

非緊張ストランドを有する接合部一体型 PCa 工法の開発

Seong-Hoon JANG*¹・Hyung-Geun KIM*²・Sam-Young NOH*³・Min-Joo JO*⁴

既往のPCa工法の複数層が1節となった柱は柱梁接合部の鉄筋が露出しているため、2～3階を同時施工する場合露出鉄筋が座屈するおそれがあり、その施工に制約があった。著者らが開発したPCa工法では、柱梁接合部において主筋があらかじめコンクリートで被覆されているため、2～3階同時施工しても十分な剛性を有している。なお、接合部に設置されている貫通孔に梁の主筋およびPCストランドを挿入するため、柱梁骨組の一体性を確保することも可能である。さらに、接合部の貫通孔に設置するPCストランドには緊張力を与えない、非緊張状態で用いるため、現場施工の省力化も実現できる。接合部における継手を要しないため、施工費の節減にも効果的である。PCa梁の下端筋を突出させずに貫通孔を通じてストランドおよび主筋を配置することで、接合部内における鉄筋干渉の懸念もないため、施工性に優れた工法である。

キーワード：PCa工法、非緊張ストランド、梁柱接合部

1. はじめに

近年建設産業では現場労働力の不足、品質管理向上と工期短縮の要求、環境への配慮など、さまざまなニーズを満足させる工法の開発が重要な課題となっている。

このような問題に対応できる工法として、工場で製作したプレキャスト（以下、PCa）部材を現場で組み立てることで建物の骨組を完成させるPCa工法が注目されている。PCa工法は現場作業の省力化が可能であり、天気など現場の外的状況に影響されにくいいため、工期短縮および品質管理向上に効果的な工法である。韓国においても、PCa工法を適用した建築物は増え続けており、とくにモジュールが規則的な地下駐車場を中心として活用されている。

プレストレストコンクリートを利用した高性能なPCa工法として、1990年代からプレキャストプレストレストコンクリート工法、ハイブリッド工法¹⁾、DDC工法（Dywidag Ductile Connection）²⁾などが開発されている。プレキャストプレストレストコンクリート工法は、プレストレスにより接合されたPCa部材の一体性を確保し、耐震性能を向上させた工法である。ハイブリッド工法は、プレストレスによる復元性を活用した工法である。しかし、これらの工法は柱梁接合部を貫通するPC鋼材用のスリーブを埋設するなど、複雑な施工過程とプレストレス導入のための別途の装置および技術が要求され、経済性および施工性に課題がある。DDC工法は、柱内にロッドを挿入し、これに梁主筋を接合する工法として、じん性に優れる。しかし、柱内に挿入したロッドが高価であり、高所での高い精度の施工が要求される。

韓国において、一般的に地下駐車場に適用されるPCa工

法では、複数階を同時に施工する場合、写真-1に示すように、柱梁接合部において柱主筋が露出している場合がほとんどであり、接合部に現場打ちコンクリートが施工されるまでは、水平力に弱い、不安定な部材である。とくに、工期短縮を図るために2～3階を同時に施工する場合、工程が進むほど自重が増加するため、接合部の露出鉄筋が座屈しないように工程を管理することが必要である。



写真-1 従来の2層1節PCa柱
(www.archiproducts.com)

また、PCa梁の下端筋は接合部で不連続であり、骨組の一体化のためにはPCa梁の下端筋を接合部内で定着させる必要がある。この場合、接合部内の配筋が過密となり、現場配筋作業が困難となる。

前述したように、既往のPCa工法は経済性および施工性の制約により、その適用に制限があり、工期短縮を行うとしても、安全性を考慮しながら進めなければならない。

本報では上記の制限を解決するために韓国の漢陽大学およびロッテ建設、SH公社、ポスコ建設、東西PCC、三票P&Cによって開発され、韓国の国土交通省による建設新

*¹ Seong-Hoon JANG：(株)ロッテ建設 技術研究院 ビルディング研究チーム チーム長（韓国）

*² Hyung-Geun KIM：ソウル特別市SH公社 SH都市研究所 研究委員（韓国）

*³ Sam-Young NOH：漢陽大学工学研究科 建築工学専攻 教授（韓国）

*⁴ Min-Joo JO：アイスト構造設計事務所 副社長（韓国）

技術認証を獲得（第736号）した「非緊張ストランドを有する接合部一体型PCa工法」を紹介する。本工法は耐震性能が要求されない地下階に使用されるPCa工法として、既往の工法に比べて安全性および工期短縮に効果的である。

