

論文

[2082] せん断滑り性状を考慮したプレキャスト梁端部の挙動に関する解析

正会員○川辺 祥一 (東京工科専門学校建築科)

正会員 望月 重 (武蔵工業大学建築学科)

正会員 遠藤 幸雄 (武蔵工業大学大学院)

1. はじめに

プレキャストコンクリート構造は、現場工期の短縮化、コンクリート構造物の高品質化が可能であるばかりでなく、現場労働者の不足対策に有利な工法と言える。しかし、プレキャスト構造物の部材接合部の挙動が場所打ちコンクリート構造と比較して複雑であり、まだその抵抗メカニズムが解明されたとは言えない。そこで、本研究は、架構式プレキャスト鉄筋コンクリート構造の部位の中で最も重要であるプレキャスト梁と場所打ちコンクリート柱との接合部に着目し、非線形有限要素法によりプレキャスト梁端部(梁-柱接合面)の挙動に対する解析を試みる。

現在、コンクリート、鉄筋の非線形を考慮した鉄筋コンクリート構造物に対する有限要素解析が盛んに行われており、多くの適応事例が発表され、その解析精度の高さが示されている。しかし、プレキャスト構造物に対する非線形有限要素法に対しては、せん断抵抗メカニズムが鉄筋コンクリート構造と比較して複雑なため、まだ十分にプレキャスト構造物の変形挙動を示すことが出来たとは言えない。

プレキャスト梁端部でせん断力に主に抵抗しているのは、曲げモーメントにより生じた圧縮側の摩擦と、コンクリート境界面での滑りの発生に伴う鉄筋のダウエル効果とダウエル効果によるせん断摩擦効果が考えられるが、既往の直接せん断試験等から、圧縮力による摩擦の影響が大きいことから判断し、今回の解析では、コンクリート境界面でのせん断応力-摩擦すべり変位関係について扱い、ダウエル効果については考慮しない。

本解析では、コンクリートの摩擦によるせん断力-摩擦滑り関係のモデル化を行う。そのモデルを解析に取り入れるには、境界面に接合要素を設けなければならない。一般にはクラックリンクを用いるが、それぞれのクラックリンクにばね定数を設定しなければならない。本解析では要素特性を定義し易い軸剛性とせん断剛性を持つ面要素(ボンド要素)を用いる。

解析対象は、筆者らが行った梁がプレキャスト、柱が場所打ち鉄筋コンクリートの試験体の中で引張鉄筋比の異なる3体と、同じ鉄筋比で粗滑度の異なる試験体について行う[1]。そして、得られた解析結果から、解析の妥当性の確認をする。

2. 実験概要

プレキャスト梁端部の抵抗メカニズムを解明するために実験を行った[1]。実験は、梁をプレキャスト、柱を場所打ち鉄筋コンクリートとして、鉄筋比、シアスパン比、プレキャスト率(梁断面積のプレキャスト部の占める割合)、粗滑度(梁柱境界面の凹凸の高低差、高低差は、型枠鉄板に鉄製の三角棒を添付、粗滑度0の場合は、三角棒は無し、粗滑度3.5mmは、三角棒を添付)を変化させた試験体について行った。代表的な形状であるシアスパン比が2の場合の試験体形状を図1に示す。加力はアクチュエータによる正負交番加力とし、制御部材角は、 $R=1.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 15.0, 20.0, 30.0 \times 10^{-3}(\text{RAD})$ とする。

今回の解析の対象とした試験体は、プレキャスト率が100%、粗滑度が0、シアスパン比が2で、鉄筋比が、0.79%(3-D16)(試験体 No.1)、1.06%(4-D16)(試験体 No.2)、1.52%(4-D19)(試験体 No.3)の3体と、鉄筋比が1.06%で粗滑度が3.5mm(試験体 No.4)の1体、計4体について解析

を行った。表1に各試験体のコンクリート及び鉄筋の材料強度を示す。

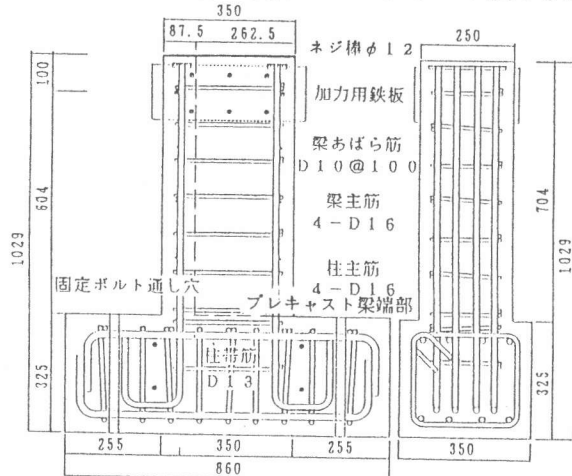


図1 試験体形状

No	コンクリート					
	梁プレキャスト部			柱場所打ち部		
	圧縮強度 kg/cm ²	引張強度 kg/cm ²	ヤング率 x10 ⁴ kg/cm ²	圧縮強度 kg/cm ²	引張強度 kg/cm ²	ヤング率 x10 ⁴ kg/cm ²
1, 2, 3	356	27.2	2.73	370	27.2	2.58
4	345	28.4	3.00	373	30.7	3.00

