

論文 PC 鋼棒を用いた接合構造を有するプレキャスト部材の耐荷性能に関する実験的検討

大矢 智之*¹・渡部 太郎*²

要旨：プレキャスト部材の接合作業の省力化を図るため、PC 鋼棒を用いた接合構造を考案し、その耐荷性能を確認するため、PC 鋼棒による接合構造を有するスラブ試験体の曲げ載荷試験を行った。その結果、接合構造を有するスラブが通常の RC スラブと同等の耐荷性能を有すること、PC 鋼棒に導入するプレストレスの大小は接合構造の曲げ耐力に影響がないこと、接合面に配置したせん断キーは接合構造の曲げ剛性の向上に寄与すること等が確認された。

キーワード：プレキャスト、接合部、PC 鋼棒、プレストレス、せん断キー、曲げ耐力

1. はじめに

近年、人口減少の影響により建設産業では生産性向上への注目が高まっている。そのような中で特に注目されているのがプレキャスト工法である。プレキャスト工法は、コンクリート部材を予め工場で製作し、現地で組み立てる工法であり、現場での鉄筋組立作業やコンクリート打込み作業を省略することができ、コスト削減・工期短縮に繋がる合理的な工法といえる。しかしながら、部材の接合部においては場所打ちコンクリート作業を要することが多く、抜本的な省力化には至っていない。本研究では、このようなプレキャスト接合部のうち、スラブ同士の接合部に注目し、接合作業の施工性向上・コスト削減を目的とした接合構造を考案した。また、考案した接合構造を有するスラブ試験体の曲げ載荷試験を行い、耐荷性能に関する実験的検討を行った。

2. 接合構造

2.1 構造

今回考案する接合構造の概要図を図-1 に示す。接合面にはせん断キーを設け、それぞれの部材を PC 鋼棒にて接合する。接合構造における荷重の伝達機構としては、圧縮力を接合面、引張力を PC 鋼棒、せん断力をせん断キーおよび PC 鋼棒にて負担することを期待している。接合方法を図-2 に示す。PC 鋼棒は片側の部材に定着させておき、もう片側の部材には PC 鋼棒を挿し込む管とグラウト注入口、PC 鋼棒締付のための箱抜き部を設けておく。Step1 で PC 鋼棒をもう片側の部材に挿し込みながら部材同士を結合させ、Step2 で箱抜き部へと貫通した PC 鋼棒にアンカープレートおよびナットを取り付け締付けを行い PC 鋼棒に軸力を導入する。その後、Step3 に

て PC 鋼棒周囲をグラウト孔からのグラウト注入にて充填したのち、Step4 で箱抜き部を無収縮モルタルにて充填する。本工法では、現場での型枠組立や鉄筋組立作業およびコンクリート打込み作業を省略することができ、作業時間が制限されることの多い鉄道工事において大きなメリットとなる。なお、本構造は部材厚が小さいプレキャスト接合部に適用でき、主にスラブ同士の接合部への適用をターゲットとしている。

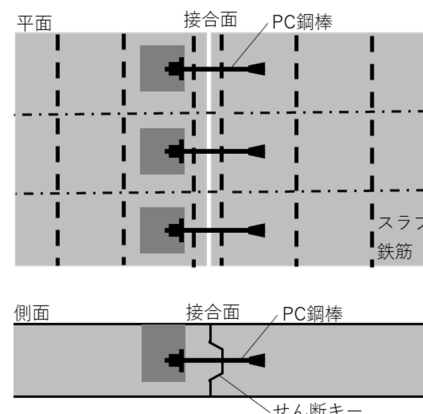


図-1 提案する接合構造

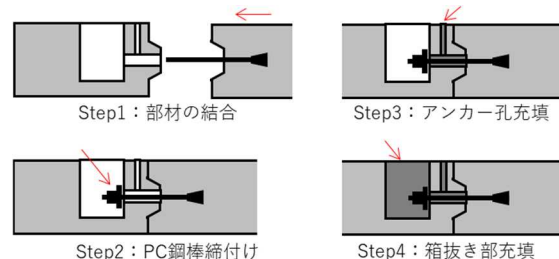


図-2 接合方法

*1 東日本旅客鉄道株式会社 JR 東日本研究開発センター テクニカルセンター 研究員(正会員)