2. 非緊張ストランドを有する接合部PCa工法

2.1 工法の概要

図-1に著者らが開発したPCa工法を示す。本工法で用いられるPCa柱は2層1節で構成され、2層同時施工が可能なPCa柱である。通常のPCa柱と同様な形状で製作されるが、接合部にはPCa梁架設のための段差を有する(図-2)。600×600mmの断面を有するPCa柱の場合、この段差の深さは約80mm程度となる。なお、PCa柱の接合面は梁の主筋およびストランドを挿入できる貫通孔を有し、この孔に非緊張ストランドおよび主筋が挿入される。貫通孔は2段で構成され、ストランドおよび主筋を配筋する際、お互いに干渉しないように一定の間隔を置いて設置されている。上段孔には主筋が、下段孔にはストランドが挿入され、PCa梁と柱の一体化が可能となる。

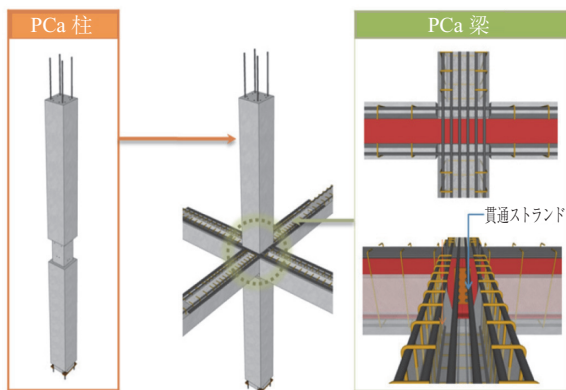


図-1 非緊張ストランドを有するPCa工法

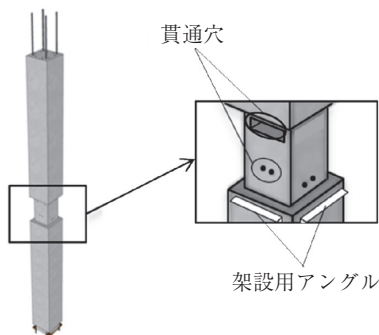


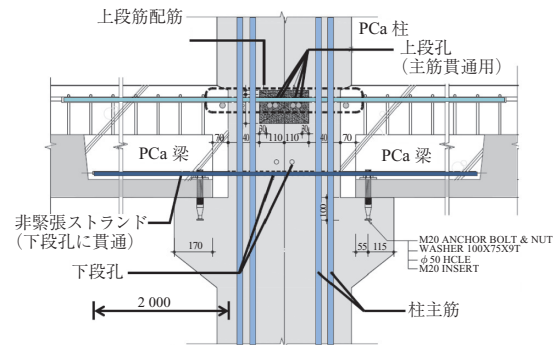
図-2 開発された工法に用いられるPCa柱

図-3、写真-2～3は本工法による施工図(平面および断面)および施工例を示す。PCa梁の端部はPCa柱へ架設後、コンクリートの現場打設が可能となるように、U字型断面となっている。この現場打ちコンクリートが所定の強度に達するまでPCa梁を支持するために、PCa柱の段差下部には鋼製アングルが設置されている。この鋼製ア

