

## 論文 中空床版橋の円筒型枠上部の床版厚が床版の耐荷性に及ぼす影響

松下 拓樹\*1・安里 俊則\*2・福田 雅人\*3・徳光 卓\*4

**要旨：**中空床版橋は高速道路において昭和 35 年から試験的に適用された以降、鉄筋コンクリート橋やプレストレストコンクリート橋として数多く採用されてきた。近年、建設時の施工誤差や床版上面の切削などにより、円筒型枠上部の床版厚が所定の値よりも不足し、長年月の経過に伴い陥没する事例も生じている。そこで、静的載荷試験ならびに定点疲労試験による実験的手法を用いて、中空床版橋の円筒型枠上部の床版厚と耐荷性の関係について確認し、床版厚の減少が床版の耐荷性に及ぼす影響を検討した。

**キーワード：**中空床版橋、耐荷性、床版厚、載荷位置

## 1. はじめに

中空床版橋は昭和 30 年代にドイツから導入された技術であり、高速道路では昭和 35 年に初めて試験的に適用された。中空床版橋は桁高を低くすることができ、外観にも優れることから、高速道路の鉄筋コンクリート橋やプレストレストコンクリート橋として数多く採用されてきた。近年、建設時の施工誤差や舗装の打替に伴う床版上部の切削などにより、円筒型枠上部の床版厚が所定の値より不足し、長年月の経過に伴い陥没する事例も生じている。中空床版橋の円筒型枠上部の床版の耐荷性は技術導入の初期に実験確認されているが、円筒型枠上部の床版厚が変化した場合の耐荷性については確認されていない。本稿は、静的載荷試験ならびに定点疲労試験による実験的手法を用いて中空床版橋の円筒型枠上部の床版厚と耐荷性の関係について検討した。

## 2. 実験概要

## 2.1 静的載荷試験

## (1) 使用材料

中空床版供試体の使用材料を表-1 に、配合を表-2 に示す。W/C は 52.5% とし、呼び強度は 24N/mm<sup>2</sup> とした。コンクリートの打込み後は蒸気養生を行い、脱型後は気中養生を行った。

## (2) 供試体寸法および実験概要

中空床版供試体は実構造物の 50% モデルとした。供試体概要図を図-1 に、供試体の種類と数量を表-3 に示す。供試体の外形寸法は 475×1150×500mm とし、中空部の直径は 350mm とした。供試体の外形寸法および中空部の直径は、全ての供試体において同一の寸法とした。載荷側の中空部上部の床版厚は設計厚相当の 75mm を基準とし、50mm、25mm と変化させた。中空床版供試体に用いた円筒型枠は厚さ 0.5mm の亜鉛メッキ鋼板製とし、

表-1 使用材料

| 種類   | 記号  | 密度<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 備考                   |
|------|-----|----------------------------|----------------------|
| 水    | W   | 1.0                        | 地下水                  |
| セメント | HPC | 3.14                       | 早強ポルトランドセメント         |
| 細骨材① | S1  | 2.61                       | 除塩海砂 FM:2.17         |
| 細骨材② | S2  | 2.65                       | 石灰砕砂 FM:2.96         |
| 粗骨材  | G   | 2.66                       | 砕石 1505(ひん岩) FM:6.31 |
| 混和剤  | SP  | 1.05                       | ポリカルボン酸系高性能減水剤       |

表-2 配合

| W/C<br>(%) | s/a<br>(%) | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     |      |       |
|------------|------------|-------------------------|-----|-----|-----|------|-------|
|            |            | HPC                     | W   | S1  | S2  | G    | SP    |
| 52.5       | 45.7       | 331                     | 174 | 501 | 339 | 1101 | 2.234 |

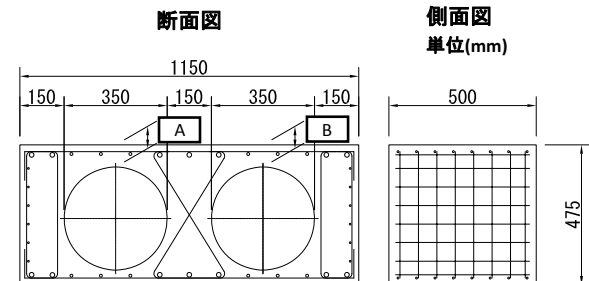


図-1 供試体概要

表-3 供試体の種類一覧

| 中空部上部の床版厚(mm) |     | 載荷位置<br>円筒の有無 | 供試体数  |
|---------------|-----|---------------|-------|
| A             | B   |               |       |
|               | 載荷側 |               |       |
| 75            | 75  | 有り            | 各 3 体 |
| 75            | 25  |               |       |
| 50            | 50  |               |       |
| 75            | 75  | 無し            |       |
| 75            | 25  |               |       |
| 50            | 50  |               |       |

