

論文 5分割プレキャストホロー構造部材からなる閉合剛性アーチ構造物の3方向載荷による実大載荷実験

手嶋 良祐^{*1}・柳下 文夫^{*2}・衣川 直紀^{*3}・松崎 進^{*4}

要旨：ホロー構造のアーチ部材を含む5分割のプレキャスト部材からなる閉合剛性アーチ構造物に対して、3方向載荷装置による複数の荷重パターンを与える実大静的載荷実験を行った。その結果、全体の応力等の測定値は理論値と合致し、部材や接合部に特異な挙動は無いことから、本構造は一体構造物と同等という結論に至った。終局破壊状況では局所的な脆性破壊には至らず、大断面のアーチ構造として十分な耐力を有していることが確認された。

キーワード：プレキャスト，アーチカルバート，中空構造，3方向載荷，接合部，トンネル

1. はじめに

道路建設の現場において高速道路のアンダーパスやトンネルの明かり巻にアーチ構造物を用いられることがある。一般的には安価である現場打ちコンクリート製のアーチカルバートを採用することが多いが、近年は工期の短縮も重要な項目となっておりプレキャストコンクリート製（以降 PCa 製）のアーチカルバートの採用も多くなってきている。わが国において PCa 製のアーチカルバートと言えばアーチ部のプレキャスト部材間の接合をヒンジ構造にしたものが一般的に用いられてきた。アーチカルバートの設計では左右対称の載荷荷重を仮定することが多く、ヒンジ構造をもつアーチカルバートはこの荷重に対して強いいため、部材を薄くできる。これにより、部材重量が軽くなり、施工性、経済性が向上するという長所を持っている。その一方で、実際のコンクリート構造物で完全なヒンジ結合がありえないこと、アーチの途中にヒンジ構造が入るため、偏荷重に弱いという欠点も持ち合わせている。剛性アーチカルバート（全ての部材が剛結合していると仮定できるアーチカルバート）は構造全体で荷重を分担するため

偏荷重には強いが、左右対称の荷重条件に対して特に利点がなく、ヒンジ構造を有するアーチカルバートに対して部材が厚くなる。重量も重くなるので施工性、経済性に劣り、建設現場で採用されないのが現状である。

本論文では部材にホロー構造を採用することで、充実断面に対して断面性能の低下を押えながら、軽量で施工性に優れた偏荷重に強い剛性 PCa 製アーチカルバートを開発したことを報告すると共に、本構造の実大供試体を用いた3方向からの載荷実験を行い、使用状態（常時）の性能の確認したことを中心に、接合部と部材の終局荷重における耐荷性能や信頼性を確認したことを示していく。なお、本構造形式の底版部材は現場打ちコンクリートを使用することを標準とするが、本実験では、実験場所での制約条件があること、将来オールプレキャスト工法の検討も必要なことから底版部材もプレキャスト部材としている。

2. ホロー構造の特徴

本研究で開発した構造の特徴は、剛性アーチカルバートであることと部材をホロー構造とし

*1 羽田コンクリート工業（株） 技術部課員（正会員）

*2 近畿大学 理工学部社会環境工学科教授 工博（正会員）

*3 ケイコン（株） 技術部研究開発課課長（正会員）

*4 ケイコン（株） 技術部設計課主任

ている点である。コンクリート橋にもよく用いられているホロー構造だが、この構造の利点は次の3点である。(表-1参照)

- (1) ホローが部材中心にあるので、部材の剛性に関わる断面2次モーメントが充実断面の場合との差が微小である。(5%程度減)
- (2) 部材の厚さが充実断面と同じなので、引張鉄筋の有効高さが充実断面と変わらない。
- (3) (1), (2)より充実断面に対して部材としての断面性能に差がほとんど無い状態で、重量を20~30%程度落とすことができる。これにより、ホロー構造は充実断面の場合との部材重量比較において、充実断面の100mm薄い部材厚の時とほぼ同じ重量となる。

逆に、欠点も発生する。部材断面におけるコンクリート面積が減少するため、せん断力に対する性能が低下してしまう。しかし、アーチカルバートはその形状からアーチ部にせん断力が発生しにくい構造となっている。また、ホロー構造なのでせん断力が大きい場合は充実断面にするという工夫ができる構造になっている。