*2 東日本旅客鉄道株式会社 JR 東日本研究開発センター テクニカルセンター 主幹研究員 博(工)(正会員)

2.2 テーパー型先端定着体

今回、部材に予め固定させている PC 鋼棒の定着方法として小林ら¹⁾が考案したテーパー型ナットを PC 鋼棒の定着体とした工法（図-3。以下、テーパーナットアンカーと呼ぶ。）を採用した。テーパーナットアンカーとはテーパー形状に加工したナットを PC 鋼棒先端に定着体として取り付けたもので、PC 鋼棒直径の 20 倍の長さを定着長として確保することにより PC 鋼棒破断荷重相当まで引抜耐力を有することが報告されている。



図-3 テーパー型先端定着体

3. 実験概要

3.1 試験体

今回の実験に用いた試験体の諸元を表-1に示す。試験体は計 10 体で、No.1 は通常の RC 部材とし、それ以外の 9 体は全て接合構造を設けた試験体とした。試験体の幅×長さは全て 600mm×4000mm とし、高さは実際のスラブ厚さを想定し、300mm, 250mm, 200mm とした。その他のパラメータとしては、接合に用いる PC 鋼棒の径(φ13, 17), 導入するプレストレス力(80~160kN/本), PC 鋼棒の定着長 (10φ, 20φ), セン断キの有無を設定した。なお、プレストレス力の値は PC 鋼棒の降伏強度の 7 割程度を上限として設定し (φ13 で 110kN, φ17 で 160kN), それに対する比較として φ17 において 135kN および 80kN を設定した。

使用したコンクリート強度及び鉄筋量を表-2に示す。一例として No.6 (断面高さ 250mm, PC 鋼棒 φ17, プレストレス力 160kN/本, 定着長 20φ, シアキー有り) の配筋図を図-4に示す。PC 鋼棒の定着範囲下面には用心鉄筋を、箱抜き部前面側にはグリッド筋を補強筋として配置している。なお、接合構造における PC 鋼棒の本数は全て 2 本とし 240mm 間隔としている。

表-1 試験体諸元

試験体 名称	高さ (mm)	幅×長さ (mm)	接合構造	PC 鋼棒径 ×本数	定着長	プレストレス 力(kN/本)	せん断キ
No.1	300	600×4000	無し	—	—	—	—
No.2			φ13×2	20φ	110	有り	
No.3					φ17×2		160
No.4							135
No.5			φ13×2	10φ	110		
No.6	250		有り	φ17×2	160		
No.7					80		
No.8					110		
No.9				φ13×2	20φ	160	無し
No.10				φ17×2		110	有り

表-2 使用材料

試験体名称	RC 部		接合部
	コンクリート呼び強度	主方向配筋/鉄筋降伏強度	PC 鋼棒/降伏強度, 引張強度
No.1~5	30.0N/mm ²	D16(SD345)@237mm/ fsy=390.0N/mm ²	φ13(C 種 1 号)/fpy=1114.3N/mm ² , fpu=1302.3N/mm ² φ17(C 種 1 号)/fpy=1064.7N/mm ² , fpu=1209.9N/mm ²
No.6~9		D19(SD345)@237mm/ fsy=370.3N/mm ²	φ13(C 種 1 号)/fpy=1154.3N/mm ² , fpu=1323.0N/mm ² φ17(C 種 1 号)/fpy=1192.3N/mm ² , fpu=1308.1N/mm ²
No.10		D16(SD345)@237mm/ fsy=377.7N/mm ²	

