分割プレキャスト工法の開発 -部材接合部のせん断強度特性-

平野 勝識 笹谷 輝勝

概 要

都市部では、インフラ構築にあたり、既存交通機能への影響を考慮した急速施工に対する需要が高まっている。特に 近年、施工時の車線規制による渋滞で発生する経済的損失などの外部コストを考慮することも求められており、現場作 業を最小化できかつ、現場施工条件による品質の変動を排除できるプレキャスト工法に注目が集まっている。また、大 型揚重機の一般化により、大型プレキャスト部材による工期短縮の採用事例が目立っており、今後成長の期待できる分 野である。プレキャスト部材の大型化は、部材分割・接合が技術課題であり、部材の運搬組立てによる制約から、必ずし も構造上有利な位置での分割が可能とは限らない。本研究は、土木構造物の大型プレキャスト部材の接合を念頭にお いて開発したプレキャスト部材接合工法のせん断実験、および2次元有限要素非線形解析に関するものである。

Development of Divided Component Pre-Cast Concrete method of Construction Shear Strength Characteristics of a Junction Part

Abstract

There is demand for a rapid construction system which minimizes the impact on the existing transport system during construction of new infrastructure. A successful system would minimize the economic loss due to traffic congestion caused by lane-closures during the construction period. One technique for minimizing construction times that is generating much attention is the use of pre-cast concrete. Use of a large crane and large-sized pre-cast members can shorten the construction period significantly. However, component division and joint performance can become increasingly complex (and critical) as size of the members increase. This paper describes the results of a shear experiment and two-dimension nonlinear FEM analysis assessing the "pre-cast members joint" method of construction developed for large-sized pre-cast members.

キーワード: プレキャスト,RC,土木,継手, せん断,コッター

§1. はじめに

従来,比較的大型のコンクリート構造物は場所打ち施工 がなされていたが,近年の社会的なニーズに対応するた めにプレキャスト化の事例が多く見られるようになっている。 これらプレキャスト製品はより一層の大型化,大断面化の 傾向にあり,運搬や施工上の制約から部材を任意断面で 分割し,現場で容易に一体化できる工法の開発が求めら れている。

プレキャスト製品の適用にあたっての問題点として、従 来用いられてきた分割型2次製品のように、分割位置が必 ずしも力学的に影響の少ない位置に設定できないことが 挙げられる。また、阪神淡路大震災以降、地下構造物に対 しても耐震性能の要求レベルが高くなり、部材接合部の耐 震安全性の検討を十分に行うことが求められるようになっ ている。

筆者らは、プレキャスト部材の接合方法として、異種の機 械式継手を併用し、継手充填用のモルタルにより接合面 に溝形コッターを形成するせん断コッター機能と止水機 能を併せ持った新しい工法の開発を進めており、接合部 の曲げ性能¹¹、止水性能²¹に関する実験検討を行ってきた。 前述のように、本工法におけるコッターは、主筋継手部の 高強度モルタル充填時に同時形成される点に特長がある。 しかしながら、高強度モルタルのコッターを有する接合面 のせん断性能に関して過去の知見に乏しく、詳細に検討 する必要がある。

そこで,高強度モルタルのコッターを有するプレキャスト 部材接合部のせん断性状の検討を目的として,対称せん 断実験と,併せて 2 次元有限要素非線形解析を行った。 本報は,それについて報告するものである。

§2. 工法の概要

プレキャストコンクリート部材の接合方法には数多くの 工法が開発・提案されているものの,多くの場合,接合金物 のために断面欠損部が生じ,モルタル等により間詰めする 必要があり,施工効率や品質に与える影響が大きい。

本工法は、図 1,2に示すように,接合する部材それぞれ にモルタル充填継手とねじふし継手という異種の機械式 継手を埋設している。また,部材接合面にせん断抵抗と止 水のための溝型コッターを設けており,継手充填時に溝内 にもモルタルを同時充填する。従って,本工法は接合部に 欠損部が無いため,間詰めが不要であるとともに,製造・運 搬時に部材から鉄筋が突出しないという利点を有してい る。



図2 継手部断面

§3. 逆対称せん断載荷実験

3.1 実験の概要

試験体の概要を図3に示す。試験体寸法および配筋は 実大を想定し,断面寸法は高さ450mm×幅1,000mm,長さ 4,000mmとした。接合部は軸方向主筋の全数接合を基本 とし,継手数の減数化を図りD25(SD390)×3を上下対称に 配筋している。また,組立筋として,4隅にD13(SD295)×4を 配置した。

