U字型プレキャスト部材を用い材端で全数縦重ね継手した梁部材に関する 実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON REINFORCED CONCRETE BEAM WITH ALL LAPPED SPLICES IN BEAM DEPTH WAY AT THE CRITICAL REGION, USING U-SHAPED PRECAST BEAM

西村 勝尚*, 江戸 宏彰**, 高見 信嗣***, 大住 和正*
Katsuhisa NISHIMURA, Hiroaki ETO, Shinji TAKAMI
and Kazumasa OSUMI

For the purpose of comprehending the performance and the bond characteristics of reinforced concrete beam with all lapped splices in beam depth way at the critical region using U-shaped precast beam with longitudinal and transverse reinforcing steel bars, the authors performed cyclic loading tests for beams subjected to bending moment and shear force. In this case, the splicing reinforcing steel bars passed through beam-column joint are put on top of bottom bars (vertical splicing). As the result, it is clarified that 1) length of yield region was 1/2 of beam depth, 2) stress of main bar at end of lapped splice was evaluated by assuming the truss mechanism under the truss angle 45° , 3) the bond splitting strength of vertical splicing was evaluated by considering vertical binding force required to transmit bond force of splicing bar on the basis of assuming the truss mechanism and using the past evaluation of bond splitting strength.

Keywords : lapped splice, bond splitting strength, deformation behavior, yield region, truss mechanism, precast member
重ね継手, 付着割裂強度, 変形性状, 降伏域, トラス機構, プレキャスト部材

1. はじめに

省資源、南洋材型枠の削減等による地球環境への配慮、高品質、高耐久、工期短縮、省力化等を目的とした柱、梁、壁等の主要構造体にプレキャスト（以下P C aと記す。）部材を用い建物を構築していくP C a 化構・工法が各種提案され、実用化されている。その中で、梁外周部分をP C a 化したU字型の薄肉P C a 部材を用い中空部に後打ちコンクリートを現場にて打設一体化させる構・工法がある。U字型P C a 部材は軽量化が図れると共に、梁主筋の継手に最も簡便な工法である重ね継手を用いることが可能であり有益な構・工法である。梁の下端1段主筋とせん断補強筋を打込んだU字型P C a 部材の底に柱梁接合部を貫通する主筋（以下継手筋と記す。）を配する構・工法もその内の一つであり、P C a 部材内に打込んだ主筋の位置あわせが不用であり、また現場での配筋作業が最小となるためP C a 部材製作及び施工性の向上の面において非常に有用である。さらに、モーメント勾配を考慮するとP C a 部材内の下端主筋量を低減できる可能性がある。

この構・工法の場合、P C a 部材内に打込んだ梁下端主筋の上に継手筋を配置する縦重ね継手となり、さらに梁部材端降伏領域に全数重ね継手を設けることになる。このようなU字型P C a 部材を用いた梁部材の構造性能を把握し、設計法を確立するためには次のような検討課題が考えられる。

・降伏領域において梁主筋を全数梁せい方向に重ね継手（以下縦重

ね継手と記す）した場合の付着性能

- ・モーメント勾配を考慮し、柱梁接合部に定着される主筋量よりP C a 部材内主筋量を削減した場合の影響
- ・縦重ね継手する鉄筋間にP C a 部材と後打ちコンクリートとの打継ぎを有する場合の付着性能
- ・降伏域長さや部材としての変形能力

重ね継手部の付着割裂強度はコンクリート強度、せん断補強筋量、主筋間隔、かぶり厚さ、継手長さなどの影響を受けることが既に知られており、既往の研究も多数ある。日本建築学会より「重ね継手の全数継手設計指針（案）・同解説」^{文献1）}（以下全数重ね継手指針と記す）が発刊され、降伏領域で全数重ね継手した場合の設計及び算定方法が提案されている。全数重ね継手指針は水平重ね継手を基本としてまとめられており、縦重ね継手に関しては水平重ね継手と同等以上の性能が認められ、付着割裂強度を算定する際には鉄筋のあき間隔を水平重ね継手に置き換えて算定してもよいとされている。しかし、水平重ね継手と縦重ね継手において、重ね継手強度が継手部でのサイドスプリット型の付着割裂破壊により決まることを想定すると、水平重ね継手では付着割裂ひび割れは全主筋を連なって生じることが容易に想像できる。しかしながら、縦重ね継手では付着割裂ひび割れは全主筋を連なることはなく、付着割裂面に作用する割裂力と拘束力の関係は水平重ねと異なり、付着割裂強度に少なからず差異が生じると考えられる。

