

論文 プレキャスト部材と場所打ち部材の簡易なヒンジ接合を有するボックスカルバートの解析

大野 優華^{*1}・中村 光^{*2}・大菅 崇之^{*3}・有田淳一^{*3}

要旨: 著者らが提案している、プレキャスト部材と現場打ち部材の簡易なヒンジ接合を有するボックスカルバートの構造性能を、有限要素法を用いて検討した。まず、一方向載荷された接合部の曲げ試験の再現性と、繰返し載荷での曲げ挙動を解析的に確認した。次に、提案している2種類のヒンジ接合を組み合わせた場合の曲げ挙動を評価し、除荷時には目地開きが閉じる挙動となることを示した。最終的に、提案しているヒンジ接合を床版に有するボックスカルバートのプッシュオーバー解析を行い、対象とした解析条件では、ヒンジ接合により降伏までの同変位での荷重を低減でき、ひび割れなどの損傷が少なくなる挙動を示した。

キーワード: プレキャスト, ヒンジ接合, ボックスカルバート, 有限要素解析

1. はじめに

プレキャストコンクリートは、工場で製造されるため安定した品質が期待できる他、施工現場における省力化、工期短縮、作業環境の改善、および構造物の品質の向上とばらつきの低減などを図るなど多くのメリットを有している¹⁾。

平成27年11月に国土交通省は、建設現場の生産性向上の取り組み「i-Construction」を始めることを公表し、その中では規格の標準化によるプレキャストコンクリートを利用した省力化、工期短縮が一つの柱として取り上げられている。このような試みを始め、今後日本の人口減少や少子高齢化がますます進行するなかで、施工の省力化や合理化、大幅な工期短縮などのために、プレキャストコンクリートの利用は拡大していくと考えられる²⁾。

プレキャストコンクリートを利用する場合の特徴であり留意点は、プレキャスト部材同士、あるいはプレキャスト部材と現場打ち部材の間に接合部が生じることである³⁾。また、接合部においては、モーメントの低減などの観点から、設計上ヒンジ接合と仮定する場合がある⁴⁾。筆者らは、施工が容易で比較的低コストである新たなヒンジ機構を有する2種類の接合方法の提案を行い、接合部の実験を行いヒンジ機能の確認を行うとともに、剛体バネモデルによる解析を行い定着の影響を解析的に評価した⁵⁾。しかし、その検討は一方向載荷下にとどまり、また解析的検討も剛体バネモデルを用いていたため汎用的な利用には不向きであった。

そこで本研究では、提案しているヒンジ接合の実構造物の適用例として、大断面ボックスカルバートにおいて、現場での施工が比較的難しい頂版・側壁(門形)部材を

プレキャストとし、底版部材を現場打ちとした際の、底版現場打ち部との接合部に用いることを想定し、以下の検討を行った。解析手法としては、実構造物レベルの構造性能照査が容易な有限要素法を用いることとし、まず、一方向載荷された接合部の曲げ試験の再現性を確認した上で、実験を行っていない繰返し載荷での曲げ挙動を解析的に検討した。次に、実構造物に適用する際には提案している2種類のヒンジ接合を組み合わせたことを想定しているため、組み合わせた場合の曲げ挙動を解析的に評価した。最終的には、一体のRC構造と提案しているヒンジ接合を有するボックスカルバートのプッシュオーバー解析を行い、ヒンジ接合を有する構造物の構造性能について検討した。なお、構造物中のヒンジ接合部にはせん断力も作用するが、本研究の検討は曲げ挙動に限定し、せん断挙動の検討については今後の課題とした。

2. ヒンジ接合部の挙動評価

2.1 ヒンジ接合の概要

本研究で対象としたヒンジ接合は、**図-1**に示すような部材断面中央に丸鋼の接合筋を設置した非常に簡易なものである。この利点は、接合筋を中央に配置することでモーメントアーム長を短くするとともに、丸鋼を用い付着力を小さくしてモーメントを低減させる点である。また丸鋼のすべり挙動を許容することで接合面の回転を容易にしている。

図-1(a)はプレキャスト部には異形鉄筋(タイバー)を、現場打ち部に丸鋼(ダウエルバー)を配置しており現場打ち部ですべり挙動を発生させるものである(以下、ダウエルバー型)。また**図-1(b)**はアンボンドPC鋼棒を配

*1 名古屋大学大学院 工学研究科 (学生会員)

