Type-A 及び Type-B、Type-C の配筋は、従来のボックスカルバートと同様の配筋とする。

各断面で使用する鉄筋は頂底版内 D19-3 本、外側及び側壁内側で D13-3 本とする。また、鉄筋中心かぶりは 40mm 確保できるように設置する。なお、Type-B、Type-C の底面薄肉化により底版厚の変化する部分は、鉄筋を 45 度で折り曲げ加工とする。



ただし Type-B,C は底版部のみ。

図-3 供試体形状及び配筋 (単位: mm)



(a) 線荷重(従来) (b) 分布荷重(本研究)

図-4 曲げモーメント図

2.2 載荷方法

地盤反力が作用するカルバート底版の挙動を再現するために載荷試験を行う。しかし、頂版中央部に線荷重を載荷する従来型のプレキャストボックスカルバートの載荷試験方法³⁾では、図-4(a)の曲げモーメント図に示すように、底版にはほとんど曲げモーメントが発生しないため、底版部の挙動を再現することはできない。

そこで、本研究では供試体の頂底版を反転させ、地盤反力を想定した図-4(b)のような載荷試験方法により底版部に直接載荷を行うものとする。

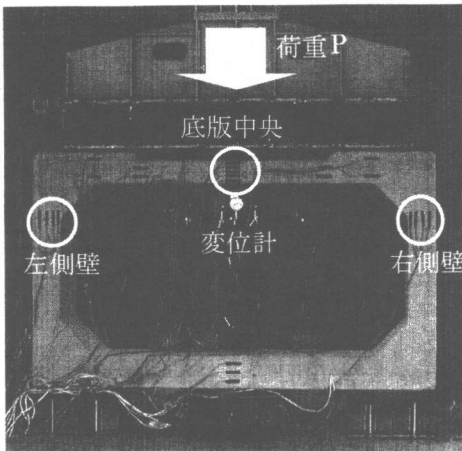


写真-1 荷重状況 (Type-C)

写真-1に荷重状況を示す。支持台として、幅500mmのブロックを両端及び中央部の3箇所に配置し、その上に、頂底版を反転した供試体を設置する。

荷重面の底版には、側壁である柱部に荷重しないように幅1990mm奥行き500mmの荷重治具をスパン中央に配置する。

図-5に示すように、荷重治具と供試体との間には20mm厚の硬質ゴム板を配置する。

2.3 測定項目及び解析条件

荷重荷重10kN毎に写真-1の○印に示す底版中央及び、左右側壁ハンチ端部の断面において、コンクリート表面のひずみをポリエステルストレインゲージにて測定する。また、底版中央において変位計を用い変位の測定を行なう。ただし、内側への変形を正とする。