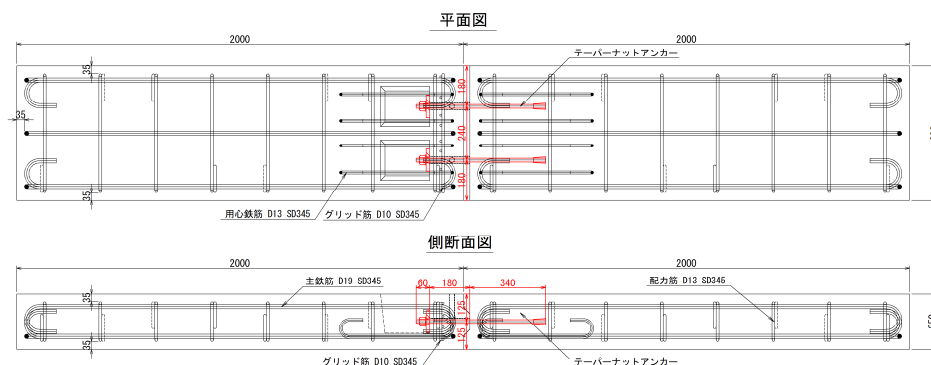


図-4 No. 6 配筋図

3.2 接合試験

載荷試験に先立ち、製作したスラブ試験体を結合し、ナット締付けによる接合・プレストレス力の導入、アンカー孔および箱抜き部の充填を行った。締付け作業は、PC 鋼棒のひずみを計測しながら行い、予め目標値として設定したひずみに達するまで締付けを行った。なお、締付け後から載荷試験までの期間に生じるひずみ減少（軸力抜け）の影響を考慮し、接合時には所定軸力の1割増し程度の軸力に相当するひずみを目標値としてプレストレス力を導入した。

3.3 載荷試験

載荷試験の概要図を図-5 に示す。接合部をスパン中央に配置し、載荷点はスラブ試験体全幅で載荷を行い、支点部もスラブ試験体全幅で支持して、曲げ載荷試験を行った。左右に載荷される荷重の合計値を本報告内における荷重 P とし、スパン中央（接合構造下面）における鉛直変位を本報告内における変位 δ と定義する。載荷試験は、RC 部に曲げひび割れが発生する 30～35kN 程度までを載荷し除荷するサイクルを2度行い、3サイクル目で試験体が破壊するまで静的に載荷を行った。載荷試験直前の状況を写真-1 に示す。

の期間におけるひずみ減少の程度が試験体毎に差異があったものの概ね設定した値に近い軸力を導入することができた。

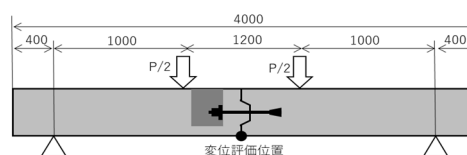


図-5 載荷試験概要図

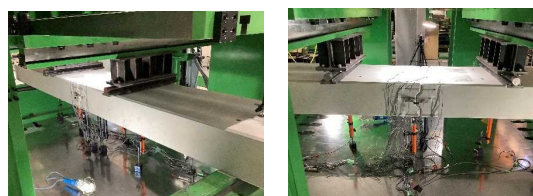
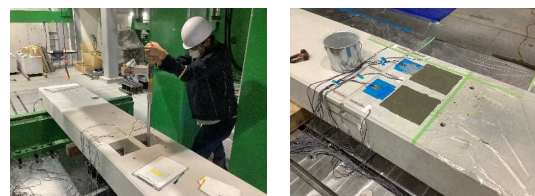


写真-1 載荷試験直前の状況



a) 締付け状況

b) 接合完了

写真-2 接合試験状況

4. 試験結果

4.1 接合試験

締付けはトルクレンチを用いた人力作業にて実施した。締付け状況および接合完了状況を写真-2 に示す。また、接合試験時に計測されたひずみおよび想定軸力と、載荷試験前（接合試験後2～7日程度）のひずみおよび想定軸力を表-3 に示す。なお、ひずみはPC 鋼棒に貼付したひずみゲージにより計測しており、接合試験時の想定軸力は使用した同ロットの材料試験により導き出された応力-ひずみ曲線に照らし合わせ算出している。載荷試験前の想定軸力は、接合試験時からひずみ減少分に PC 鋼棒断面積および材料試験により算出されたヤング係数 (No.2, No.5 は 198.5kN/mm², No.3, No.4 は 201.2kN/mm², No.6, No.7, No.9 は 210.7kN/mm², No.8, No.10 は 199.7kN/mm²) を乗じて算出している。接合試験から載荷試験実施まで