試験体製作に際しては、プレキャスト部材として半分の 長さの2部材を製作し、所要強度発現後に2つの部材を 接合し、モルタル充填継手に高強度無収縮モルタルを充 填した。なお、充填モルタルは継手性能を満足するために、 高強度かつ充填性に優れるものとしている。また、モルタ ル強度発現後の試験体運搬時には、PC 鋼棒により全断 面圧縮となるよう軸力を導入し、実験直前に解放し、実験 前に有害なひび割れが入らないように配慮した。試験体 に使用した材料試験結果を表1に示す。



表1 材料試験結果

(1)コンクリート・モルタル

材料		圧縮強度 (N/mm ²)	静弹性係数 (N/mm ²)	ポアソン比	割裂強度 (N/mm ²)			
コンクリート		36.1	2.37E+04	0.17	2.4			
充填モルタル		135.0	3.65E+04					
(2)鉄筋								
鉄筋径	材種	降伏点 (N/mm ²)	降伏点ひずみ (×10 ⁻⁶)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)			
D13	SD295	374	2,037	539	1.80E+05			
D25*	CD 200	111	2 4 5 0	646	1 88E+05			
025	20390	444	2,430	040	1.002.00			

(3)鉄筋継手(規格値)

材質規格	耐力 (N/mm²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)				
JIS G 5502 球状黒鉛鋳鉄4種 (FCD600)	370以上	600以上	6%以上				

3.2 載荷方法

載荷位置および変位計測位置を図4に示す。実構造 物が接合面でせん断力を受ける状態として最も厳しくなる 条件を考慮して,接合面で純せん断となる 2 点載荷の逆 対象正負交番載荷とした。また,載荷位置は接合部近傍 の性能を確認するために,接合面に最も近い 2 つの鉄筋 継手の近傍(せん断スパン比:a/d=3.0)とした。加力は,荷 重制御によりひび割れ発生,主筋降伏の 80%ひずみ,主筋 降伏ひずみを正負 1 回載荷した後,変位制御により加力 点位置変位 1.5, 2.0, 4.0, 6.0mm で各正負 1 回載荷を行 った。

3.3 実験結果

2 点の荷重平均値と載荷点変位平均値の関係を図5に 示す。荷重 232kN(変位 0.1mm)時に急激に剛性が低下 し,320kN(変位 0.7mm)で最大荷重を迎えている。この時, 主筋は降伏ひずみに至っていなかった。一方,正側載荷 時の荷重平均値と接合面変位平均値の包絡線を見ると, 荷重 247kN 以降,急激に接合部変位が増大している(図 6)。接合面に厳しい本載荷条件においても,接合面の剛 性低下は部材の剛性低下より後に発生し,部材の降伏の 方が接合面の降伏より先行していることが分かる。

各載荷段階のひび割れ発生状況を図7に示す。最初 に,曲げひび割れが載荷点付近に進展し,最大荷重時に は接合筋位置に水平ひび割れが発生している。加力点 変位 $\delta = 6$ mm時では,かぶりの剥離ひび割れが顕著とな り,部材接合部にも非常に大きな鉛直のせん断ずれが発 生した。しかし,いずれの過程でも,目視ではモルタルコッ ター自体の損傷は認められなかった。 $\delta = -6$ mmのひび 割れ状況を写真1に示す。

以上より,本構造はコッター部を起点とするひび割れ進展に伴う接合部のかぶり剥離によって最大耐力を迎え,以降の変形域は接合筋のダボ作用で約200kNの耐力を維持していると推測する。





図5 荷重~載荷点変位の関係







図7 ひび割れ発生過程



写真1 ひび割れ発生状況(δ=-6mm)

§4. 耐力算定式との比較

実験結果と既存の耐力算定式に基づく計算結果の比 較を表2に示す。ここでは、土木学会コンクリート標準示方 書³⁾の接合部の設計せん断伝達耐力式(式(1))、プレキャ ストコンクリート部材の接合キーの式(式(2)、式(3))および 建築学会⁴⁾のコーン破壊面積Acで破壊した時のせん断耐 力式(式(4))を用いた。

Vcwd = {(τ c+p• τ s•sin2 θ

 $-\alpha \cdot \mathbf{p} \cdot \mathbf{fyd} \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot \mathbf{Ac} + \mathbf{Vk} / \gamma \mathbf{b}$ (1)

ここに、 τ c:コンクリートによるせん断方向成分,p・ τ s・ sin2 θ :せん断面鉄筋によるせん断方向成分, α ・p・fyd・ sin θ ・cos θ :せん断面の鉄筋による低減,Vk:せん断キー によるせん断耐力(Vk=0.1Ak・fcd),Ac:せん断面の面 積であり,実験のコッター面積と面形状係数 b=2/5,部材係 数 γ b=1.0 とした。