解析は各Typeについて、材料非線形及び多方向ひび割れを考慮した、経路依存型の鉄筋コンクリート構成則⁴⁾を有する2次元有限要素法にて行う。

3. 試験結果と考察

3.1 弾性挙動

各Typeの底版及び左右側壁ハンチ端部の実測値により、ひび割れ直前における部材深さ方向のひずみを図-6に示す。

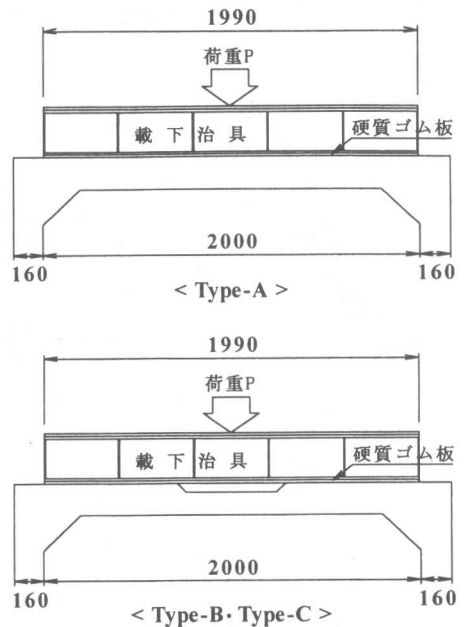


図-5 底版部荷重状況

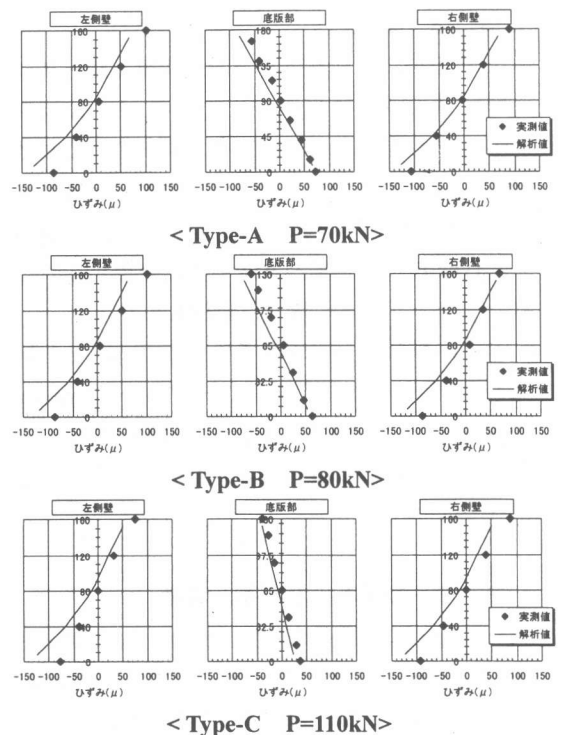


図-6 ひび割れ発生直前のひずみ分布

側壁部のひずみ分布は、ひび割れ発生直前のため、コンクリートの引張側が塑性化し、曲線

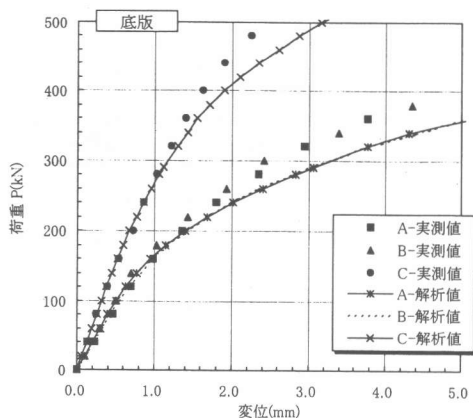


図-7 荷重-変位

状に分布しているのに対し、底版部は弾性的に挙動し、直線分布となっている。

ひび割れ後は、荷重の増加とともに、圧縮側へと中立軸が移行している。

3.2 変位

底版中央における荷重-変位曲線を図-7に示す。実測値では Type-A, Type-B ともにほぼ同様の変形挙動を示している。同一荷重における変位を比較すると、Type-C は切欠き部が大きく、底版両外側付近に载荷するので、Type-A, Type-B に比べて、底版中央に発生する曲げモーメントが小さくなり、変位も小さい。

また、解析値との比較では、各 Type とも弾性域においてはよく符合しているが、Type-A, Type-B では $P=200\text{kN}$ 、Type-C では $P=220\text{kN}$ を超えると非線形の傾向が大きくなり、変位は増大する。

3.3 ひずみとひび割れ荷重

各 Type における底版中央内側、左右側壁外側のひずみの状況を図-8に示す。この図から、各 Type とも、まず側壁にひび割れが生じた後、底版中央がひび割れる傾向が見られる。

また、解析値と比較しても同様の傾向である。

次に、ひび割れ荷重を表-2に示す。ひび割れ荷重は、切欠きの有無にかかわらず、

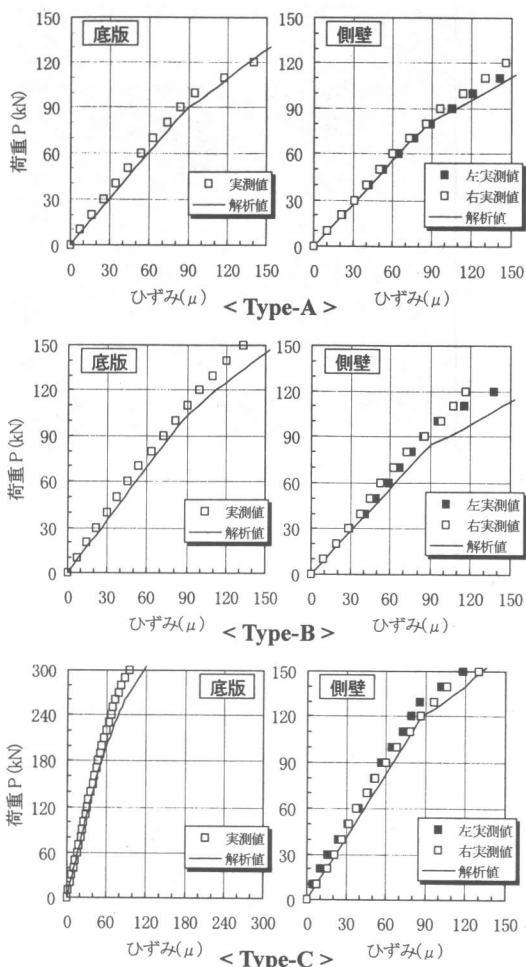


図-8 ひずみ-荷重

表-2 ひび割れ荷重 (単位: kN)