鉄筋は SD345 の鉄筋を使用した。供試体の配筋および鉄筋径は実構造物の配筋を参考として決定した。円筒型枠

\*1 (株) 富士ピー・エス 技術本部土木技術開発グループ (正会員)

\*2 西日本高速道路 (株) 技術本部技術環境部構造技術課課長代理

\*3 西日本高速道路 (株) 技術本部技術環境部構造技術課主任 (正会員)

\*4 (株) 富士ピー・エス 技術本部副本部長 工博 (正会員)

が供試体の耐荷性に及ぼす影響を確認するため、円筒型枠を除去した供試体も合わせて作製した。供試体は形状別に3体ずつ作製した。

静的載荷試験の要領図を図-2に示す。載荷方法は静的単調載荷とした。実橋における床版の荷重条件は、通行車両の荷重がゴム製のタイヤから舗装を介して床版へ伝わる。そのため、舗装による荷重の分散等の影響が考えられるが、本試験では載荷版の材質や荷重の分散による影響は考慮せず、載荷版は $t=50\text{mm}$ の鋼板とし、寸法は道路橋示方書に示される輪荷重の載荷幅 $500\times 200\text{mm}$ の50%に相当する $250\times 100\text{mm}$ とした。載荷位置は供試体中央、円筒型枠直上、その中間の3点とした。試験時には、載荷荷重が50kN増加する毎に供試体のひび割れ観察を行った。また、載荷試験機的能力と安全性を考慮して最大荷重は1000kNとした。計測項目は中空部内部と供試体上面のひずみとした。

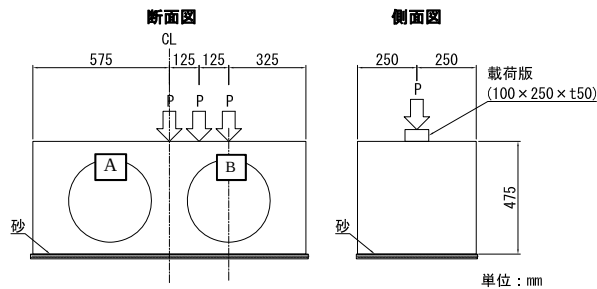


図-2 静的載荷試験の要領図

## 2.2 定点疲労試験

### (1) 使用材料および配合

中空床版供試体の使用材料を表-4に、配合を表-5に示す。コンクリートのW/Cは75.0%とし、呼び強度は $24\text{N/mm}^2$ とした。コンクリートの打ち込み後は、収縮ひび割れの発生を抑制するために養生マットを用いた湿潤養生を1週間行ったあと、気中養生を行った。静的載荷試験の供試体に用いたコンクリートと配合が異なる理由は、3.1節で後述するように、静的載荷試験の供試体に用いたコンクリートの圧縮強度が、想定される実構造物の設計強度である $24\text{N/mm}^2$ よりも過大となったことから、実構造物と供試体のコンクリートの強度差が試験結果に与える影響を無視できないと考え、材齢28日の実強度が $24\sim 30\text{N/mm}^2$ となるように配合の修正を行ったためである。

### (2) 供試体寸法および試験概要

中空床版供試体は実構造物の50%モデルとした。供試体の概要を図-3に示す。供試体の外形寸法は $500\times 850\times 200\text{mm}$ とし、中空部の直径は $350\text{mm}$ とした。供試体の外形寸法および中空部の直径は、全ての供試体において同一の寸法とした。中空部上部の床版厚は設計

表-4 使用材料

| 種類   | 記号 | 密度<br>( $\text{g/cm}^3$ ) | 内容、商品名         |
|------|----|---------------------------|----------------|
| 水    | W  | 1.0                       | 地下水            |
| セメント | H  | 3.14                      | 早強ポルトランドセメント   |
| 細骨材① | S1 | 2.61                      | 除塩海砂 FM:1.91   |
| 細骨材② | S2 | 2.69                      | 石灰砕砂 FM:2.73   |
| 粗骨材  | G  | 2.66                      | 砕石（ひん岩）FM:6.44 |
| 混和剤  | SP | 1.05                      | ポリカルボン酸系高性能減水剤 |