表-3 接合試験結果

試験体	設定軸力	接合試験	載荷試験前
No.2	110.0	5210 / 121.7	4766 / 110.0
No.3	160.0	4052 / 176.3	3698 / 160.3
No.4	135.0	3379 / 150.5	3099 / 138.9
No.5	110.0	5225 / 121.3	4730 / 109.2
No.6	160.0	3748 / 179.4	3202 / 153.3
No.7	80.0	2073 / 98.7	1726 / 82.0
No.8	110.0	5129 / 123.7	4336 / 103.0
No.9	160.0	3767 / 180.2	3249 / 155.5
No.10	110.0	5128 / 123.9	4431 / 105.5

各数値は「ひずみ値 (μ) / 想定軸力 (kN)」を示す

4.2 荷重試験

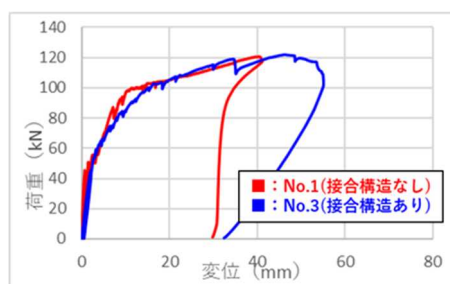
荷重試験における各試験体の最大荷重および破壊形態（最大荷重時の状況）を表－4 に示す。各パラメータの影響について項目ごとに以下に示す。

(1) 接合構造の影響

接合構造のない No.1 と同じ断面高さ（300mm）で $\phi 17$ の PC 鋼棒を接合構造として用いた No.3 の荷重変位関係を図－6 に示す。最大荷重は No.1 で 120.7kN、No.3 で 121.7kN とほぼ同等の値となった。No.3 は接合部の圧壊（写真－3）により最大荷重を迎えた一方、No.1 では最大荷重付近で荷重点治具の転倒により実験を中止したが、最大耐力の計算値が 121.6kN であることから、曲げ破壊する寸前であったと推定される。荷重変位関係においても、荷重初期段階および降伏段階において、No.3 の剛性が No.1 と比較しやや低くなる傾向が見られるが全体的に概ね一致している。以上から、接合構造を有する試験体は PC 鋼材量およびプレストレス力を適正に設定す

表－4 荷重試験結果

試験体	最大荷重 (kN)	破壊形態 (最大荷重時の状況)
No.1	120.7	荷重台転倒
No.2	74.0	PC 鋼棒降伏
No.3	121.7	接合部圧壊
No.4	119.9	接合部圧壊
No.5	45.2	定着部破壊
No.6	81.0	接合部圧壊
No.7	84.5	接合部圧壊
No.8	62.9	接合部圧壊
No.9	88.5	上面かぶり剥離
No.10	46.4	接合部圧壊