* ㈱大林組本店建築設計部
** ㈱大林組技術研究所建築構造研究室 工博
*** ㈱大林組原子力本部技術部

Architectural and Engineering Dept. Obayashi Corporation
Building Structure Engineering Dept. Technical Research Institute, Obayashi Corporation, Dr. Eng.
Engineering Dept. Nuclear Facilities Division, Obayashi Corporation

重ね継手に関する研究は水平重ね継手に関する研究^{文献2)3)}が多く、縦重ね継手に関する研究は少ない。縦重ね継手に関する研究は、主として部材としての曲げおよびせん断性状に注目しており、付着割裂強度そのものを対象としたものは限られている。その中で、縦重ね継手の付着割裂強度に関する研究^{文献4)}では、縦重ね継手の付着割裂強度は既往の評価式による計算値よりも実験値の方が高くなることを指摘すると共に、純曲げ実験結果より付着割裂強度評価式を提案しているが、この評価式が曲げせん断を受ける部材に適用できるかは不明である。また、重ね継手部の鉄筋は同径、同本数とした実験がほとんどであり、異なる鉄筋同士の縦重ね継手を有する場合の性能は明確にされていない。

本研究では、梁下端主筋及びせん断補強筋を打込んだU字型PCa部材を用い梁端部で継手筋を梁下端主筋の上に配置した全数縦重ね継手を設けた梁部材の曲げせん断実験を行い、継手筋と主筋の断面積が異なる場合を含め、構造性能を把握すると共に、既往の実験結果と本実験結果を基に曲げせん断を受ける梁部材の縦重ね継手部の付着割裂強度および曲げモーメント勾配を考慮した継手端での主筋応力度の評価を試みた。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体一覧を表1に、試験体形状、配筋を図1に示す。実物の約1/2を想定し、試験体の断面寸法は全試験体共通で $b \times D = 324 \times 400$ 、上端1段筋は通し配筋である。

表1 試験体一覧

No	打設方法	主筋 (鋼種)	下端 2段筋 (鋼種)	継手筋 (鋼種)	重ね長さ (mm)	L/D	せん断補強筋 上段:端部 下段:中央部
1	一体	上6-D19	2-D19 (SD390)	5-D19 (SD390)	—	7	4-D6@50 (pw=0.79%) 2-D6@50 (pw=0.40%)
2	PCa	下5-D16 (SD390)			760		
3		上6-D19 下5-D19 (SD390)			950		
4		上6-D19 下5-D19 (SD390)			760		
5	一体	上3-D19 +2-D16 下5-D19 (SD685)	—	5-D19 (SD685)	570	4	4-D6@50 (pw=0.79%) 4-D6@50 (pw=0.79%)
6	PCa	上6-D19 下5-D19 (SD685)			570		
7		上6-D19 下5-D19 (SD685)			570		
8		上3-D19 +2-D16 下5-D19 (SD685)			570

図1 試験体形状および配筋例

No.1~No.4は曲げ降伏先行型を想定し、 L/D (L :部材の内法長さ、 D :梁せい)を7とした。No.1は一体打ちとし、上下1段筋を通し配筋、上下2段筋はカットオフ配筋とした。No.2~No.4はU字型PCa部材を用い下端1段筋を全数縦重ね継手とし、上下2段筋はカットオフ配筋とした。No.2は重ね長さを $40d$ ($d=760\text{mm}$ 、 d :鉄筋径)とし、継手筋はD19、主筋(PCa部材内の軸方向筋)はD16を用いた。No.3は重ね長さを $50d$ ($=950\text{mm}$)とした以外はNo.2と同様である。No.4は重ね長さをNo.2と同様の $40d$ であるが、主筋は継手筋と同じD19を用いた。いずれの試験体も2段筋の長さは梁端部から 1060mm とした。主筋、継手筋はSD390、せん断補強筋はSD295Aとした。

No.5~No.8は重ね継手部の付着割裂破壊型を想定した試験体であり、重ね長さは全て $30d$ とした。No.5は一体打ちとし、下端筋は1段配筋とした。No.6~No.8はU字型PCa部材を用い、No.6はNo.5と同様に下端筋は1段配筋とした。No.7は下端筋を2段配筋(長さ 1060mm)とした。No.5~No.7の L/D は7とし、No.8はNo.6と同様の断面で L/D を4とした。主筋、継手筋はSD685、せん断補強筋はSD295Aとした。