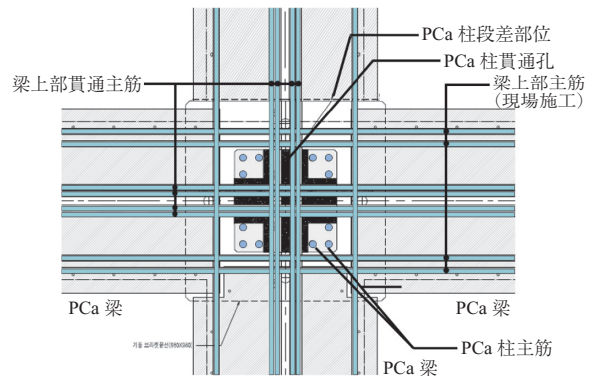
ングルは現場打ちコンクリートが所要の強度に達すると取り外す仮設用部材である。PCa梁の下部主筋は不連続であり、上部主筋は連続性を保つため、柱の上段孔を通じて貫通させる。なお、下段孔を通じて挿入されるストランドの定着長さはACI318-08(American Concrete Institute)に従い、下式による長さ l_b 以上になるように2000mmで設計された。

$$l_b = 0.145 (f_{se}/3) d_b + 0.145 (f_{ps} - f_{se}) d_b = 1708 \text{ mm}$$

ここで、 f_{se} : 0.75 f_{ps} 、 f_{ps} : ストランドの降伏強度 (1745 MPa)、 d_b : ストランドの直径 (12.7 mm)



(a) 断面



(b) 平面

図-3 提案工法の施工図例



写真-2 工法の現場施工例

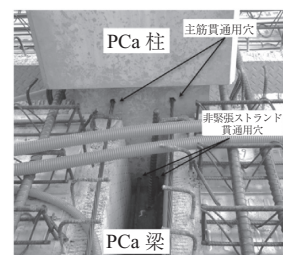


写真-3 工法の現場施工例(接合部)

2.2 非緊張ストランドの性能検証

本工法には緊張力を導入しないストランド（非緊張ストランド）が用いられるため、このようなストランドの使用に関する構造的性能の検証が必要である。非緊張ストランドを構造部材に使用するために、著者らは非緊張ストランドを有する PCa 部材および骨組の曲げ性能評価を行うため載荷実験を行い³⁻⁵⁾、その安全性を検証した。ストランド比（ストランド断面積総和/PCa 梁断面積）を実験変数として、非緊張ストランドと主筋を併用した 5 体の PCa 梁（写真 - 4）および 2 体の柱梁骨組（写真 - 5）に対して静的載荷実験を行い、破壊状況、曲げ剛性、曲げ耐力、変形性状、接合部のエネルギー消費性能などを評価した。表 - 1 は実験に使用された材料の力学的特性を示す。非緊張ストランドの場合、降伏時ひずみが 0.96 % となり、降伏するまでは非常に大きな変形を伴うことになる。しかし、提案工法は、主筋と非緊張ストランドを併用する工法として、主筋のみが降伏し、非緊張ストランドは弾性挙動をするように設計されたため、非緊張ストランドは降伏する必要がない。

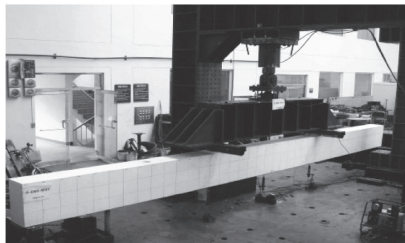


写真 - 4 非緊張ストランドを有する PCa 梁の実験^{4, 5)}

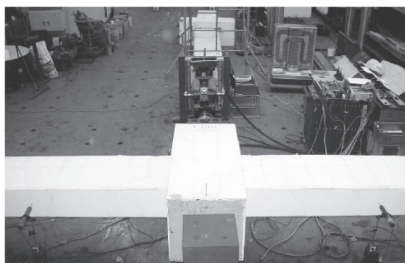


写真 - 5 非緊張ストランドを有する PCa 骨組の実験^{4, 6)}

表 - 1 材料の力学的特性

	f_y (MPa)	ϵ_y (%)	E_s (GPa)	f_u (MPa)
鉄筋 (D22)	486	0.26	184	630
鉄筋 (D25) - 主筋	442	0.25	193	619
ストランド (12.7 mm)	1 745	0.96	199	1 951