種類	鉄筋			
	降伏点強度 kg/cm ²	引張強度 kg/cm ²	ヤング率 kg/cm ²	伸び率 %
D10	3,839	5,418	1.83	23.7
D16	4,055	5,578	1.91	21.7
D19	4,052	5,583	1.79	21.7

表1 材料特性

3. 解析方法

3.1 コンクリートと鉄筋の取扱い

非線形有限要素解析を行うにあたり、コンクリート要素は4角形4節点アイソパラメトリック要素とし、鉄筋はトラス要素とした。

コンクリートは、直交異方性材料として扱い、ひびわれの判定は、主応力方向の引張応力が、一軸の最大引張強度に達した時に発生するとした最大主応力判定法による。コンクリートにひびわれが発生すると同時に、ひびわれ発生方向の剛性は0とし、負担していた応力を100%解放する。

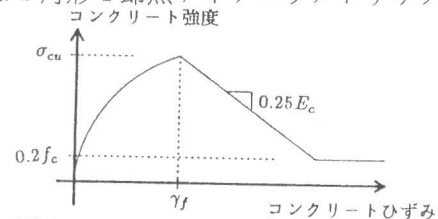


図2 コンクリートの応力-ひずみ関係

コンクリートの圧縮領域での応力-ひずみ関係は、大沼式により求められた二軸応力下における最大圧縮強度 (σ_{cu}) 以前の非線形性を、Kupferの実験式[2]により表現し、最大圧縮強度以降は、応力の低下(ソフトニング)を考慮して、図2に示すように終局残留圧縮応力をコンクリート一軸圧縮強度 (f_c) の0.2倍とした。尚、コンクリートのひびわれの再結が発生した場合の剛性は、コンクリートのヤング係数 (E_c) とする。

鉄筋は、トラス要素とする。鉄筋の応力-ひずみ関係は、バイリニア型であり、鉄筋の降伏後の剛性は0とし、座屈は考慮しない。降伏条件は、Von-Misesの降伏条件に従う。

3.2 接合要素のモデル化

図3に示すように膜ボンド要素は、4角形4節点アイソパラメトリック要素とする。膜ボンド要素は、境界面に垂直な剛性 (D_n) と境界面に平行なせん断剛性 (D_s) を持つ。ボンド要素の応力-ひずみ関係は以下のように示される。

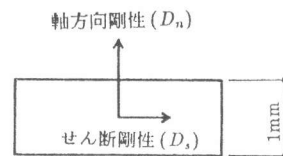


図3 ボンド要素

$$\{\sigma\}^e = [D] \{\varepsilon\}^e \quad (1) \quad \text{ここで } [D] \text{ マトリクスは、} [D] = \begin{bmatrix} D_n & 0 \\ 0 & D_s \end{bmatrix} \quad (2)$$

と示される。 D_n は、コンクリートのヤング係数とした。プレキャスト面と場所打ちコンクリート面の離れは、応力がコンクリートの一軸引張強度を越えた時に発生するとし、その際、 $D_n = 0$ とし、要素が離れた後は、応力を負担しないものとする。又、圧縮を受ける部分において、コンクリートの最大圧縮強度を越えた時は、剛性は0とし、圧縮応力を保持するとする。

プレキャスト構造部材の接合部におけるせん断応力-摩擦滑り変位関係に関する実験報告は多数あるが、一般的な関係式として導いた研究は少ないと言える。その中で、S.G.Tsoukantas, T.P.Tassios[3]は、既往の実験から求めたせん断応力-摩擦滑り変位関係式を与えている。そこで、本解析においても、文献[3]を参考にせん断応力-摩擦すべり変位関係を仮定した。

文献 [3] では、滑らかな境界面、粗い境界面を持つ場合のせん断応力-摩擦滑り変位関係が示されているが、今回解析するモデルは、梁-柱の接合部において、柱が場所打ちコンクリートであることを考慮して、粗い境界面を持つ場合のコンクリートのせん断応力-摩擦滑り変位関係を参考にした。図 4 に仮定したせん断応力-摩擦すべり変位関係を示す。文献 [3] では、既往の実験結果を統計的に処理し、せん断応力-摩擦滑り変位関係は、直線と曲線式で示されているが、実験結果のバラツキ、及び解析の簡便化を考え、本解析では図 4 に示す直線関係でモデル化を行った。図 4 に示す終局摩擦せん断応力 ($\tau_{fr,u}$) は、文献 [3] より引用し、式 (3) とする。