表2に使用した材料試験結果を示す。PCa部材の内型枠は合板型枠とし、剥離剤は塗布せず木目を材軸方向とした。なお、U字型PCa部材は、天地逆にし、梁下面よりコンクリートを打設して製作した。コンクリートは全試験体ともに最大骨材寸法 13mm のものをを用いた。

表2 材料試験結果

コンクリート	圧縮強度(N/mm^2)		ヤング係数($\times 10^4 \text{ N/mm}^2$)	
	PCa	後打ち	PCa	後打ち
No.1	—	40.3	—	2.44
No.2	33.3	37.7	2.49	2.47
No.3	36.1	40.9	2.59	2.57
No.4	33.6	38.7	2.50	2.45
No.5	—	40.4	—	2.63
No.6	36.4	41.0	2.63	2.53
No.7	34.4	39.1	2.53	2.48
No.8	36.0	40.3	2.58	2.53

鉄筋	降伏強度(N/mm^2)	降伏歪($\times 10^{-6}$)	破断強度(N/mm^2)	ヤング係数($\times 10^5 \text{ N/mm}^2$)
D6	329	1718	452	1.95
D16(SD390)	452	2384	607	1.98
D16(SD685)	729	4025	962	2.06
D19(SD390)	433	2269	593	2.00
D19(SD685)	756	4547	1014	2.03

図2 相対変形測定図

図3 PCa部材と内部コンクリート間の相対滑り量測定図

2. 2 載荷および測定方法

建研式の載荷方法とし、逆対称の曲げせん断力を試験体に加えることとした。正負の繰返し載荷とするが、曲げ降伏型の No.1~4 は変位制御とし、相対変形角 $1/400, 1/200, 1/100, 1/50, 1/33, 1/25$ で各 2 サイクル繰り返した。また、付着割裂破壊型の No.5~8 は主筋端部の平均応力度 σ で制御することにしたが、結果的には主筋の降伏が先行したので、主筋の平均応力度が 686N/mm^2 以降のサイクルでは変位制御に切り替えて載荷を行った。

計測は、加力点位置におけるスタブ位置の相対変形のほか、主筋およびせん断補強筋の主要な箇所の歪みについて行った。スタブ間の相対変形は、図 2 に示すように、試験体上下のスタブに L 形鋼を取付け梁中央で変位計により測定した。また、図 3 に示すように、スパン中央の梁下面において P C a 部材および内部コンクリートに埋込んだボルトに平鋼および L 形鋼を取付け、両者間の相対変形を変位計で測定し、相対滑り量を算出した。なお、内部コンクリートに埋込んだボルトは、P C a 部材にルーズホールを設け、P C a 部材が埋込みボルトの変形を拘束しないようにした。

2. 3 実験結果

2. 3. 1 破壊経過

表 3 に実験結果の一覧を示す。図 4 に試験体 No.2、7、8 の最終

表 3 実験結果一覧

No	曲げひび割れ時			曲げ降伏時			最大耐力時					破壊 モード	
	実験値 せん断力	実/計	変形角 ($\times 10^{-3}$)	実験値 1) せん断力	実/計 2)	変形角 ($\times 10^{-3}$)	実験値		実/計 2)	実/計 4)	実/計 5)		変形角 ($\times 10^{-3}$)
							せん断力	付着応力度 3)					
1	44.1	1.80	1.58	176	1.05	10.8	195	—	1.16	0.58	0.62	50.1	B
2	59.3	2.51	1.96	178	1.06	9.97	190	3.17	1.13	0.57	0.67	20.0	B
3	28.9	1.17	0.793	174	1.04	9.33	194	2.39	1.15	0.57	0.65	20.0	B
4	43.6	1.82	1.45	169	1.01	9.30	189	3.26	1.13	0.56	0.65	20.0	B
5	27.5	1.16	0.846	216	0.99	15.3	254	8.82	1.16	0.45	0.65	30.1	BS
6	24.5	1.01	0.750	232	1.06	17.2	254	9.45	1.16	0.44	0.60	30.1	BS
7	29.4	1.22	0.804	293	0.99	22.1	308	8.35	1.04	0.55	0.71	30.3	BS
8	95.1	2.26	1.82	362	0.96	15.8	392	8.38	1.04	0.69	0.95	27.6	BS