表-5 配合

| W/C<br>(%) | s/a<br>(%) | 単位量 ( $\text{kg/m}^3$ ) |     |     |     |      |       |
|------------|------------|-------------------------|-----|-----|-----|------|-------|
|            |            | HPC                     | W   | S1  | S2  | G    | SP    |
| 75.0       | 41.0       | 267                     | 200 | 373 | 385 | 1091 | 2.670 |

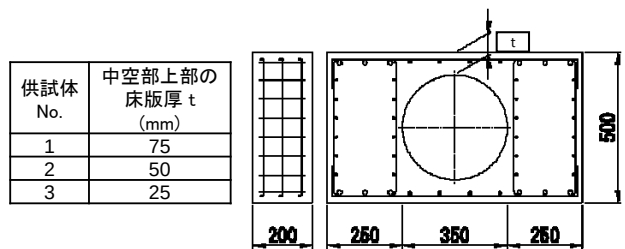


図-3 定点疲労試験供試体の概要

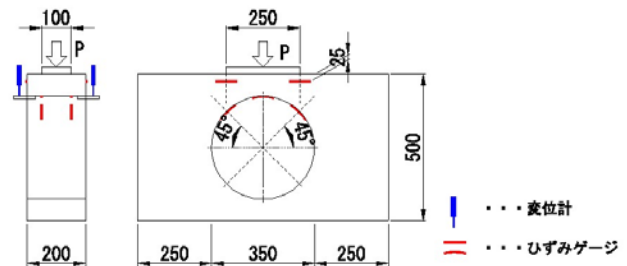


図-4 定点疲労試験要領図

厚相当の $75\text{mm}$ を基準とし、 $50\text{mm}$ 、 $25\text{mm}$ と変化させた。円筒型枠の有無は耐荷性に寄与しないと判断し<sup>2)</sup>、いずれの供試体も定点疲労試験前に円筒型枠を除去した。供試体に使用した鉄筋はSD345を用いた。供試体の配筋および鉄筋径は、静的載荷試験に用いた供試体を参考として決定した。

定点疲労試験の要領図を図-4に示す。載荷方法は繰返し定点載荷とした。載荷版は静的載荷試験と同様のものを使用した。載荷位置は後述する静的載荷試験の結果から円筒型枠直上とした。計測項目は中空部上部の床版部の変位と、中空部内および供試体側面上側のひずみとした。

中空床版橋の疲労耐久性に関する既往の知見は存在せず、破壊荷重の推定が困難であったことから、載荷は階段状載荷とした。荷重載荷パターン概念図を図-5に示す。荷重載荷は $25\text{kN}$ から開始した。 $25\text{kN}$ 載荷では3回の繰返し載荷を静的に行ったのち、 $50\text{kN}$ 載荷に移った。 $50\text{kN}$ 載荷では、各1, 2, 3, 10, 100, 1000, 10000回目のサイクルを静的に載荷し、他のサイクルは動的に載荷した。 $75\text{kN}$ は $25\text{kN}$ 載荷と同様、 $100\text{kN}$ 載荷は $50\text{kN}$

と同様な載荷パターンとし、以後同様に 25kN 刻みで荷重を増加させ、供試体が破壊するまで載荷を行った。動的載荷の載荷周波数は 1Hz とした。各荷重の静的載荷時にひずみおよび変位を計測した。また、静的載荷時は目視によるひび割れ発生状況の確認も同時に行った。

### 3. 静的載荷試験結果

#### 3.1 圧縮強度および静弾性係数

供試体に用いたコンクリートの試験時の圧縮強度は 51.3～55.2N/mm<sup>2</sup>、静弾性係数は 29300～31900 N/mm<sup>2</sup> となった。供試体毎の圧縮強度および静弾性係数に大きな差異は生じなかった。

#### 3.2 載荷位置と破壊荷重の関係

静的載荷試験の試験結果を表-6 に示す。載荷位置毎に供試体の破壊荷重を比較すると、供試体のウェブ直上に載荷した場合は中空部の床版厚に関わらず、載荷荷重の上限である 1000kN に達しても供試体が破壊しなかった。中空部直上に載荷した場合の破壊荷重は 446.31～890.10kN であった。供試体の破壊形態は、供試体 No.3 を除く全ての供試体で、床版部の押抜きせん断破壊となった。なお、供試体 No.3 の載荷試験時は定格容量が 500kN の荷重指示計を用いて試験を行っており、供試体の破壊が生じる前に載荷荷重が定格容量程度になったことから試験を中止した。そのため、供試体 No.3 の破壊形態は未破壊となっている。供試体のウェブ直上と中空部直上との中間に載荷した場合の破壊荷重は、736.85～935.72kN であった。供試体の破壊形態は床版厚が 75mm の供試体においては破壊が生じず、床版厚が 50mm、25mm の供試体においては床版部の押抜きせん断破壊となった。以上のとおり、載荷位置が供試体のウェブ直上から中空部直上に近づくにつれて破壊荷重が低くなり、中空部直上に載荷した場合が最も破壊荷重が低い結果となった。