図－6 荷重変位曲線（接合構造の影響）



写真－3 No. 3 接合部圧壊の状況

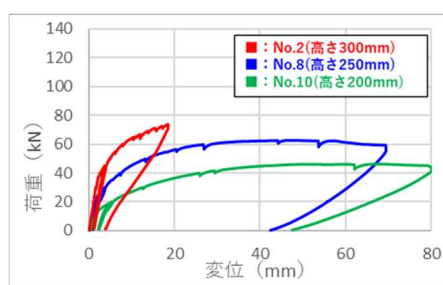
ることで、接合構造のない試験体とほぼ同程度の耐荷性能を有することがわかる。

(2) 断面高さの影響

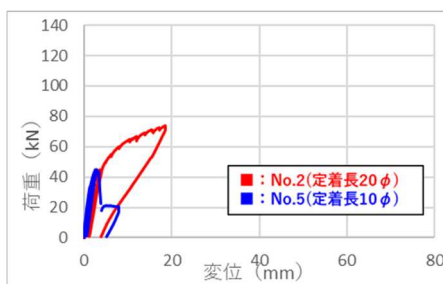
部材断面高さの異なる試験体 No.2（高さ 300mm）、No.8（高さ 250mm）、No.10（高さ 200mm）の荷重変位関係を図－7 に示す。PC 鋼棒はいずれも $\phi 13$ で、プレストレス力は 110kN/本である。最大荷重は、No.2 で 74.0kN、No.8 で 62.9kN、No.10 で 46.4kN で断面高さが小さくなるにつれ最大荷重も小さくなる傾向となった。No.2 は PC 鋼棒の降伏（8000 μ 程度）で試験を中止したが、No.8 および No.10 は接合面上部のコンクリート圧壊により荷重を終了している。これにより、部材断面高さは接合面の耐力に影響を与えることがわかる。また、PC 鋼材量に対し部材断面高さが大きい場合、接合面の圧壊よりも PC 鋼棒の降伏・破断が先行する可能性が考えられ、本接合構造においても通常の RC 部材と同様の破壊特性を有することがわかる。

(3) 定着長の影響

PC 鋼棒の定着長が 20 ϕ の No.2 と定着長が 10 ϕ の No.5 の荷重変位関係を図－8 に示す。両試験体はいずれも PC 鋼棒の径が $\phi 13$ で、プレストレス力は 110kN/本である。No.2 は最大荷重 74.0kN で PC 鋼棒の降伏に達したが、No.5 は最大荷重 45.2kN で写真－4 から分かるように躯体下面に定着部の破壊とみられる割裂ひび割れが発生し、荷重が低下した。テーパナットアンカーは 2.2 で示したとおり、定着体のテーパ形状により引抜力を放射状に分散させることから、定着長が短ければ PC 鋼棒降伏前に躯体側が破壊する可能性があると考えられる。今回の試験結果により、本接合構造においても、テーパナットアンカーの定着長は 20 ϕ を確保する必要があることがわかった。



図－7 荷重変位曲線（断面高さの影響）



図－8 荷重変位曲線（定着長の影響）

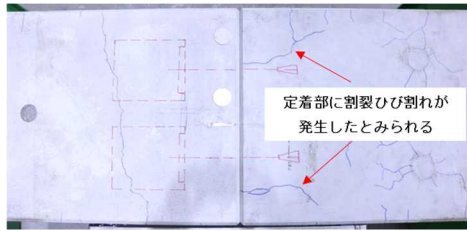


写真-4 No. 5 の下面ひび割れ状況

(4) PC 鋼材量の影響

PC 鋼材量の影響の確認として、断面高さ 300mm の No.2 (PC 鋼棒 $\phi 13$) と No.4 (PC 鋼棒 $\phi 17$) および断面高さ 250mm の No.7 (PC 鋼棒 $\phi 17$) と No.8 (PC 鋼棒 $\phi 13$) を比較した。荷重変位関係を図-9 に示す。最大荷重は、No.2 で 74.0kN, No.4 で 119.9kN, No.7 で 84.5kN, No.8 で 62.9kN であり、断面高さ 300mm, 250mm いずれも、PC 鋼材量の多い $\phi 17$ を用いた試験体の方が最大荷重が大きくなることが確認できる。このことから、接合構造の耐力には PC 鋼材量が影響することがわかり、実際の構造物に適用する際には、PC 鋼棒の径を上げること、PC 鋼棒同士のピッチを広げることができ、配筋及び接合手間の軽減に繋がると考えられる。