*2 名古屋大学大学院教授 工学研究科 (正会員)

*3 (株)ホクコン 技術本部設計チーム

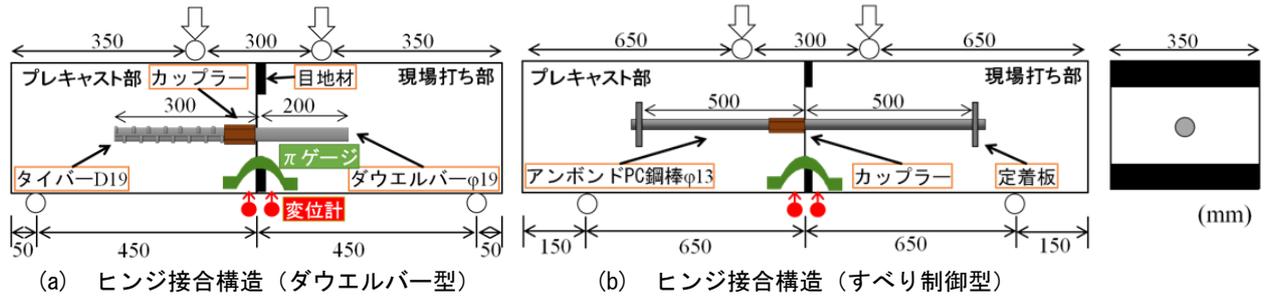


図-1 提案している簡易なヒンジ接合

置して付着を極力小さくする一方で、定着板を配置して接合筋のすべりを制御している（以下、すべり制御型）。どちらもプレキャスト部にカップラーを設置しているため、現場打ち部の接合筋を簡単につなぐことができる。

実構造物においては、上述の2種類の接合方法を図-2に示すように組合わせて適用することを想定している（以下、複合型）。組み合わせることで、3章で示す両者の挙動の複合効果を期待している。

2.2 ヒンジ接合部の実験ならびに解析的評価

(1) 解析概要

2種類のヒンジ接合部の曲げによるヒンジ挙動を確認するため、著者らが行った実験⁵⁾を対象に、8節点アイソパラメトリックソリッド要素を用いた非線形3次元有限要素解析⁶⁾を用いて解析を行った。解析に用いたコンクリートの材料モデルは、図-3(a)に示す引張軟化領域では引張破壊エネルギーを考慮し、引張軟化曲線に1/4モデルを用いた。一方、圧縮領域では応力が圧縮強度に達するまでは図-3(b)に示すようにSeanzが提案した一軸の応力-ひずみ関係を用い、ひずみ軟化領域には、解のメッシュ寸法依存性を軽減させるために圧縮破壊エネルギー⁷⁾を導入した。図中の斜線部の面積は、圧縮破壊エネルギー $8.8\sqrt{f'_c}$ に、要素の等価長さ l_{eq} を乗じたものと定義される。鋼材のモデル化において、軸方向鉄筋および接合筋は離散鉄筋要素としてモデル化を行った。コンクリートと接合筋の付着挙動は、リンク要素を設けることで鋼材-コンクリート間に付着応力-すべり関係を与えてモデル化した。丸鋼の付着応力-すべり関係を図-3(c)に示す。

提案しているヒンジ接合は、接合筋のすべり挙動を期待したものであるため、付着応力-すべり関係が解析結果に及ぼす影響が大きい。そこで、接合筋の付着応力-すべり関係については、松岡ら⁸⁾によって行われた丸鋼の引抜き試験を対象として提案された繰返し履歴を含む関係式を用いて解析を行った。ただし、松岡らや本研究でのひずみゲージ等の付着強度に及ぼす影響が不明確で