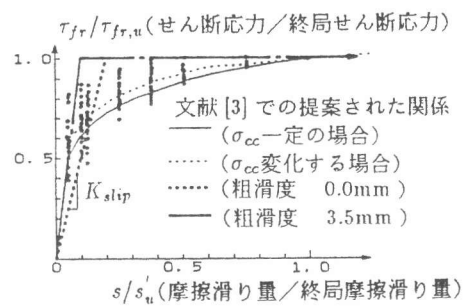


図 4 せん断応力-摩擦滑り変位関係
図 4 に示す終局摩擦せん断応力 ($\tau_{fr,u}$) は、文献 [3] より引用し、式 (3) とする。

$$\tau_{fr,u} = 0.5 \sqrt[3]{f_c^2 \sigma_{cc}} \quad (3)$$

ここで、 f_c は、コンクリートの一軸最大圧縮強度、 σ_{cc} は、コンクリートの応力を示す。本解析では、式 (3) におけるコンクリート応力 σ_{cc} は、曲げモーメントにより生じた梁端部での大きな圧縮力を受ける部分でせん断抵抗が大きいことを考慮して、コンクリート応力 σ_{cc} を一軸最大圧縮強度とした。せん断応力は、境界面が剥離した場合、せん断応力はそれ以後負担しないとする。従って、境界面が剥離した後のせん断剛性は 0 とし、負担していたせん断力は 100% 解放する。

図 4 で示すせん断滑り量 s は、文献 [3] から終局の摩擦滑り量 s'_u を 2mm とし、粗滑度 3.5mm の場合は、文献 [3] で示されているせん断応力-摩擦滑り変位関係の直線部分 (平均値) を延長し、 $s = 0.1s'_u$ (0.2mm) とした。粗滑度 0.0mm の場合は、文献 [3] のせん断応力-摩擦滑り変位関係に示されている実験データの下限值としてかなり粗くはあるが、 $s = 0.2s'_u$ (0.4mm) と仮定した。図 4 で示す摩擦滑り剛性 K_{slip} は、 $K_{slip} = \tau_{fr,u} / s$ の関係から導かれ、ボンド要素のせん断剛性 D_s を、摩擦滑り剛性から求めることが出来る。尚、ボンド要素の厚さは、0 に近い値であるが、解析上今回は 1mm とした。

4. 解析結果

解析方法の妥当性を検討するために、実験概要で示した試験体についての解析結果を示す。本解析において変位増分量は、0.5mm (部材角 0.83×10^{-3} (RAD)) とした。尚、強制変位を与えた箇所は、等分布荷重を加えた中心の節点である。設定した要素数は、コンクリート要素 364、ボンド要素 20、鉄筋要素 251 である。各試験体の材料特性は表 1 による。

4. 1 荷重-部材角関係

荷重-部材角関係を図 5-1、図 5-2 に示す。

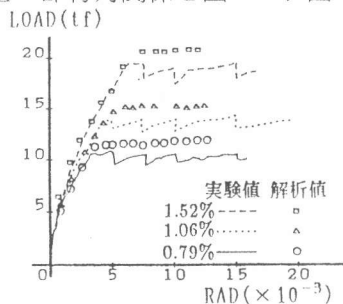


図 5-1 鉄筋比が異なる場合の荷重-部材角

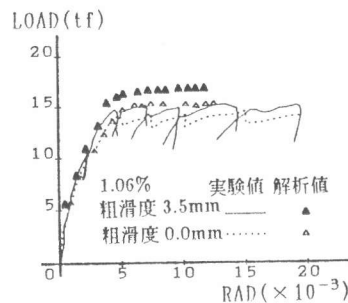


図 5-2 粗滑度が異なる場合の荷重-部材角

図 5-1 は鉄筋比を変えた試験体 No.1、No.2、No.3 の場合、図 5-2 は、鉄筋比が 1.06% で粗滑度を変えた試験体 No.2、No.4 の場合の解析値と実験値での荷重-部材角関係を示している。実験値と解析値を比較すると、やや解析値が曲げ降伏荷重を上回っているが、解析値と実験値はほぼ一致していると言える。尚、曲げ降伏時の荷重が、解析値が実験値を上回った理由としては、実験では、荷重を等分布に加えているが、本解析では、等分布荷重の中心に集中変位を与えているためと考えられる。実験の破壊過程を解析がどの程度再現できているかを確認するために、試験体 No.3 の梁