3. 実験目的

本研究における実験目的は以下の4点である。

- (1) 構造物の設計計算上の仮定(接合部が剛結合、フレーム上の格点のとり方)の整合性の確認
- (2) 常時の荷重載荷時における部材及び接合部の性能確認
- (3) 接合部及び部材が終局状況となる荷重の載荷時の耐荷性能の確認

- (4) アーチ部材にホロー構造を用いた場合の製造および載荷性能に対する信頼性の確認

4. 実験概要

4.1 実験供試体形状

実験供試体の形状を図-1に示す。供試体は実験場の規模や載荷治具の都合上、構造物内に幅員6m程度の車道が入ることを想定した内空円R=4.0mを採用している。施工延長は1リング分(L=1.990m)とした。部材の重量は側壁部材116.7kN、アーチ部材70.6kN、底板部材94.1kNとなっている。

4.2 部材構成

部材構成は側壁部材2体、アーチ部材2体、底板部材1体からなり、アーチ部材及び底板部材はボイドを入れたホロー構造となっている。側壁部材とアーチ部材の接合部にはモルタル充填式継手を用いており、目地には高強度無収縮

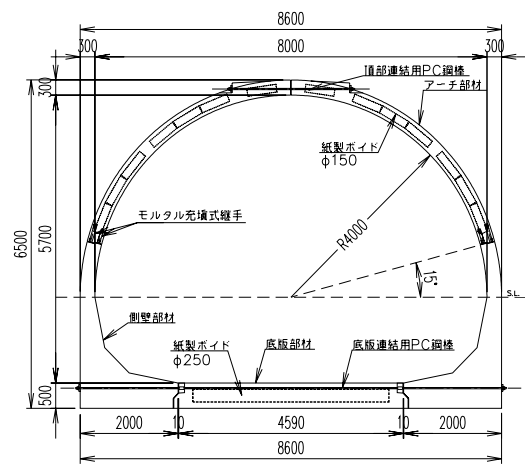


図-1 供試体形状

表-1 ホロー構造と充実断面の比較

部材厚 (mm)	ボイド径 (mm)	引張鉄筋有効高さ (mm)	断面2次モーメント (mm ⁴)	断面積 (mm ²)	断面2次モーメント比	断面積比
300	157×6本	230	4.299×10 ⁹	4.81×10 ⁵	0.960	0.805
	充実	230	4.478×10 ⁹	5.97×10 ⁵		
400	208×6本	330	1.006×10 ¹⁰	5.92×10 ⁵	0.948	0.744
	充実	330	1.061×10 ¹⁰	7.96×10 ⁵		
500	258×6本	430	1.942×10 ¹⁰	6.81×10 ⁵	0.937	0.685
	充実	430	2.073×10 ¹⁰	9.95×10 ⁵		

(上段がホロー構造、下段が充実断面、部材幅は1990mm)

グラウト材を充填している。その他の接合部には PC 鋼棒による緊張連結方式を用いており、目地は無収縮モルタルを充填している。部材重量のバランスを考慮し、側壁とアーチの接合部はスプリングラインから 15° と設定している。

4.3 使用材料

主な使用材料は下記の通りである。

- (1) コンクリート 実強度 $66\text{N}/\text{mm}^2$
- (2) 鉄筋 SD345
- (3) PC 鋼棒 SBPR 930/1080- $\phi 23$
- (4) 高強度無収縮グラウト材
- (5) 無収縮モルタル

4.4 載荷治具

本研究では 3 方向からの載荷を可能とした載荷治具を製作、使用した。載荷治具設置図を図-2に示す。本研究で 3 方向の載荷を必要とした理由は偏荷重の状況を作り出すためである。載荷治具とは別に、実構造物を構築した時にかかる土圧の役割を側壁締付治具に置換している。

載荷方法は図-2の載荷治具 A, B, C にそれぞれ設置した油圧式ジャッキでネジ式 PC 鋼棒に引張力を加え、反作用の力で供試体を載荷する構造(図-3)となっている。反力治具は実験場の床に PC 鋼棒で縫いとめて固定している。