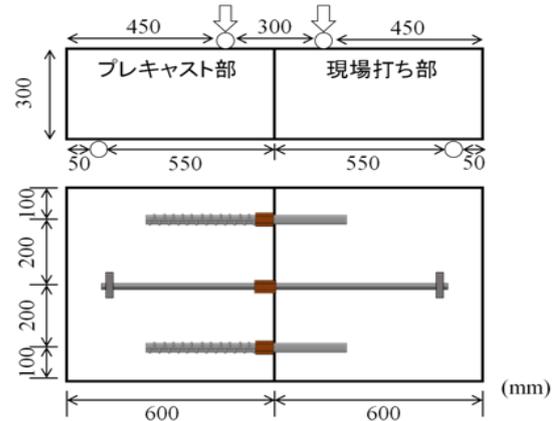
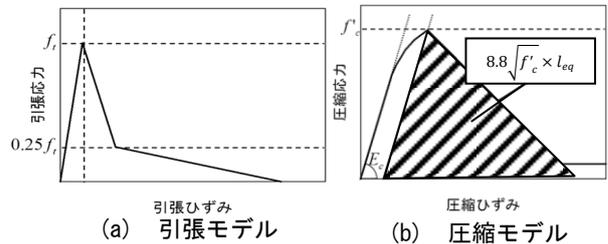
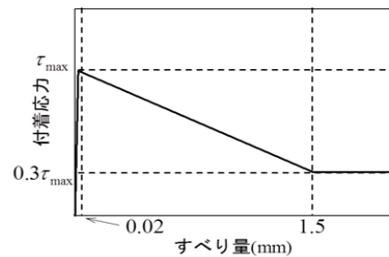


図-2 組み合わせたヒンジ接合構造（複合型）



(a) 引張モデル (b) 圧縮モデル



(c) 付着応力-すべり関係

図-3 解析モデル

表-1 材料パラメータ

供試体		界面要素	
コンクリート強度(MPa)		接合筋降伏強度(MPa)	
PCa 左側	RC 右側	丸鋼	PC 鋼棒
48	30	23.5	1080
0.5			

あることや、アンボンドPC鋼棒の付着強度は丸鋼よりも小さいことを考慮し、実験結果と整合するように、ダウエルバー型は0.25倍、すべり制御型は0.1倍と低減した付着強度により解析を行った。異形鋼材に関しては、既往の部材解析に適用性が確認されているモデル⁹⁾を用いた。

また、接合面はコンクリート部と大きく異なる挙動を示すと考えられるため、界面要素を設けることで接合面を模擬し、引張強度は実験から回帰的に算出した。各種材料パラメータは表-1に示す。

(2) 解析結果

解析対象は、図-1に示す諸元を持つ中央にヒンジ部を有する供試体の4点曲げ試験である⁹⁾。なお、供試体は接合面に断面高さを減らす方向に50mmの目地材を挿入している。実験では、荷重とともに、接合部下端の鉛直変位を変位計で、接合部上下端部の目地開きをパイゲージで測定した。

解析モデルの要素図の一例を図-4に示す。界面部の要素は軸方向長さを10mmとし、コンクリート部の要素は界面付近では一辺25×25×90mmの直方体でモデル化した。ダウエルバー型においては接合筋の両端部を自由端とし、すべり制御型においては接合筋端部に定着板を設けるため両端部を固定端とした。解析は荷重作用点の変位制御により行った。

ダウエルバー型およびすべり制御型の実験結果と解析結果の荷重-目地開き関係を図-5および図-6に示す。図中、黒線が実験値を赤線が解析値を示す。目地開きは接合部下端の値である。

ダウエルバー型では、解析結果は付着縁切れ発生荷重が高くなっているものの、実験と同様に接合面の付着縁切れが発生すると荷重が急激に低下する。その後は接合筋の効果により荷重が増加するものの解析はその増加割合が大きくなっている。この理由は不明であり、実験と解析ともに今後検討が必要であるが、丸鋼の滑り出しにより徐々に荷重を低下させながら目地開きが増加していくヒンジ挙動を示す。また、除荷挙動については、比較的大きな残留開きが残る実験と同様の結果となり、除荷挙動を概ね評価できるものといえる。

すべり制御型では、解析結果は実験と同様に接合面の付着縁切れが発生すると荷重が急激に低下し、その後実験と同様に荷重が線形的に増加する挙動を示す。荷重は若干高くなっているが、実験結果を妥当に再現している。除荷挙動に対しては、実験では除荷直後は荷重が若干低下し、その後は線形的な関係で目地開きが閉じる挙動を示す結果となり、解析も実験値と同様な挙動を妥当に再現出来ている。

今回の解析結果は、対象としたヒンジ機構の特徴から、接合筋の付着応力-すべり関係に大きく依存する。既存

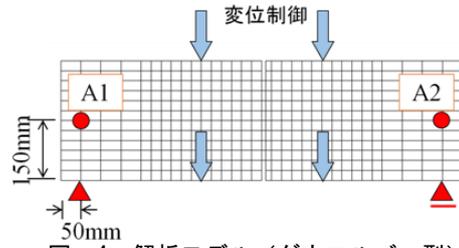


図-4 解析モデル (ダウエルバー型)