Vk=σa・B・L・N/3 (鋼製せん断キー) (2) ここに、σa:接合キーに作用する支圧応力度、B,L,N:鋼 製接合キーの外径、埋め込み深さ、数である。本構造の場 合、モルタルコッターが高強度かつ実験で損傷しなかった ことから本式を適用したものである。埋め込み深さは、鉄筋 継手が埋設されていることを考慮して平均継手長さとし た。

Vk=N・B・t・σa/sin2θ(コンクリート製せん断キー) (3) ここに,σa:接合キーに作用する支圧応力度,N,B,t:コン クリート製接合キーの段数,幅,高さ,θ:接合キーが鉛直面と なす角度である。

$$q_{\max} = \sqrt{F_c \cdot A_c} \tag{4}$$

ここに,Fc:コンクリート圧縮強度であり,Ac:破壊面垂直 投影面積である。

式(1)~(4)全ての式で,実際の耐力を過大に評価してい ることが分かる。式(1)~(3)については,本実験結果の破 壊形態が,算定式が想定しているものと一致していないた めと考えられる。また,式(4)では,鉄筋径からコーン破壊面 を想定しているが⁵⁾,この仮定が本対象部材には成立し難 いためと考えられる。

|--|

	実験値	JSCE (6.3.17式) 設計せん断 伝達耐力 式(1)	JSCE 10.9.4 プレキャストコンクリート部材		建築学会
項目			i)鋼製接合 キーと仮定 式(2)	ii)コンクリート製 接合キー 式(3)	コーン破壊 式(4)
平均荷重 P _{max} (kN)	320	4,577	751	1,752	645
接合面 S _{max} (kN)	240	3,433	563	1,314	484
実験値/ 計算値	1.00	0.07	0.43	0.18	0.50

§5. 2次元有限要素法解析の適用

以上より,高強度のモルタルコッターを有する断面のせん断耐力算定に当たって,別途詳細検討が必要であると 言える。次章において,2次元有限要素非線形解析を適 用し,せん断載荷実験でみられたへりあき部における引張 破壊性状について検討するとともに,あわせて耐力評価の 精度について検証を行うこととする。これは,任意のプレキ ャスト部材を対象とする,数値解析を活用した合理的な耐 力評価手法の確立を念頭に置いてのものでもある。

5.1 解析の概要

本研究では、東京大学コンクリート研究室にて開発中の WCOMD-SJ version 7.3を解析ツールとして使用する。こ こでは、分散ひび割れモデルに基づくコンクリートの平均 化構成則とRC中の鉄筋構成則の機構を足し合わせる 2 次元解析®を適用しているものの、ゾーニング手法 7)を導 入することにより、小鉄筋比に対しても精度が大きく低下し ないよう配慮するとともに、奥行方向に節点を共有させた 要素を重ね合わせて配置して、鉄筋と継手の 3 次元的な 配置についてはできる限り考慮することとした⁸。

モデル化に際しては、モルタル充填継手を等価な正方 形断面に置換して考慮することとした。モルタル充填継手 とねじふし鉄筋継手の寸法、径などを考慮し、断面積から 換算した鉄筋比を有するRC要素として簡略的に扱ってい る。また、モルタルの注入/排出口は考慮しておらず、供 試体の自重も無視している。プレキャスト部材およびコッ ターの接着面については、接合要素⁶⁰を導入した。無筋部 には軸剛性とせん断剛性を有する接合要素(以下、「ユニ バーサルジョイント」と呼ぶ)を、主筋部にはユニバーサル ジョイントとRCの接合面に挿入するために開発されためり 込み、引き抜け、せん断ずれを考慮する接合要素(「RCジョ イント」とする)を重ね合わせて配置している。要素分割は、 図8の通りである。

本検討では,鉄筋のダボ作用を考慮しておらず,接合部 での主筋の付着作用をマッシブなコンクリートに埋め込ま れた場合のモデルを代用している。今後,解析精度を向 上するためには,これらを適切に改善する必要があるが, 設計で要求される変形領域までを対象とする場合には, 影響は少ないと判断したものである。

ユニバーサルジョイントの剛性値は、図8の値としたが、これは接合面でのすべり摩擦が生じない条件を模擬している。なお別途、閉口時のせん断剛性を1.0×10⁻³、1.0×10⁻¹、1.0×10(N/mm²/mm)に変化させた感度解析も事前検討として実施し、その影響がほとんどないことを確認してある。このことは、ここで検討した変形領域では、鉄筋のダボ作用

の影響が極めて小さいことを間接的に裏付けるものであると推察される。なお、コンクリートの引張強度は、乾燥・自己収縮等の影響により、構造体中にあるコンクリートの実質強度が低下すること⁹を考慮して、割裂試験値の70%の強度を入力することとした。



図9 ユニバーサルジョイントの概要6)