4.5 載荷方法

本研究の載荷方法は下記の 5 段階の Trial を設定して行った。

Trial1: アーチ頂部接合部に、アーチ中央に活荷重を載せた場合と同等の断面力が発生するように載荷荷重を設定し、繰返し載荷する。

Trial2: 側壁部材とアーチ部材の接合部において、アーチ端部に活荷重が載った場合と同等の断面力が発生するように載荷荷重を設定し、繰返し載荷する。

Trial3: Trial1 の載荷荷重を等倍し、アーチ頂部接合部が設計上終局状態になるまで載荷する。この間の接合部の状態を確認する。

Trial4: Trial2 の載荷荷重を等倍し、アーチ部材と側壁部材の接合部が設計上終局状態になるまで載荷する。この間の接合部の状態を確認する。

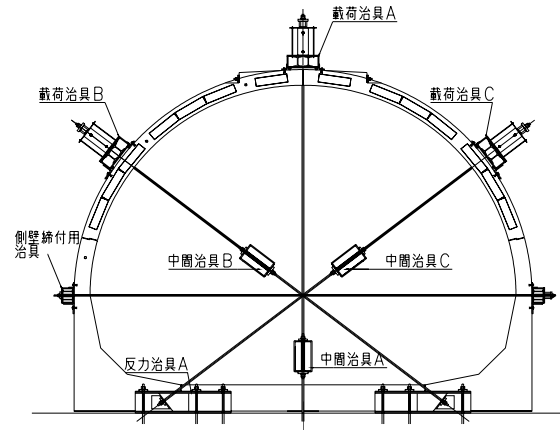


図-2 載荷治具設置図

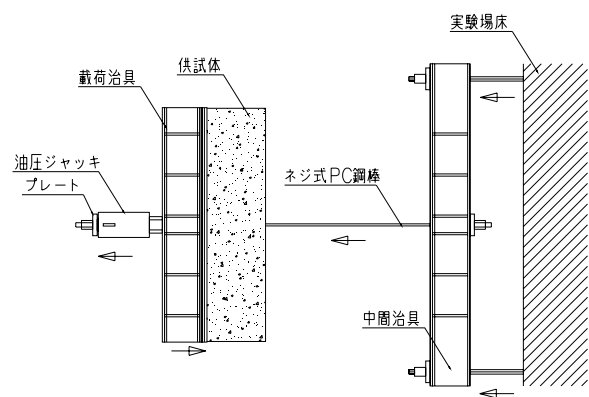


図-3 載荷構造

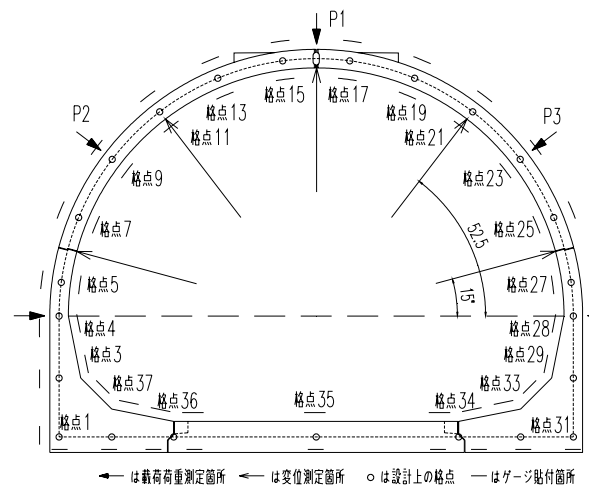


図-4 測定箇所図

Trial5: 載荷治具 C 側から一方的に載荷し、ホロ一部材の耐荷性能及び終局時の構造物の破壊性状を確認する。

4.6 測定項目

載荷時は載荷荷重の step を設定し、各 step において下記の 4 点について測定する。(図-4 参

照) また、各 step で目視によるひび割れ調査もおこなった。

- (1) 載荷治具及び側壁締付治具による載荷荷重
- (2) コンクリート表面のひずみ
- (3) 内空円中心に対する計測箇所における変位
- (4) 接合部における各方向へのズレの測定

5 実験結果及び考察

5.1 Trial1 及び Trial2 について

Trial1 及び Trial2 は頂部接合部及び側壁部材とアーチ部材の接合部において、常時の設計最大断面力を発生させる載荷であり、構造物が弾性状態でひび割れがほとんど入らないものと想定できるので、「4.6 測定項目」(2), (3)及び(4)を用いて実験結果について述べる。