#### 3.3 破壊過程

既往の実験結果から求められている中空部周囲と床版上面の応力分布図を図-6 に示す<sup>1)</sup>。図-6 によると、中空部周囲と床版上面に作用する引張応力は中空部頂部（測点 3）が最も大きく、次いで載荷板横（測点 7、9）となっている。このことから、供試体のひび割れは中空部頂部、供試体上面の順序で発生すると考えられる。

載荷荷重と中空部頂部のひずみの関係の例を図-7 に示す。ひずみの変曲点から中空部頂部のひび割れ発生荷重を算定したところ、明確なひずみの変曲点が見受けられない供試体もあったが、床版厚が薄いほど載荷開始後の早い段階にひび割れが発生する傾向となった。供試体 No.3、No.9、No.12 においては、ひずみの変曲点以降ひずみが圧縮方向に卓越していることから、中空部頂部にひび割れが発生することによって中空部上部の床版がアー

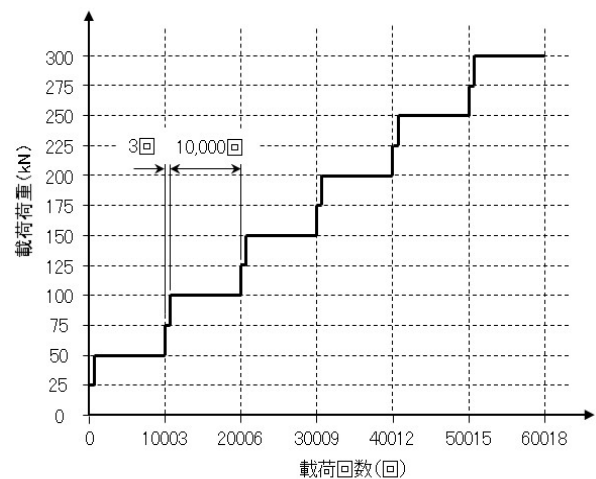


図-5 載荷パターンの概要図

表-6 静的載荷試験結果

| No. | 中空部上部の床版厚(mm) |    | 載荷位置   | 円筒の有無 | ひび割れ発生荷重(kN) | 最大荷重(kN) | ※2破壊形態 |
|-----|---------------|----|--------|-------|--------------|----------|--------|
|     | A             | B  |        |       |              |          |        |
| 1   | 75            | 75 | ウェブ直上  | 有り    | 649.52       | 999.34   | 未破壊    |
| 2   |               |    | 他2点の中間 |       | 200.15       | 1001.05  |        |
| 3   |               |    | 中空部直上  |       | 260.29       | 486.79※1 |        |
| 4   | 75            | 25 | ウェブ直上  |       | 952.54       | 1007.88  | 押抜き    |
| 5   |               |    | 他2点の中間 |       | 118.09       | 801.09   |        |
| 6   |               |    | 中空部直上  |       | -            | 446.31   |        |
| 7   | 50            | 50 | ウェブ直上  |       | -            | 1002.39  | 未破壊    |
| 8   |               |    | 他2点の中間 |       | 220.62       | 935.72   |        |
| 9   |               |    | 中空部直上  |       | 89.25        | 482.70   |        |
| 10  | 75            | 75 | ウェブ直上  | 無し    | 454.08       | 1000.96  | 未破壊    |
| 11  |               |    | 他2点の中間 |       | 193.16       | 1000.43  |        |
| 12  |               |    | 中空部直上  |       | 295.09       | 890.10   |        |
| 13  | 75            | 25 | ウェブ直上  |       | -            | 1008.32  | 未破壊    |
| 14  |               |    | 他2点の中間 |       | 199.24       | 736.85   |        |
| 15  |               |    | 中空部直上  |       | 243.27       | 535.42   |        |
| 16  | 50            | 50 | ウェブ直上  |       | -            | 1009.48  | 未破壊    |
| 17  |               |    | 他2点の中間 |       | 56.22        | 793.38   |        |
| 18  |               |    | 中空部直上  |       | -            | 650.77   |        |