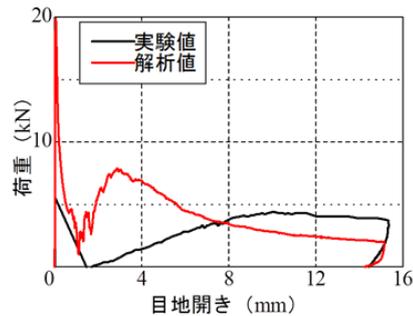


図-5 荷重-目地開き関係 (ダウエルバー型)

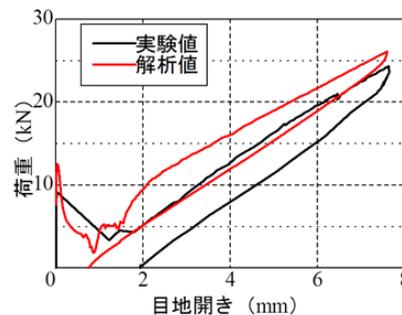


図-6 荷重-目地開き関係 (すべり制御型)

の丸鋼の付着応力-すべり関係を修正して用いた本解析モデルは、繰返し履歴の一部である除荷挙動まで接合部のヒンジ挙動を概ね評価できることが確認できた。

2.3 正負繰返し荷重下の曲げ挙動評価

実験結果との比較で、解析は除荷挙動まで含めて各ヒンジ接合の挙動を概ね妥当に評価できることを確認したが、実構造物では、地震動の影響で繰返し荷重を受けることが想定される。そこで、正負繰返し荷重下の挙動を解析的に評価した。なお解析では、繰返し荷重中の支点条件を単純にするために、部材中である図-4のA1点をピン支持、A2点をローラー支持とした。また、荷重は実験の載荷位置断面の上下面の両者を等しい値として変位制御を行い、±4mm、±8mmで繰返し載荷を行った。

ダウエルバー型およびすべり制御型の荷重-目地開き関係を図-7および図-8に示す。図中黒線が接合部下端部の目地開き量、赤線が上端部の目地開き量と荷重との関係を示している。ダウエルバー型では、実験結果との比較

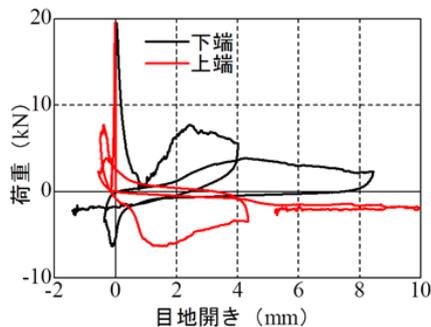


図-7 荷重-目地開き関係
(ダウエルバー型)

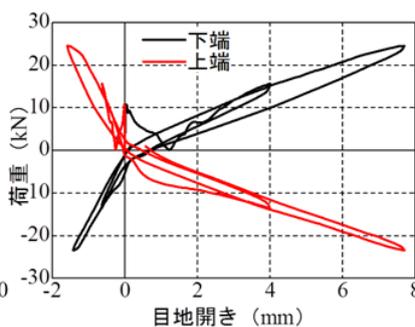


図-8 荷重-目地開き関係
(すべり制御型)

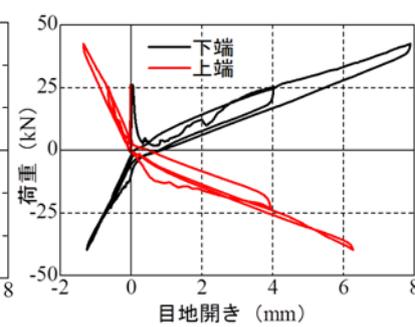


図-9 荷重-目地開き関係
(複合型)

で示したとおり、除荷時には目地開き量が残留する。しかしながら、逆方向に載荷されると荷重が非常に小さい状態で目地開きが閉じる挙動を示す。また、ある程度の履歴面積もあり、接合筋のすべりによりエネルギー吸収も期待できる。すべり制御型では、両端に定着板を設けて、すべりを制御しているため、除荷を行うと、残留目地開き量として最大で 1.0mm 程度発生するものの目地開き量はおおよそ元に戻る傾向にある。今回の解析の範囲では、PC 鋼棒が降伏していないことを確認しており、この範囲では繰返し中は PC 鋼棒の弾力的な挙動が支配的となる挙動を示すことが確認できた。