(1) ひずみによる解析

個々のひずみから構造全体の挙動を把握することは難しい。本研究では、ひずみ測定値から供試体に発生した断面力に算定し、設計業務で一般的に用いられている 2 次元のフレーム計算から算出された理論値の断面力と比較をおこなった。比較の結果は模式図で図-5 に示す。

(2) 断面力の算定

ひずみから断面力を算出する流れは下記の通りである。(ε1, ε2 は上縁, 下縁のひずみ)
ひずみと応力の関係は式(1)で表される。

$$\sigma = \varepsilon \times E \quad (1)$$

また鉄筋を無視し、コンクリートのみの断面であると仮定した場合の応力と断面力の関係は式(2)で表される。

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{I} y \quad (2)$$

これら 2 つの式より式(3)が成立する。

$$\begin{aligned} N &= A \times E \times (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) / 2 \\ M &= I \times E \times (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) / 2 y \end{aligned} \quad (3)$$

(3) 変位による解析

変位の実測値と 2 次元フレーム計算から導き出された理論値の比較を模式図で図-6 に示す。実測値と理論値を比較すると、多少の誤差は有るが、特に大きく異なった箇所は無かった。

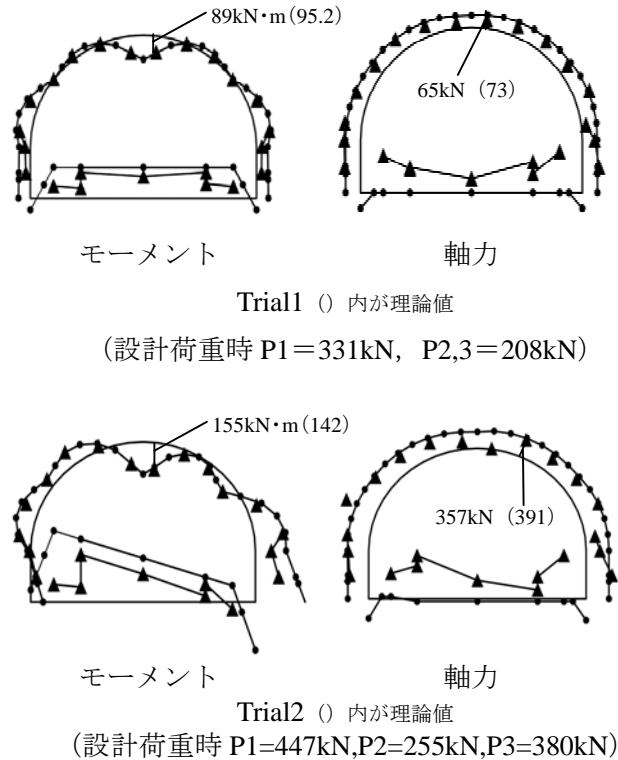


図-5 断面力の理論値 (●) と実測値 (▲) の比較

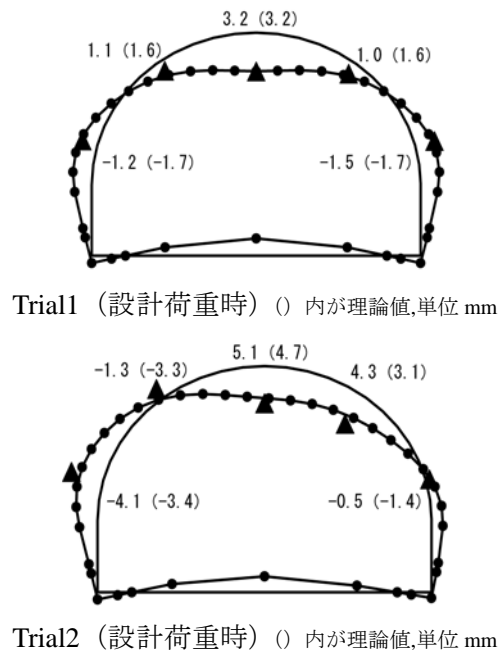


図-6 変位の理論値 (●) と実測値 (▲) の比較

(4) 考察

図-5, 図-6 より、モーメント、軸力、変位共に底版部及び底版部付近以外ではほぼ理論値どおりの値が出ていると判断できる。これにより、理論値を算出したフレーム計算で仮定し