ここで、 f_y ：降伏強度、 f_u ：引張強度、 E_s ：弾性係数、 ϵ_y ：降伏時ひずみ

表 - 2 は PCa 梁試験体の実験結果のまとめを示す。試験体の最大耐力は設計耐力の 1.06~1.25 倍に相当し、十分な曲げ性能を有すると判断され、非緊張ストランドと主筋を併用する場合、普通鉄筋のみを使用する鉄筋コンクリート梁と同様に、曲げ耐力の評価が可能であることが明らかとなった。ストランド比の影響については、ストランド比が 60 % ($\rho = 60\%$) を超えると、最大耐力の 70 % 以下

において、主筋降伏後の曲げ剛性が降伏以前の曲げ剛性と比べて 1/3 以下まで低下し、非緊張ストランドの付着力低下による変形の増加が顕著であった^{3, 4)}。そのため、提案工法を建築物に適用するためにはストランド比の制限が必要である。しかし、本工法で実際に使用される非緊張ストランドの梁断面積に対する比は 28 % 程度であるため、耐震性能を要求しない地下駐車場の設計に適用するには問題ないと判断される。

表 - 2 PCa 梁の実験結果のまとめ

No.	ρ (%)	V_d (kN)	V_y (kN)	V_u (kN)	V_u/V_d	δ (mm)	K_1	K_2
1	0	173	166	183	1.06	207	3 898	165
2	28	159	131	182	1.15	300	3 246	505
3	43	207	154	239	1.15	304	3 151	925
4	60	144	78	180	1.25	201	2 777	936
5	100	129	-	145	1.13	256	981	981

ここで、 ρ ：ストランド比、 V_d ：設計耐力、 V_y ：主筋降伏時荷重、 V_u ：最大荷重、 δ ：最大荷重時たわみ、 K_1 ：主筋降伏前曲げ剛性、 K_2 ：主筋降伏後曲げ剛性

表 - 3 は PCa 柱梁骨組試験体の実験結果のまとめを示す。ACI318-08 は、PCaPC 造が一体性を確保するために、部材変形角 3.5 % における保有耐力が最大耐力の 75 % 以上を維持し、エネルギー消費率 (β) が 0.125 以上になることを規定している。ここで、 β は部材変形角 3.5 % サイクルにおけるエネルギー消費率として、 Δ_1/Δ_2 のように定義される。ここで、 Δ_1 は 1 回目サイクルに対する初期剛性となす四辺形の面積を、 Δ_2 は最終サイクルの消費（ループの面積）を表す。表 - 3 に示すように、主筋および非緊張ストランドを併用した PCa 柱梁骨組試験体は、部材変形角 3.5 % における荷重が 85.2~93.5 % であり、 β が 0.13~0.51 を示して、ACI の基準値を満足することが分かった。

表 - 3 PCa 柱梁骨組の実験結果

No.	ストランド	$V_{3.5}$ (kN)	V_u (kN)	$V_{3.5}/V_u$ (%)	β
1	1-12.7 mm	261	279	93.5	0.51
2	3-12.7 mm	506	593	85.2	0.13

2.3 開発された工法の特長

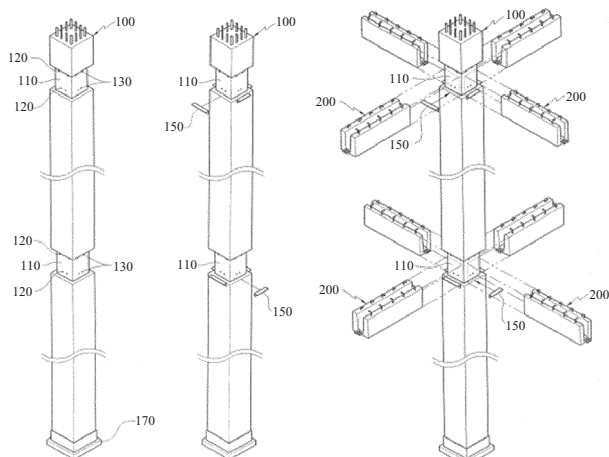
既往の PCa 柱梁工法の場合、もっとも大きい応力が発生する接合部において、PCa 柱の露出主筋が継手によって接合されるため、接合部の剛性が低く、2~3 階の同時作業を行うと、増加した重量によって、露出した接合部の主筋が座屈し、架設中の PCa 骨組が崩壊するおそれがあった。しかし、著者らが開発した PCa 工法では接合部の鉄筋が露出せず十分な剛性を有するため、2~3 階にわたる作業を同時に行っても、十分な安全性を確保することが可能であり、工期短縮にも優れる。