※1…定格容量500kNの荷重指示計使用時

※2…未破壊はロードセルの測定可能範囲内で供試体が破壊しなかった場合を示す。

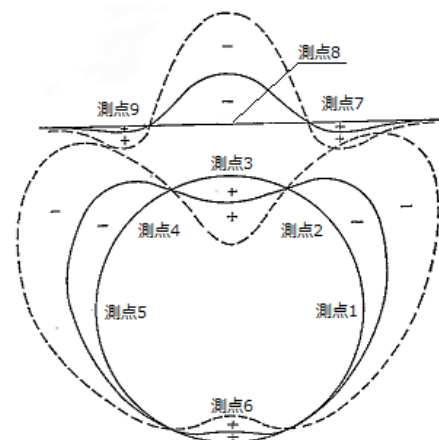


図-6 中空部付近の応力分布図

チ構造に変化していると推察する。図-7 の(2)において床版厚が薄い供試体の方が引張りひずみが小さいことから、アーチ構造による圧縮ひずみの発生が想定される。

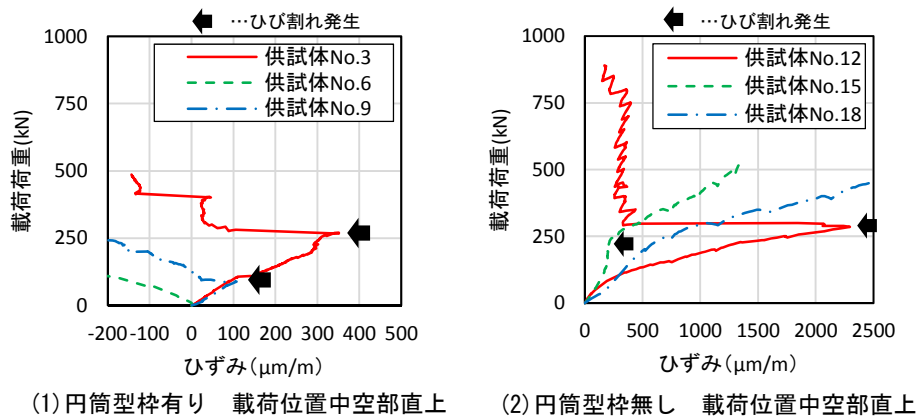


図-7 荷重－ひずみの関係

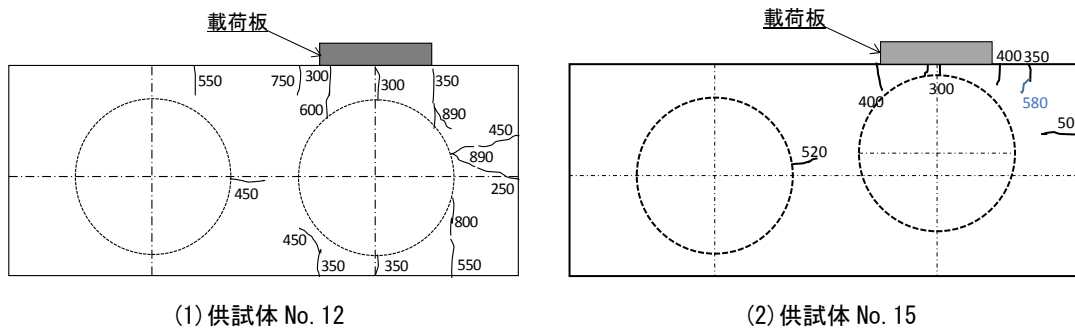


図-8 ひび割れ図

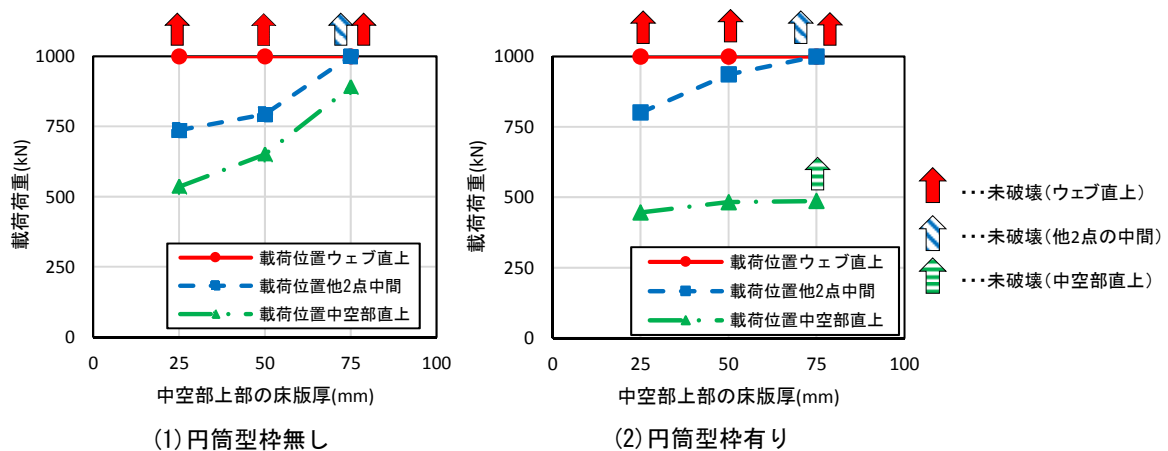


図-9 破壊荷重と床版厚の関係

供試体 No.12 と供試体 No.15 のひび割れ図を図-8 に示す。ひび割れは中空部頂上部付近の床版下縁、供試体上縁の順に発生する傾向となった。これは図-6 に示した中空部付近の応力分布図から想定される、ひび割れの発生順序と類似する結果となった。

### 3.4 床版厚と破壊荷重

供試体の破壊荷重と中空部上部の床版厚の関係を図-9 に示す。円筒型枠無しに関しては、いずれの荷重位置においても中空部上部の床版厚が薄いほど、供試体の破壊荷重が低い結果となった。特に中空部直上に荷重した場合はこの傾向が顕著であり、床版厚 75mm と 25mm の供試体の破壊荷重を比較すると 1.6 倍程度の差が生じた。

円筒型枠有りに関しては、床版厚と破壊荷重の関係は円筒型枠無しと同様の傾向であった。

## 4. 定点疲労試験

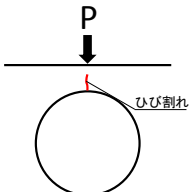
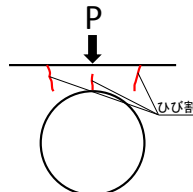
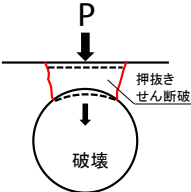
### 4.1 圧縮強度および静弾性係数

供試体に用いたコンクリートの試験時の圧縮強度は  $30.4\text{N/mm}^2$ 、静弾性係数は  $23200\text{N/mm}^2$  であった。

### 4.2 破壊過程

定点疲労試験の試験結果を表-7 に、供試体 No.1 のひび割れ図を図-10 に示す。ひび割れ発生荷重は静的荷重試験と同様に、中空部頂部のひずみの変化点と目視により算定した。いずれの供試体においても中空部頂部にひ

表-7 定点疲労試験結果

| No.              | 中空部上部の<br>床版厚     | 中空部頂部<br>ひび割れ発生荷重(kN)                                                             |      | 床版上面<br>ひび割れ発生荷重(kN)                                                              |      | 破壊荷重/<br>載荷サイクル                                                                     |
|------------------|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------|-----------------------------------------------------------------------------------|------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|                  |                   | ゲージから<br>算定                                                                       | 目視確認 | ゲージから<br>算定                                                                       | 目視確認 |                                                                                     |
| 1                | 75mm<br>(150mm相当) | 40                                                                                | 100  | 80                                                                                | 100  | 300kN/82回                                                                           |
| 2                | 50mm<br>(100mm相当) | 30                                                                                | 100  | 60                                                                                | 100  | 250kN/834回                                                                          |
| 3                | 25mm<br>(50mm相当)  | 15                                                                                | 100  | 30                                                                                | 50   | 200kN/1回                                                                            |
| ひび割れ・<br>損傷イメージ図 |                   |  |      |  |      |  |