5.2 解析結果

図6の実験結果と併記した荷重-変位関係を見ると,実 験では232kN時に剛性が急変し320kNでピークを迎えて いるのに対し,解析では約250kN程度から徐々に剛性低 下はみられるものの実験ほど顕著ではなく,約380kNでピ ークを迎えている。また,接合面変位は全体に小さめに評 価されているが,約250kN以降に剛性が低下していく傾向 が伺える。

解析結果を詳細に検討すると,水平方向に近いひび割 れの進展に伴って,コッター真横の帯鉄筋が 264kN 時に 降伏を迎えている。実験では,剛性低下を示した後にかぶ りコンクリートが剥離することによって最大耐力を迎えてい ると推察されるが,かぶりが完全に一体性を失って破壊す る現象は,分散ひび割れモデルに立脚した本解析におい て,正確に再現されていない。これが,約 250kN 以降の剛 性乖離の主要因であると考えられる。

図10のひび割れ/変形パターンを見てみると,147kN時 に高強度モルタルコッター近傍に水平方向に近いひび 割れが発生し,さらに変形が進むに従って,かぶりコンクリ ート部が押し上げられる形での変形と損傷が大きくなる様 子が認められる。この時,接合部でのせん断ずれ変形が 卓越し,コッターには損傷が見られない。実験で観察され た破壊過程が,概ね再現できていると思われる。 なお,実験においては,コッターの近傍(水平にひび割 れが入った個所)では,ひずみ計測をしていないため,解 析における帯筋降伏荷重の推定精度を直接実験と比較 することはできなかった。

以上により,モデル化に際して既存の RC のモデルを転 用する形で仮定を導入し,比較的粗い要素を用いた 2 次 元解析によっても,高強度のコッター部を起点として水平 方向に近いひび割れが発生し,帯鉄筋が降伏するまでは 概ね評価することができたと判断される。



(1) P=147kN, δ =0.075mm



(2) P=264kN, δ =0.150mm



(3) P=364kN, δ =0.375mm



図 10 ひび割れパターン(δ × 20 で表示)

§6. まとめ

高強度モルタルコッターをプレキャスト部材接合面に有 する本構造が,接合面にせん断力を受けた場合,最大せ ん断耐力はかぶりの剥離で決定されると推定された。また, モルタルコッターには,ほとんど損傷が見られなかった。

本構造のせん断耐力を評価するにあたり,既存の接合 部に関する設計式では,評価することが困難である一方で, 有限要素解析を適用することで,変形・損傷状況をほぼ把 握することが可能となる。今後,本構造のようなプレキャスト 工法に非線形解析を適用し,耐荷機構に則った一層の構 造合理化,新工法開発のスピード化の可能性を模索する 予定である。 謝辞 本報告は、ランデス(株)、東栄コンクリート工業(株)、 東京鉄鋼(株)の共同研究成果の一部を紹介したもので ある。本研究にあたり、御指導ならびに御協力を賜りました 長岡技術科学大学 丸山久一副学長、高知工科大学 島 弘教授、ムサシ設計 吉野次彦氏、(株)コムスエンジニアリ ング 土屋智史博士、また、解析ツール使用許可を頂きま した東京大学大学院 前川宏一教授に厚く御礼申し上げ ます。

参考文献

- 1)平野勝識ほか:異種の機械式継手を併用したプレキャスト 部材接合部の力学的性状,コンクリート工学年次論文 集,Vol.23,No.3,pp.685-690,2001.
- 2)小野修司ほか:モルタル充填式継手で接合したプレキャスト部材接合部の水密性について、コンクリート工学年次論文集、Vol.23,No.3,pp.565-570,2001.
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書[構造性能照査編],2002.
- 4)日本建築学会:各種合成構造設計指針,1985
- 5)石川喬士ほか:HEM 鉄筋継手の性能評価と同継手で接合 したプレキャスト RC スラブの力学的挙動,コンクリート工学 年次論文集,Vol.24,No.2,pp.703-708, 2002.
- 6)Maekawa, K. et al.: Nonlinear mechanics of reinforced concrete, SPON Press, 2003.
- 7)An, X., MAEKAWA, K. and OKAMURA, H.:Numerical simulation of size effect in shear strength of RC beams,Proc. of JSCE,No.564/V-35, pp.297-316, May 1997.
- 8) 土屋智史ほか:梁のせん断耐力と斜めひび割れの 3 次元 分布に及ぼす側方筋の効果,コンクリート工学年次論文 集,Vol.23,No.3,pp.997-1002, 2001.
- 9)Vecchio, F. J. and Collins, M.P.:Response of reinforced concrete to in-plane shear and normal stresses, University of Toronto, Department of civil engineering publication No.82-03, March 1982.



ひとこと

発注の性能規定化により,技術者 に求められる照査技術の重要性 はますます高まってゆくとものと考 えられます。

平野 勝識