| Type | 底版 | | | 側壁 | | |
|------|-----------|------------|--------|-----------|------------|--------|
| | 実測値 Pc | 解析値 Pcc | Pcc/Pc | 実測値 Pc | 解析値 Pcc | Pcc/Pc |
| A | 90 | 95 | 1.06 | 80 | 90 | 1.13 |
| B | 100 | 105 | 1.05 | 90 | 85 | 0.94 |
| C | 260 | 265 | 1.02 | 120 | 120 | 1.00 |

Type-A, Type-B ともほぼ同程度となっており、Type-C については、Type-A, Type-B を 1.5 倍程度上回っている。

しかし本試験中、側壁ハンチ端部に生じたひび割れは、実際の埋設時には側面からの土圧が作用するため、ひび割れは生じないと考えられる。

3. 4 供試体のひび割れ

試験で観察されたひび割れ状況を図-9に示す。各 Type とも底版内側と、側壁外側のハンチ端部で曲げひび割れが発生している。底版に関しては、薄肉化していない Type-A は底版内側全幅にわたって一様に広がっているのに対して、Type-B, Type-C は、薄肉部に一様に分布している。これは、発生する曲げモーメントに比べて薄肉部のひび割れ抵抗モーメントが小さいためである。

3. 5 考察

ひび割れ荷重, 変位, ひずみ等の試験結果は, 解析値とよく一致しており, ひび割れ荷重において両者の差は最大 10% 程度である。したがって, 従来のボックスカルバート及び, 切欠き付き底面薄肉ボックスカルバートのひび割れ荷重について, 解析により精度よく予測できるものと考えられる。

今後の設計においては, 非線形解析により, 部材断面を決定し, 従来のボックスカルバート同様の方法により, 設計計算を行うことが可能である。また, 施工時においては, 基礎地盤の地耐力を確認し, 許容地盤反力を満足しない場合には, 置換え基礎等の土質安定処理を行い, 薄肉部に反力が作用しないように留意する必要がある。

4. 設計資料

4. 1 切欠き幅率 α 及び切欠き厚率 β

本研究で得られた結果を基に, 内寸法 2000mm×1000mm の切欠き付き底面薄肉ボックスカルバートにおいて, 切欠き幅及び切欠き厚を変化させることによる, ひび割れ荷重の計算を行った。

その結果を図-10に示す。

切欠き付き底面薄肉ボックスカルバートは, 従来のボックスカルバート($\alpha = \beta = 0$)と比較すると, 切欠き幅の増大とともに必要とする地耐力は増大する。

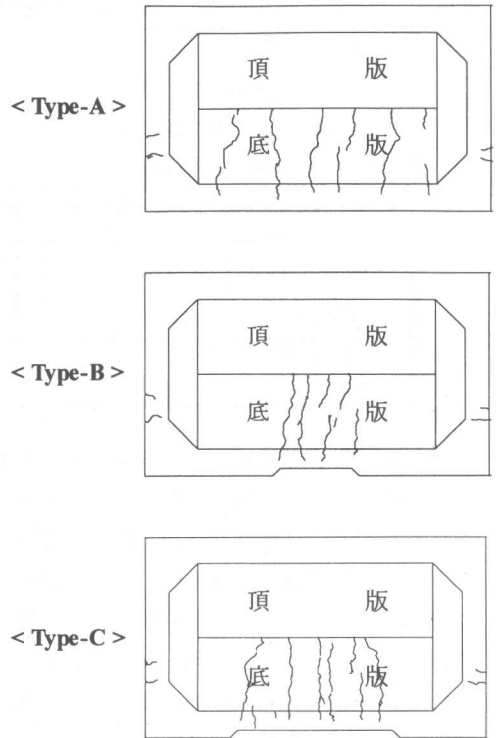
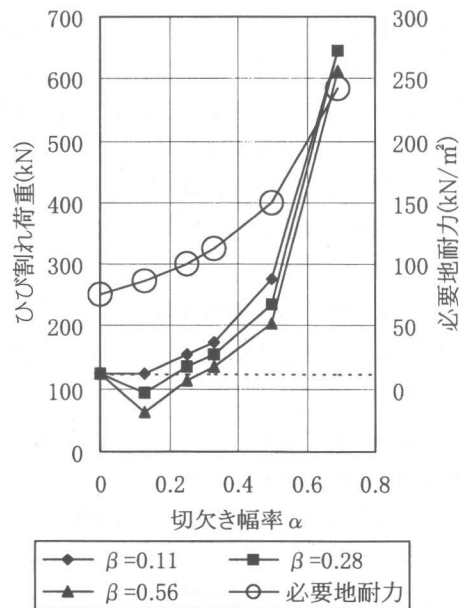