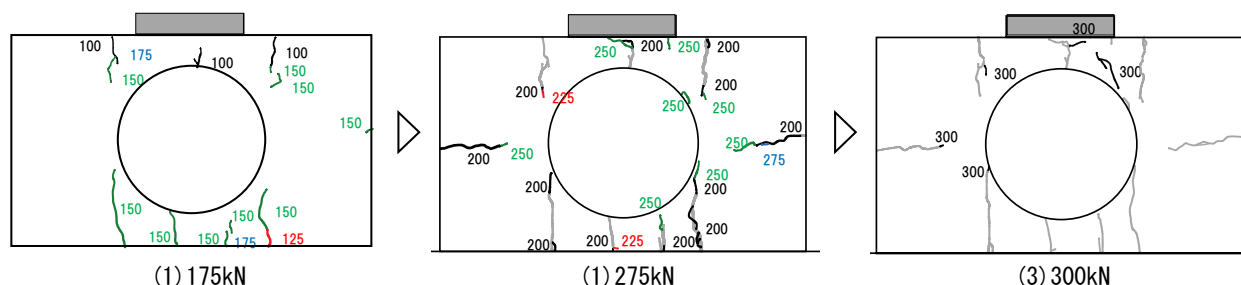


図-10 供試体 No. 1 のひび割れ図

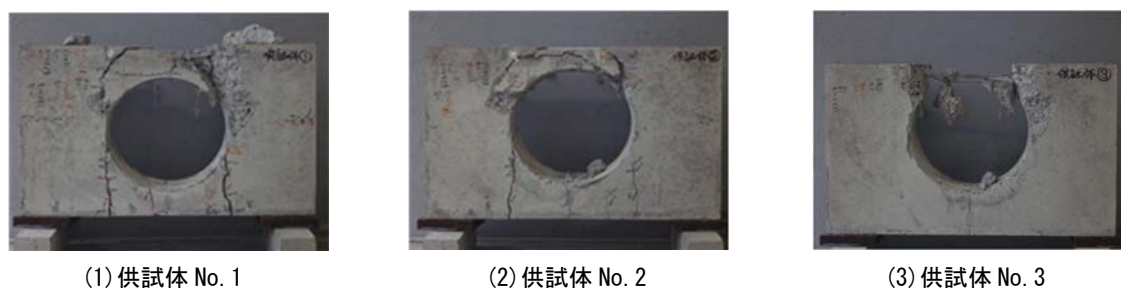


図-11 各供試体の破壊後の写真

び割れが発生した後に床版上面にひび割れが発生した。これは静的載荷試験と同様な破壊過程であった。供試体の中空部頂部、床版上面にひび割れが発生する荷重および供試体の破壊荷重は、供試体 No.1 でおおの 40kN, 80kN, 300kN・82 回であり、供試体 No.2 ではおおの 30kN, 60kN, 250kN・834 回、供試体 No.3 ではおおの 15kN, 30kN, 200kN・1 回であった。床版厚が厚いほど、中空部頂部にひび割れが発生するタイミングが遅れており、床版厚が厚いほど、ひび割れ抵抗性および疲労耐久性において優れていると考える。

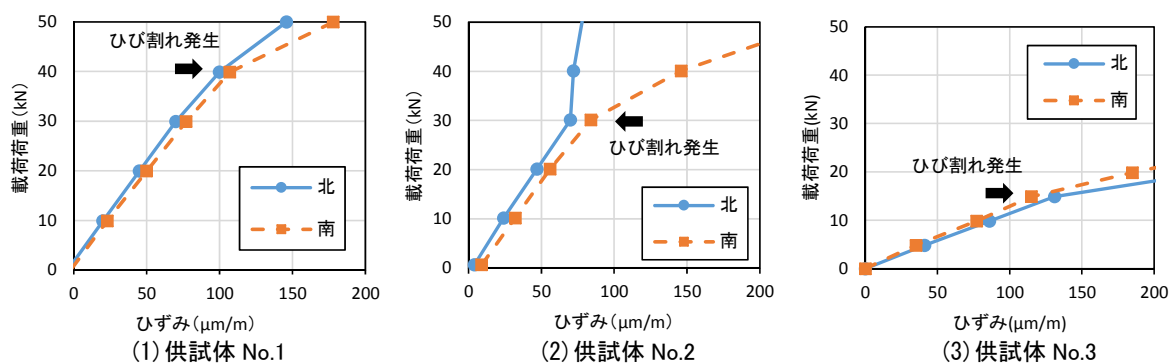
各供試体の破壊後の写真を図-11 に示す。破壊形態はいずれの供試体も中空部上部の床版部の押抜きせん断破壊であった。

ひび割れが生じた載荷段階における、載荷荷重と中空

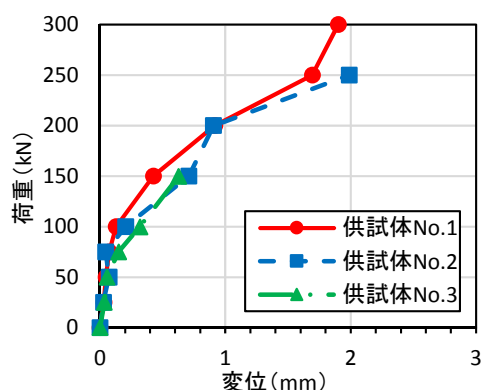
部頂部のひずみの関係を図-12 に示す。中空部頂部にひび割れが発生する以前のひずみに着目すると、供試体 No.3 は他の供試体と比較して、グラフの傾きが大きく、載荷初期から床版の剛性が小さいことが伺える。一方、供試体 No.1 と供試体 No.2 のグラフの傾きは同等であり、床版厚 50～75mm の範囲では、床版厚がひび割れ発生以前の床版の剛性に与える影響は小さいことが伺える。