た骨組形状がほぼ正しかったことと、頂部及びアーチ部材と側壁部材の接合部が剛結合になっていることが確認できた。底版部及び底版部付近のモーメント、軸力が理論値と差異を生じた原因は次のとおりと推測される。

図-6より変位の理論値を見ると側壁下方(鉛直部)が載荷荷重によって外側に変位が生じることになっている。この外側への変位を底版連結用PC鋼材が制御する。これによりPC鋼材には当初の導入力以上の緊張力が発生する。つまり、底版に軸力が発生し、またPC鋼材の位置が偏心しているため底版において外側引張のモーメントを発生する。これにより底版での発生モーメントは理論値より小さくなり、軸力は大きくなってしまったと思われる。

5.2 trial3~5について(終局時の載荷)

Trial3, Trial4及びTrial5は接合部や部材が終局状態にあり、供試体にはひび割れが多数発生するため、コンクリートのひずみ測定値が意味をなさない。ここでは、(4)及び目視によるひび割れ調査を基に実験結果を述べていく。

(1) 接合部のズレの測定

頂部及びアーチ-側壁の接合部3箇所においてせん断方向のズレを測定している。接合部の形状を図-7に示すと共に、接合部のせん断方向に対するズレの測定結果は図-8に示す。

各接合部のせん断ズレの最大値は0.1mm以下とごく微小であり、構造物として破壊を示すようなせん断ズレは発生していないと言える。

(2) 目視によるひび割れ調査

本研究の載荷中に入ったひび割れのスケッチを図-9に示す。ひび割れが供試体全体に満遍なく入っていることがわかる。

(3) 考察

終局荷重時において、各接合部では有害なせん断方向のズレは発生しておらず、各部材もひび割れが一点に集中するような入り方をしてないことから、本供試体が脆性的な破壊を起こしていないと判断できる。よって、開発したアーチカルバートが土木構造物として十分な耐力を

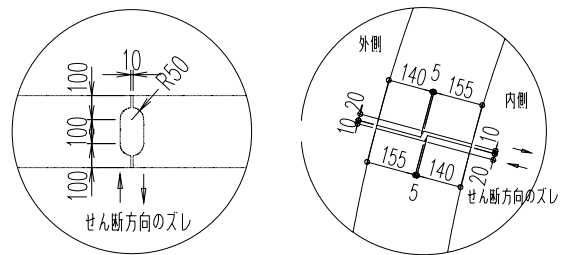
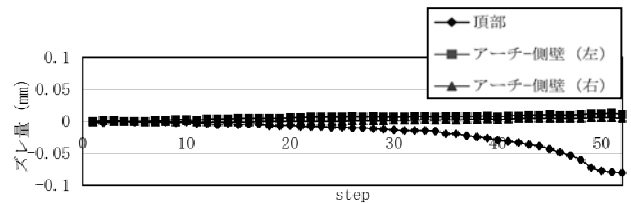
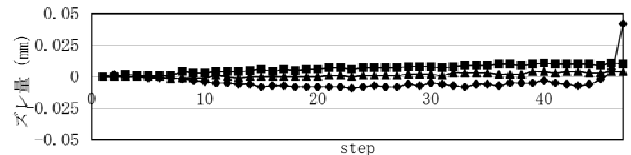


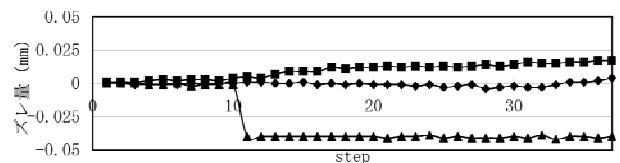
図-7 接合部の形状



trial3 (step52 P1=960kN, P2,P3=650kN)



trial4 (step47 P1=900kN, P2=510kN, P3=625kN)



trial5 (step37 P1,P2=60kN, P3=625kN)