(5) プレストレス力の影響

PC 鋼棒に導入するプレストレス力の影響の確認として、断面高さ 300mm の No.3 (PS (プレストレス力) =160kN/本) と No.4 (PS=135kN/本) および断面高さ 250mm の No.6 (PS=160kN/本) と No.7 (PS=80kN/本) を比較した。PC 鋼棒の径はいずれも $\phi 17$ である。これらの荷重変位関係を図-10 に示す。最大荷重は、No.3 で 121.7kN, No.4 で 119.9kN, No.6 で 81.0kN, No.7 で 84.5kN となり、断面高さ 300mm, 250mm いずれも最大荷重に明確な差はみられなかった。しかしながらプレストレス力が高い試験体はプレストレス力の小さい試験体よりも剛性が高く、変位が抑制されていることがわかる。特にプレストレス力を No.7 (PS=80kN/本) の 2 倍に設定した No.6 (PS=160kN/本) は No.7 の半分程度に変位が抑制されていることがわかる。これらのことから、PC 鋼棒に導入するプレストレス力の大小は接合構造の最大荷重に与える影響は少ないものの、変位に与える影響は大きいことがわかる。接合構造の変位の増加は、部材間の目開きの増加に繋がり、目開きが増加すると PC 鋼棒が露出し腐食するおそれがある。また、スラブ同士の接合に本接合構造を用いた場合、変位の増加は列車の走行安全性を脅かしかねないため、PC 鋼棒に導入するプレストレス力は極力大きくする必要があると考えられる。

(6) セン断キーの影響

せん断キーのある No.6 とせん断キーのない No.9 の荷重変位関係を図-11 に示す。いずれも断面高さは 250mm

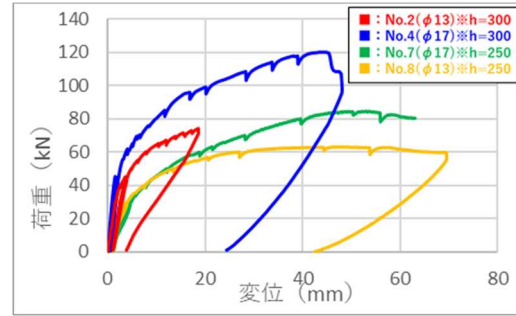


図-9 荷重変位曲線 (PC 鋼材量の影響)

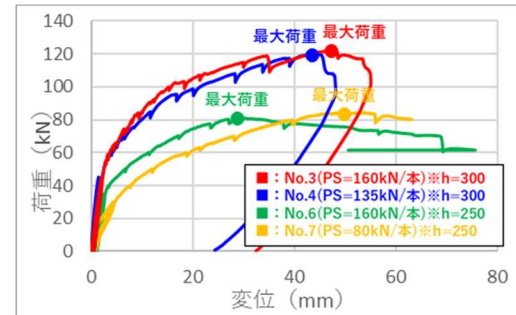


図-10 荷重変位曲線 (プレストレス力の影響)

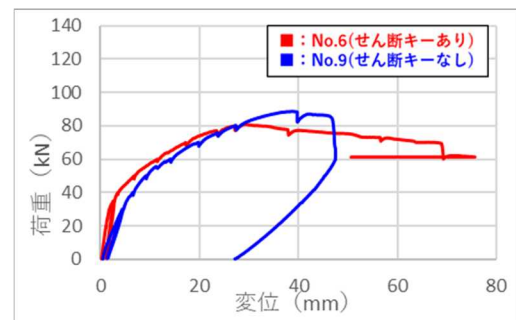
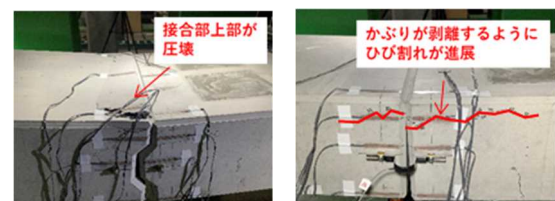


図-11 荷重変位曲線 (せん断キーの影響)



a) No.6 せん断キーあり b) No.9 せん断キーなし

写真-5 最大荷重時の状況

で PC 鋼棒の径は $\phi 17$ 、導入したプレストレス力は 160kN/本である。No.6 は最大荷重 81.0kN で接合部上部が圧壊した一方で No.9 は最大荷重 88.5kN で接合部上側のかぶりが剥離していくような損傷状況を示した (写真-5)。その他、せん断キーのない No.9 はせん断キーのある No.6 よりも載荷初期段階から剛性が低く、より大きな変位が生じていることがわかる。これはせん断キーがないことにより、部材同士の接触範囲が接合面上部に集中したことで、接合部の回転が起こりやすくなったものと考え