ウエルバー型の残留変位挙動の影響が出ていると思われる、

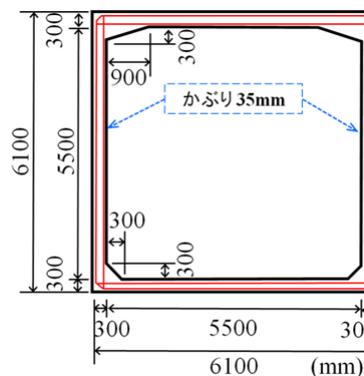


図-10 RCボックスカルバート(一体型)

3. 複合型ヒンジ接合部の曲げ挙動評価

2章で簡易な2種類のヒンジ接合の挙動を解析的に検討したが、実構造物においては、2種類の接合方法を図-2のように組み合わせた複合型として適用することを想定している。そこで、本章では図-2の複合型の曲げ挙動の解析的評価を行う。

解析モデルは、断面高さは単調載荷時と同じ 300mm とし、奥行きは 600mm とした。供試体奥行き方向にダウエルバー2本と定着板を有するアンボンド PC 鋼棒1本を交互に配置している。ダウエルバーの定着長さは 200mm、PC 鋼棒の定着板間距離は 1000mm とした。載荷方法は、実験と同様の4点曲げ載荷とし、せん断スパン長さを 400mm、等曲げ区間長さを 300mm とし正負繰返し載荷を行った。断面高さ方向の側面の要素分割は図-4と同様であり、その他変位制御方法や境界条件、コンクリートおよび接合筋の材料定数も2.3節の解析と同様とした。

解析より得られた荷重-目地開き関係を図-9に示す。図中黒線が接合下端部の目地開き量、赤線が上端部の目地開き量と荷重との関係を示している。解析結果は、接合面の付着縁切れ発生後は荷重が急激に低下し、その後は徐々に増加していく挙動を示した。また除荷時には除荷直後に荷重がある程度低下するが、その後は目地開きが閉じるような線形的挙動を示す。除荷直後の挙動はダ

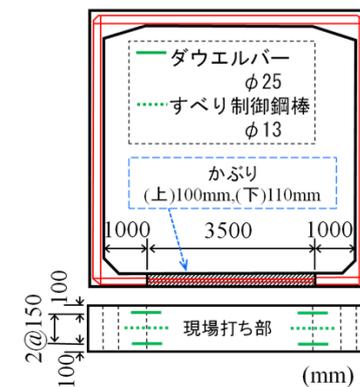


図-11 RCボックスカルバート(ヒンジ接合型)

複合型の曲げ挙動はダウエルバー型とすべり制御型の個別の荷重を加算した結果になっていると考えられる。また除荷挙動は、すべり制御型と同様となっているが、ダウエルバー型は目地開きの除荷時に残留するが逆方向の載荷荷重が作用すると急激に目地開きが閉じる挙動となるため、線形的な挙動を示すすべり制御型に追随したと考えられる。今回解析対象とした接合筋配置では、目地開きが 8mm 程度になっても接合筋の降伏は確認されず、また 8mm 程度の目地開きが生じても、荷重除荷後は目地開きがほとんどなくなる状態となるような挙動をする

ことが明らかになった。

4. ヒンジ接合を有するボックスカルバートの構造性能評価

(1) 解析概要

本研究では、提案したヒンジ接合の実構造物への適用例として、大断面ボックスカルバートにおいて、現場での施工が比較的難しい頂版・側壁（門形）部材をプレキャストとし、底版部材を現場打ちとした際の、底版現場打ち部との接合部に用いることを想定している。そこで、**図-10**に示す諸元を有する RC ボックスカルバート（以下、一体型）と**図-11**に示す**図-10**の底版に提案する複合型のヒンジ接合を有する RC ボックスカルバート（以下、ヒンジ接合型）を仮定し、頂版に水平荷重が載荷した場合の構造性能を検討した。ボックスカルバートは、実験・解析を行った供試体と同様の 300mm の部材厚で構成され、奥行きを 500mm と仮定した。軸方向鉄筋は、すべての部材に複鉄筋で D25 が 4 本配置されているとし、**図-10, 11**に示す以外のはかぶり 40mm とした。ヒンジ接合部は、**図-11**示すようにダウエルバーが 2 本（ダウエルバー型）、定着板を有する PC 鋼棒が 1 本（すべり制御型）配置されていると仮定した。ダウエルバーの定着長さは 250mm、PC 鋼棒の定着板間距離は 920mm であり、コンクリート強度はプレキャスト部が 30MPa、現場打ち部が 25MPa、鉄筋の降伏応力は 295MPa と仮定した。接合部の材料パラメータは**表-1**に示す値とした。