なお、接合部において鉄筋の継手を要しないため、施工費の節減にも効果的である。PCa 梁の下端筋を突出させず、貫通孔を通してストランドおよび主筋を配筋することで、接合部内における鉄筋干渉の懸念もないため、施工性の向上も可能である。

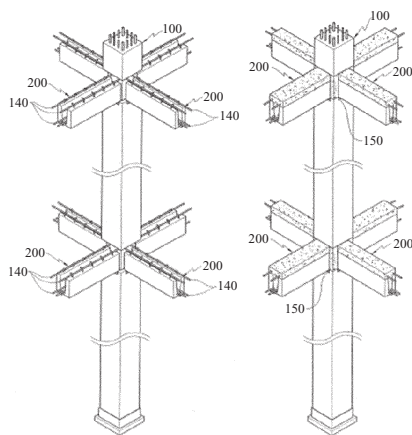
2.4 開発工法における施工手順

著者らが開発したPCa工法における施工手順は以下のようになる。梁設置用段差および貫通孔を有するPCa柱を設置・固定する(図-4(a))。PCa柱の下端にはベースプレートが設置され、アンカーボルトを利用して柱を固定する。その後、仮設用アングルをPCa柱の段差の下部に設置する(図-4(b))。さらに、U字型端部を有するPCa梁を架設する(図-4(c))。

PCa梁の架設後、上段および下段貫通孔を通じて梁の主筋およびストランドを挿入する(図-4(d))。その後、図-4(e)に示すように、PCa梁端部(U字型部分)にコンクリートを打設する。コンクリート強度が十分に発現すれば、仮設用アングルを取り外して柱梁骨組を完成する。



(a) PCa柱設置 (b) アングル設置 (c) PCa梁架設



(d) ストランドおよび主筋挿入 (e) コンクリート打設

図-4 開発工法の施工手順

3. ま と め

本記事では、漢陽大学およびロッテ建設、SH公社、ボスコ建設、東西PCC、三票P&Cからなる研究団が開発したPCa骨組工法を紹介した。本工法は柱梁接合部において高い剛性をもつため、2~3階にわたる同時施工が可能であり、非緊張ストランドを貫通孔に設置するため、別途の現場作業が少ない。なお、接合部における継手も不要であるため、施工費の節減にも効果的である。

参考文献

- 1) Suzanne D. Nakaki, John F. Stanton, Sri Sritharan: An Overview of the Press five-story Precast Test Building. PCI Journal, Vol.43, No.2, 1999, pp.26-39.
- 2) Robert E. Englekirk: Development and testing of a ductile connector for Assembling precast concrete Beams and Columns, PCI Journal, Vol. 39, No. 2, 1995, pp.36-51
- 3) Sam-Young Noh, Min-Joo Jo, Hyung-Geun Kim, Jea-Chun Jung : Flexural Performance Assessment of a Joint-Unified PC Beam-Column System Using the Untensioned Wire Strand, Vol.27, No.1, Architectural Research, Architectural Institute of Korea, pp. 51-58, 2011.
- 4) Sam-Young Noh, Min-Joo Jo, Jea-Chun Jung, Seong-Jin Hong : Structural Performance of PC Beam-Column Joint Using the Untensioned Wire Strand, Vol.28, No.1, Architectural Research, Architectural Institute of Korea, pp. 3-10, 2012.
- 5) Min-Joo Jo, Sam-Young Noh : Structural Performance of PC Beam-Column Joint Using Untensioned Wire Strand, Advanced Science Letters, American Scientific Publishers, Vol.9, pp.210-215, 2012.

謝 辞

本報の作成につきまして、多大なるご指導・助言をいただきました西山峰広教授(京都大学工学研究科・建築学専攻)に心から感謝の意を表します。

【2016年5月30日受付】