図-8 接合部のせん断方向のズレ

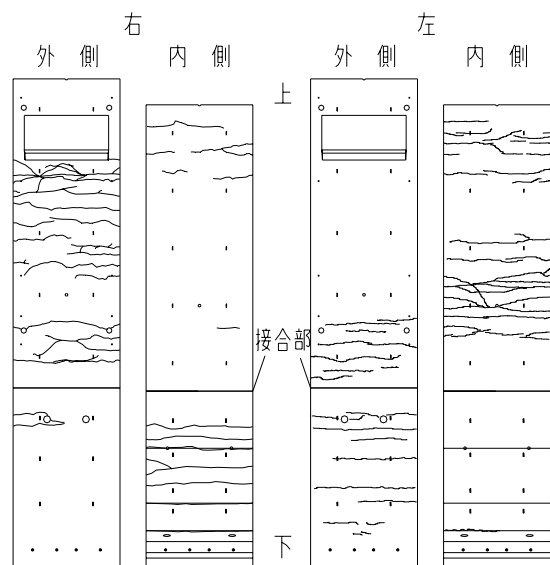


図-9 ひび割れ調査結果

有していると言える。なお、アーチ部におけるひび割れが左側の外側と右側の内側に多く見られるのは右側から左側へ偏荷重をかけているためである。

5.3 ホロー構造部の切断結果

切断面よりホロー構造としてコンクリートが十分に充填されていること及び載荷荷重により、内部からひび割れ発生していないことを確認するため、実験の最後にホロー構造部（アーチ部材）を切断した。切断写真を写真-1に示す。

切断面においては特に充填が不十分な箇所は特に見られなかった。また、実験によるボイド周りのひび割れも見られなかったことから、載荷実験とあわせてホロー部材の信頼性は製造面、設計面においても信頼できるものとする。

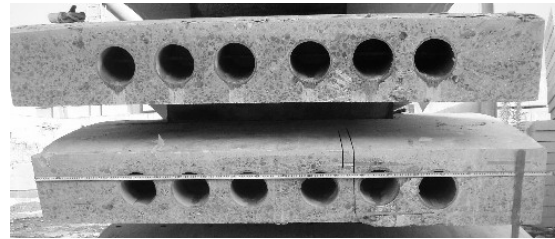


写真-1 ホロー構造切断写真



写真-2 実験風景

6. まとめ

本実験により実験目的に対して以下の結果が得ることができた。

- (1) Trial1 及び Trial2 では、載荷荷重によって発生した断面力は連続的であり、理論値との比較においてもほぼ一致していることから、設計上仮定した実構造物におけるアーチ頂部の接合部及び側壁部材とアーチ部材の接合部が剛結合であること、フレーム計算上の骨組構造が妥当であることが示された。
- (2) Trial1 及び Trial2 における構造物の変位は理論値に対して実測値がほぼ一致しており、(1)とあわせて構造物の常時の荷重に対して使用性能を十分に満足した。
- (3) Trial3, Trial4 及び Trial5 から接合部や部材が設計上終局状態となるような荷重を載荷した場合においても、接合部等の一部の箇所にひび割れやせん断ズレが集中しておらず、構造物として脆性的な破壊をおこしていないことから、土木構造物として十分な耐力を有していることを示すことができた。
- (4) アーチ部材の切断結果よりアーチ部材におけるホロー構造の製造や載荷荷重による内部の破壊といった実際には見えない箇所に

おける信頼性を確保することができた。

7. 今後の展望

本実験により側壁以上の構造に対して実験目的を達成しており、オールプレキャストの剛性アーチカルバートとしてもほぼ完成した。改善点を挙げれば、底版部の発生断面力を見ると底版接合部において半ヒンジ構造のような結果が出ている点である。原因は底版連結用 PC 鋼棒の偏心量が大きく載荷前に PC 鋼棒を緊張した際、底版外側に大きな引張力が発生し、接合部が開いてしまったことが考えられる。この点を改善することで、土木構造物として本構造の利用価値を高めることができると考えている。

参考文献

- 1) コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], 土木学会, 2002
- 2) コンクリート二次製品の設計・施工技術の開発に関する研究共同研究報告書 (I. 大断面プレキャストボックスカルバート編), 建設省土木研究所ほか, 1995.3
- 3) 鉄筋継手指針, 土木学会, 1982