有限要素分割は**図-12**に示すように、頂版と側壁は要素寸法が 50×50×100mm であり、ヒンジ接合部付近の要素分割は、実験供試体の要素分割である**図-4**と同一とした。なお、両ケースともに隅角部は剛域となるようにした。また、境界条件は底版の隅角部内部の節点を奥行き方向にピン支持とローラー支持となるよう設定し、荷重は頂版の左右端の水平方向変位を等しい値で同時に変位制御して行った。

(2) 解析結果および考察

図-13に、一体型と、ヒンジ接合型の水平荷重 - 頂版水平変位関係を示す。図中青線が一体型、赤線がヒンジ接合型の結果である。一体型の荷重 - 変位関係の剛性が急激に小さくなる 70mm 程度（A 点）までは、ヒンジ接合は一体型と比べて荷重が 2 割程度小さくなる。両者の水平荷重が概ね等しくなる時点（一体型では A 点、ヒンジ接合型では B 点）が構造物としての降伏時点だと考えられるが、その降伏時点の変位はヒンジ接合型の方が 1.4 割程度大きくなる。

図-14に変位 90mm 時のひび割れと変形図を示す。ひび割れ図は奥行き方向の全ひび割れを透過して示したものである。一体型では、底版・側壁ともにひび割れが多数

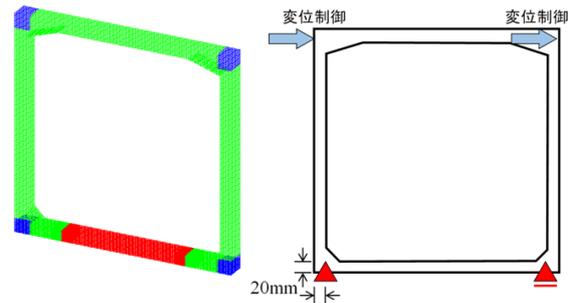


図-12 解析モデルおよび荷重・境界条件

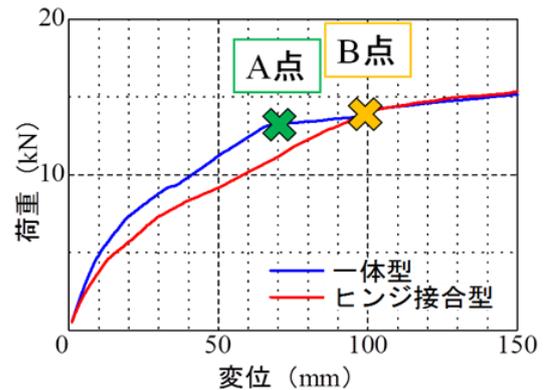


図-13 荷重-変位関係

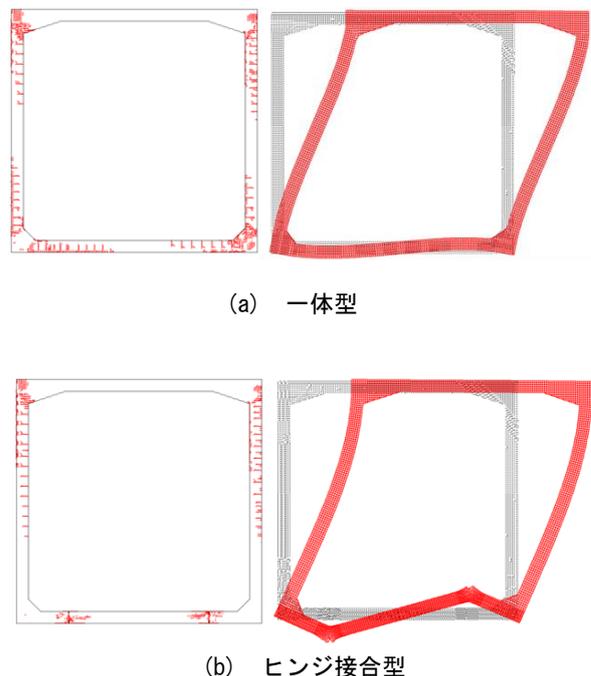


図-14 ひび割れおよび変形図（変位 90mm）

発生する挙動となることが分かる。一方、ヒンジ接合型は、接合部とその近傍の接合筋のすべり挙動が生じている箇所にひび割れが生じているものの、曲げひび割れ発生は側壁上部に留まっている。これはヒンジ接合により側壁のモーメントを低減したことによるものであり、両者の違いはひび割れ図とともに変形図においても顕著に