各供試体の各荷重における第 1 回目の静的載荷時の最大荷重と最大変位の関係を図-13 に示す。荷重 50kN 以降の荷重に対する変位は床版厚が厚いほど小さくなる傾向となっており、床版厚が剛性に寄与することが読み取れるが、変位で見る限り大きな差とはなっていない。終局直前の最大変位は供試体 No.1, No.2 が 2mm 近くに達しているのに対し、供試体 No.3 は 1.2mm 程度と小さく

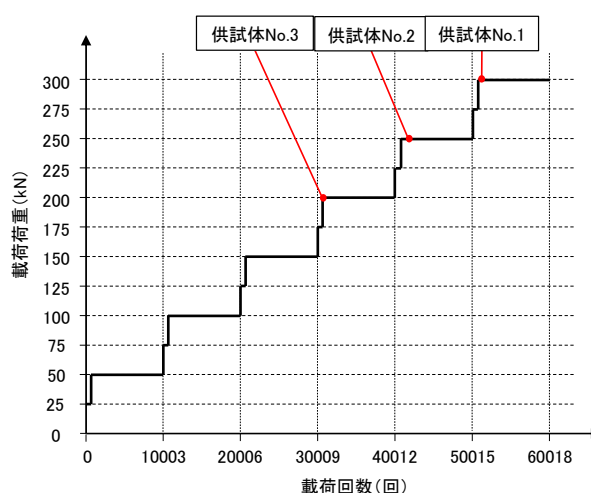




図－12 各供試体のひび割れが生じた载荷段階における荷重とひずみの関係



図－13 各荷重における最大荷重と最大変位の関係



図－14 破壊荷重と载荷サイクルの関係

なっている。このことから鋼板を用いて直接载荷した本試験の载荷条件では、定点疲労载荷における耐荷性は曲げでなくせん断作用による影響が支配的であったと考えられる。

## 4.2 破壊荷重と载荷サイクル

各供試体の破壊荷重と载荷サイクルの関係を図－14に示す。供試体 No.1, No.2, No.3 の破壊荷重および载荷サイクルはおおの 300kN/82 回, 250kN/834 回, 200kN/1 回であった。破壊荷重の差は床版厚が薄くなるにつれて 50kN ずつ低くなっており、载荷回数に関しては床版厚が薄くなるにつれて 10000 回程度少なくなっている。このことから中空部上部の床版厚が薄いほど、繰返し荷重载荷に対する床版の耐荷性が低下することが確認された。

## 5. まとめ

本実験では実際の中空床版橋の 50%モデルの供試体を用いて、中空部上部の床版厚が床版の耐荷性に及ぼす影響を確認した。本実験の範囲で得られた結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 载荷位置をウェブ直上、ウェブと中空部直上の間、中空部直上と変化させた場合、中空部直上に载荷した場合が最も破壊荷重が小さい。
- (2) 中空部上部の床版厚が薄いほど静的荷重载荷および

繰返し荷重载荷に対する床版の耐荷性が低下する。

静的载荷試験および定点疲労試験に用いた供試体は実橋の 50%モデルであるため、実橋の耐荷性を評価するには至っておらず、中空部上部の床版厚の違いが耐荷性に及ぼす影響を相対的に評価したことに留意する必要がある。

なお、本稿では紙面の都合で割愛したが、静的载荷試験について事前に行った载荷位置を変化させた解析結果と本実験の結果の間に差異が生じた。今後、中空床版橋の床版部の耐荷性に関する解析手法の検討を行う予定である。

## 参考文献

- 1) 武田昭彦, 岩本澄孝：試験所報告 コンクリート工 昭和 32 年度～昭和 38 年度 名神高速道路編, 日本道路公団高速道路試験所, pp.3-114 - 3-123, 1964.3
- 2) 杉江 匡紀, 徳光 卓, 福田 雅人, 横山 和昭, 鈴木 正範：RC 中空床版橋における円筒型枠直上部の耐荷特性に関する実験的検討, 土木学会第 71 回 年次学術講演会講演概要集, V－500, pp.999～1000, 2016.9