主筋の降伏が生じた荷重時（21.0(t)）での変形図（解析値）と、実験と解析におけるひび割れ状況図を示す。

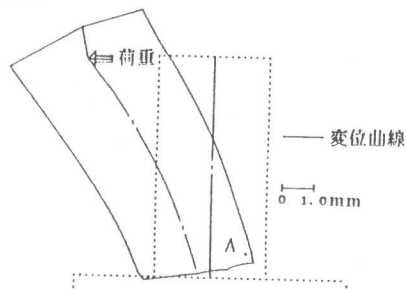


図 5-3 変形図（解析値）

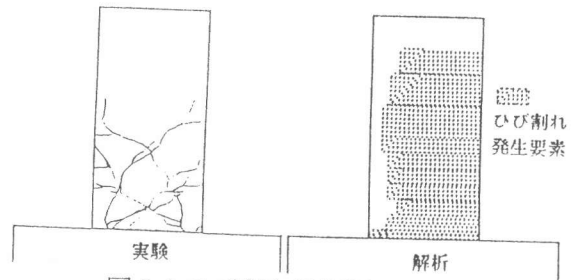


図 5-4 ひび割れ状況図

図 5-3 の変形図から梁端部の滑りが確認された。滑り量は、図 6-1 に示されている。又、A 点の目開き量は、実験値が 4.0×10^{-1} (mm)、解析値が 4.8×10^{-1} (mm) であり、解析値がやや上回った。図 5-4 は実験と解析におけるひび割れ状況を示している。尚、解析のひび割れ状況図は、ひび割れが発生した要素をハッチングで表示している。図 5-4 から、解析におけるひび割れは、実験値のひび割れと比較して、梁全体に発生した。

4. 2 荷重-滑り変位関係

荷重-滑り変位量を図 6-1、図 6-2 に示す。図 6-1 は鉄筋比を変えた試験体 No.1、No.2、No.3 の場合、図 6-2 は、鉄筋比が 1.06% で粗滑度を変えた試験体 No.2、No.4 の場合の荷重-滑り変位量を示している。

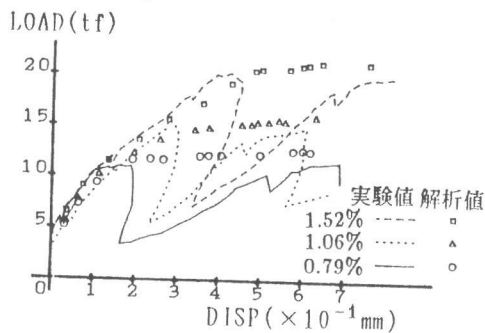


図 6-1 鉄筋比が異なる場合の荷重-滑り量

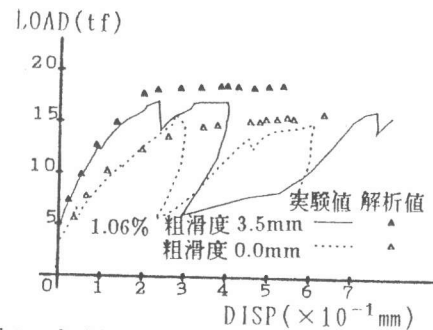


図 6-2 粗滑度が異なる場合の荷重-滑り量

荷重-滑り変位量を解析値と実験値と比較すると、ほぼ一致していると言える。尚、滑り量は、実験において、梁端部から 2.5cm 上の右端、中心、左端での平均値で求めている。従って、解析において 3 箇所共ほぼ同じ滑り量を示しているが、解析における滑り量も、実験で計測した箇所での、滑り変位の平均値とした。

5. まとめ

本研究では、プレキャスト梁端部の滑り性状を考慮した非線形有限要素法解析を試みた。解析対象は、筆者が行った鉄筋比、粗滑度の異なる計 4 体の試験体について解析を適用し、解析と実験との比較検討を行った。その結果、各試験体とも荷重-部材角、荷重-滑り変位量は実験とほぼ一致し、かなり粗いモデルでありながら解析の妥当性は確認された。今後、より精度の高い梁-柱接合面のせん断伝達モデルを提案し、プレキャスト構造物のせん断力伝達メカニズムの解明を試みたい。
[謝辞]: 本解析は、TOTAL-RC システムを利用させて頂きました。解析を行うにあたり御協力頂きました東急建設(株)に感謝いたします。

参考文献

- 1) 望月 重・遠藤幸雄・川辺祥一: プレキャスト梁端部のすべり性状に関する実験的研究、コンクリート工学年次講演会、1992 投稿中
- 2) 土木学会編: 新体系土木工学 29 1981
- 3) S.G.Tsoukantas and T.P.Tassios: Shear Resistance of Connections between Reinforced Concrete Liner Precast Elements, ACI STRUCTURAL JOURNAL, Vol86, No.3, pp242-249, May/June 1989