られる。接合面の圧縮力が上部のみに集中したことは、No.9 の接合部上側かぶりが剥離していった要因とも考えられる。以上のことから、せん断キーの有無により最大耐力の値に変化は見られなかったが、せん断キーを配置することにより接合構造の剛性が大きくなることがわかった。

5. 曲げ耐力の評価

一般的に RC 部材の曲げ耐力は、断面のひずみが直線分布となる「平面保持」、およびコンクリートと鉄筋のひずみが一致する「完全付着」の仮定のもと算出されている。この算出式を今回の接合構造にあてはめ算出した曲げ耐力と、実験の最大荷重を表-5 に示す。なお、算出した曲げ耐力はコンクリート圧縮縁の圧壊を想定しているため、これ以外の破壊形態となった No.1,2,5,9 については対象外とする。算出した曲げ耐力はいずれの試験体においても実験値を上回っている。これは、今回の接合構造が上述した「平面保持」および「完全付着」の仮定を満たしていないことが要因と考えられる。今回用いた PC 鋼棒は付着が少なく、定着されているテーパーナット頭頂部から箱抜き部のアンカープレートまでの約 465mm はアンボンド区間となり PC 鋼棒に生じるひずみは一樣となり、周囲のコンクリートとは縁を切った変形・ひずみが生じていることから、これらの仮定は成り立っ

ていないことがわかる。これらの仮定が成り立たない場合の曲げ耐力の算出方法としては、「付着のある場合と同様の方法で算出した曲げ耐力を 30%減じる方法」がある²⁾。この方法を採用し、曲げ耐力を算出し直したところ、全ての試験体において実験値が計算値を上回り、No.6, 7, 10 においては概ね一致した。

6. まとめ

今回、PC 鋼棒を用いたプレキャスト部材の接合構造を考案し曲げ耐荷性能について実験的検討を行った。本件により得られた結果を以下にまとめる。

- (1) PC 鋼材量とプレストレス力を適正に設定した接合構造を有する RC 部材は、接合構造のない通常の RC 部材とほぼ同等の耐荷性能を有する。
- (2) 断面高さや PC 鋼材量が大きくなることで、接合構造の曲げ耐力は大きくなる。
- (3) PC 鋼棒に導入するプレストレス力の大小は接合構造の曲げ耐力には影響がないものの、接合構造の剛性には影響を与え、プレストレス力が大きいほど剛性が高まり変位が抑制される。
- (4) 接合面におけるせん断キーの配置は部材同士の接触範囲を広げ、接合構造の曲げ剛性を高める。
- (5) 接合構造は「平面保持」や「完全付着」の仮定が成り立たず、従来の曲げ耐力算出方法では、実験値と比較し計算値が大きくなるが、計算値を補正することにより安全側に実験値を評価できることがわかった。

表-5 曲げ耐力の実験値と計算値の比較

試験体	最大荷重 (実験値) (kN)	計算式		計算式×70%	
		曲げ耐力 (kN)	実験値/ 計算値	曲げ耐力 (kN)	実験値/ 計算値
No.3	121.7	130.8	0.93	88.4	1.38
No.4	119.9	139.6	0.86	94.6	1.27
No.6	81.0	117.1	0.69	79.3	1.02
No.7	84.5	117.1	0.72	79.4	1.06
No.8	62.9	67.2	0.94	44.4	1.42
No.10	46.4	52.4	0.89	43.3	1.07

参考文献

- 1) 小林薫，鈴木雄大，平林雅也，伊藤隼人：テーパー型ナットを PC 鋼棒定着体としたあと施工アンカー工法に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.2，pp.1609-1614，2016.7
- 2) コンクリート標準示方書【設計編】，土木学会，2017.12