見ることができ、ヒンジ接合型の回転が底版および側壁の変形に影響を与えることが分かる。なお、ヒンジ接合型では、接合部の周辺で軸方向のひび割れの発生が認められる。接合部の局所的な応力が作用する可能性もあり、補強の必要性など今後は詳細な検討が必要と考えられる。

5. 結論

本研究では、著者6らが提案している簡易なヒンジ接合の繰返し載荷を含む曲げ挙動を、3次元有限要素法で評価するとともに、ボックスカルバートに適用し、提案しているヒンジ接合を有するボックスカルバートの構造性能を解析に検討し、下記の結論を得た。

- (1) 提案している簡易な接合方法の曲げ挙動は、適切な付着応力-すべり関係を用いた3次元有限要素解析で評価可能である。また、その繰返し挙動は、丸鋼を用いたダウエルバー型は大きな残留変位が生じるが逆方向の荷重を受けると急激に目地開きが閉じる挙動を示し、定着板を有するアンボンドPC鋼棒を用いたすべり制御型は除荷時で概ね目地開きが閉じる挙動を示すことが解析的に示された。
- (2) ダウエルバー型とすべり制御型を組合せた複合型の曲げ挙動は、ダウエルバー型とすべり制御型の個別の荷重を加算した結果となる。また、除荷時にはすべり制御型の挙動が支配的になり、目地開きが線形的に閉じる結果となる。
- (3) 複合型のヒンジ接合を底版に用いたボックスカルバートは、一体型のボックスカルバートに比べて降伏までの荷重が小さくなり、底版・側壁の損傷も小さくなることが示された。このように、ヒンジ接合の特徴を活かすことで、同変位での荷重低下やひび割れ損傷が少なくなるような構造形式とすることができる可能性が示された。

本研究ではボックスカルバートに対してのプッシュオーバー解析の結果のみを示したが、提案しているヒンジ

接合の特徴としては、除荷時に目地開きが閉じやすいことが部材レベルの解析で示されたので、今後は繰返し荷重下の挙動への影響を検討する必要がある。また、課題としては、接合部の局所的な応力の影響や、1.はじめに述べたせん断挙動についての検討も必要である。

参考文献

- 1) 全国ボックスカルバート協会：プレキャストボックスカルバート設計・施工マニュアル，2011
- 2) 国土交通省建設産業活性化会議：建設業の総合的な人材確保・育成対策工程表，2014
- 3) 木村政義，市之瀬敏勝，田口孝，深津尚人：ハンチを用いた壁床構造の接合部に関する実験研究，コンクリート工学年次論文集，vol.33，No.2，pp.1531-1536，2011
- 4) 永井覚，山本雄亮，高稲宜和，丸田誠：ヒンジリロケーションを用いたRC壁柱-床梁架構の構造性能，コンクリート工学年次論文集，vol.31，No.2，pp.277-282，2009
- 5) 大野優華ほか：PCa部材と現場打ち部材の接合部のヒンジ挙動に関する検討，第68回土木学会年次学術講演会講演概要集，2015
- 6) 田辺忠顕：初期応力を考慮したRC構造物の非線形解析法とプログラム，技報堂出版，2004.
- 7) Nakamura, H and Higai, T: Compressive fracture energy and fracture zone length of concrete, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, ASCE, pp.471-487, 2001
- 8) 松岡由高，中村光，国枝稔，河村精一：有限要素解析による主筋に丸鋼を用いたRC部材の力学挙動評価，コンクリート工学年次論文集，vol.33，No.2，pp.595-600，2011
- 9) 菅満宜，中村光，檜貝勇，斉藤成彦：RCはりの力学挙動に及ぼす付着特性の影響，コンクリート工学年次論文集，vol.23，No.3，pp.295-300，2001