図-9 供試体ひび割れ状況



$$\alpha = \frac{\text{切欠き幅}}{\text{全外幅}} \quad \beta = \frac{\text{切欠き厚}}{\text{部材厚}}$$

図-10 ひび割れ荷重・地耐力-切欠き率

表-3 薄肉化による使用材料低減効果

| | |
|-----------------------|------------------------------------|
| ○設計条件 | |
| ①プレキャスト鉄筋コンクリート製品 | ④輪荷重 T-25 |
| ②内幅8.0m×内高2.0m×長さ1.0m | ⑤土被り1.0m |
| ③内空水路利用(満水時) | ⑥設計基準強度 $f_{ck} = 35\text{N/mm}^2$ |

| 種別 | コンクリート質量 | | 鉄筋質量 | | 製品質量 | | 必要地耐力 | |
|--|----------|------|--------|------|--------|------|----------------------|-----|
| | (kN/m) | (%) | (kN/m) | (%) | (kN/m) | (%) | (kN/m ²) | (%) |
| プレキャストボックスカルバート (従来型: $\alpha = \beta = 0$) | 298.5 | 100 | 11.5 | 100 | 310.0 | 100 | 80.2 | 100 |
| 底面薄肉ボックスカルバート ($\alpha = 0.50, \beta = 0.17$) | 288.4 | 96.6 | 8.0 | 69.7 | 296.4 | 95.6 | 157.3 | 196 |

切欠き厚率 $\beta = 0$ から $\beta = 0.56$ まで変化させると、 β の値が小さいほど部材が厚く剛性が大きくなるため変位は小さく、ひび割れ荷重は増大する。また切欠き厚率 $\beta = 0.56$ より小さく、かつ切欠き幅率 $\alpha = 0.33$ 以上の場合、ひび割れ荷重は従来のボックスカルバートより大きくなる。

したがって、実際の設計においては、変位及び地耐力が許す限り α, β の値を大きくすることが有利となる。

本設計資料は、本研究の曲げ載荷試験と同様に側面土圧を考慮していないため、側壁にひび割れが発生している。しかし、実際に側面土圧を考慮する場合は、側壁にひび割れが生じないため、底版部に発生する曲げモーメントは、側面土圧を考慮していない場合に比べて小さくなり、ひび割れ荷重がより大きくなる。

4. 2 材料使用量の比較

表-3 に内寸法 8000×2000 サイズの鉄筋コンクリート製プレキャストボックスカルバートを一般的な条件により設計し、従来品及び底面薄肉製品の材料使用量の比較を示す。

これによると、製品質量は最も使用量の多いコンクリート量に支配されるため、4.4%減少程度であるが、鉄筋使用量は 30.3%減少することができる。

また、プレキャスト製品の場合は、製品質量軽減により運搬及び施工に関しても、重機的小型化等が期待できる。

5. まとめ

従来のボックスカルバートの底面を薄肉化することにより、得られた結果を以下にまとめる。

- ①底面薄肉ボックスカルバートのひび割れ荷重は、切欠きを設け、適切な寸法形状(本研究の範囲では $\alpha = 0.33$ 以上、 $\beta = 0.56$ 以下)とすることにより、従来型に比べて増大する。
- ②ひび割れ荷重は、材料非線形及び多方向ひび割れを考慮した非線形解析により、最大 10%程度の誤差の範囲で試験結果を予測できる。
- ③基礎地盤の地耐力に応じた切欠き幅及び切欠き厚により、合理的な部材設計を行う事が可能である。
- ④従来型に比べて、鉄筋、コンクリートの材料使用量を減少できるため、プレキャスト製品では、製品質量が軽減され、運搬車及び施工重機の省力化が期待できる。

参考文献

- 1) 日本道路協会: 道路土工カルバート工指針, PP.7-24, 1999.3
- 2) 三木博史ほか: 道路土工構造物の設計計算例, P.315, 2000.12
- 3) 全国ボックスカルバート協会: 鉄筋コンクリート製プレキャストボックスカルバート道路路設指針, PP.40-41, 1991.7
- 4) 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, 1991