図 4 最終ひび割れ図

実験値は kN, N/mm^2

- 1) 下端 2 段筋降伏で判定、2) $M_y=0.9a_s\sigma_yd$ 、3) 梁端部から $D/2$ での歪みから算定した継手筋の付着応力度、4) 靱性指針^{文献 5)} による部材中央部せん断耐力、5) 靱性指針^{文献 5)} による付着破壊を考慮したせん断耐力 (部材中央部)、B: 曲げ降伏破壊、BS: 曲げ降伏後の付着割裂破壊

図 5 せん断力—相対変形角関係

の領域の付着割裂ひび割れは最後までほとんど発生していなかった。いずれの試験体も曲げ降伏破壊であった。

試験体 No.5~7 は、0.0008rad あたりで曲げひび割れが発生し、第4サイクル（主筋平均応力度 329N/mm²）以降に重ね継手部に沿った付着割裂ひび割れが生じ始めていた。重ね継手部の付着割裂ひび割れは、表面上はそれほど顕著ではないが、最終的に部材端部では継手筋が P C a 部材から抜け出していることが確認された。いずれの試験体も曲げ降伏しており、曲げ降伏後の重ね継手部の付着割裂破壊と判断した。試験体 No.8 も曲げひび割れが先行するが、第6サイクル（主筋平均応力度 588N/mm²）あたりから上端1段筋周りに付着割裂ひび割れが生じ始め、第7サイクル（主筋平均応力度 686N/mm²）以降ではそれらの付着割裂ひび割れが口開きを始めていた。鉄筋の降伏は下端筋では生じていたが、上端筋では起きていなかった。下端側重ね継手部で主筋に沿ったひび割れは少なかったことから、曲げ降伏後の上端筋付着割裂破壊と判断した。

2. 3. 2 変形性状と耐力

図5に荷重-相対変形角関係を示す。

試験体 No.1~4 の荷重-相対変形角関係は 0.01rad 前後で曲げ降伏（2段筋降伏）し、最終ループとなる 0.05rad まで耐力低下は起きず紡錘型の安定した履歴形であった。最大荷重もほぼ同じであり、重ね継手の有無、P C a の有無、重ね長さの相違及び下端主筋径の違いによる性状の変化はほとんど見られなかった。

曲げ降伏後の付着割裂破壊と想定される試験体 No.5~8 は、いずれも相対変形角 0.03rad 程度まで耐力を維持し、その後耐力低下が生じている。製作方法において P C a 部材の有無だけが異なる試験体 No.5 と No.6 は 0.03rad まではほとんど同じ履歴形状であったが、0.05rad でのサイクルで No.6 は大きな耐力低下を起こしているのに対して No.5 の耐力低下は No.6 に比べ小さかった。この耐力低下は重ね継手部の付着割裂破壊が原因であると想定される。P C a 部材を使用した No.6 では継手筋と主筋の間に打ち継ぎ部があり、重ね継手部での応力伝達に何らかの影響を及ぼしたものと推測される。

表3に示すように、No.1~4 の曲げ降伏荷重の実験値/計算値は 1.01~1.06、最大荷重の実験値/計算値は 1.13~1.16 といずれも実験値が計算値を上回っており、曲げ耐力が十分発揮されたといえる。

No.5 と No.6 の曲げ耐力に対する最大荷重の実験値/計算値はともに 1.16、No.7 と No.8 は 1.04 であり、実験値が計算値を上回っていた。曲げ降伏後上端主筋で付着割裂破壊した No.8（但し、上端主筋は降伏していない）の付着割裂破壊を考慮したせん断耐力に対する実験値/計算値は 0.95 であり、試験体 No.8 の破壊経過で述べた上端筋が付着割裂破壊している可能性があることと対応している。

3. 実験結果の検討

3. 1 鉄筋の歪み分布

既往の研究^{文献6)}によると、主筋の歪み分布より降伏域に縦重ね手を設けた場合、通し配筋に比べ降伏域が短くなり、30d の重ね長さの場合 0.75D、40d の重ね長さの場合 0.5D 程度（D：梁せい）であったと報告されている。

本実験における下端筋の材軸方向の歪み分布を図6に示す。主筋は、いずれの試験体においても、継手筋カットオフ位置で最大歪みに達している。通し配筋の No.1 試験体では、主筋は端部より梁せい（D=400mm）程度まで降伏歪みに達している。一方、縦重ね継手試験体 No.2 のスタブ内に定着されている継手筋は端部より 0.5D 程度まで降伏歪みに達している。また、曲げ降伏後の付着割裂破壊と判定される試験体 No.7 も No.2 試験体と同様の結果である。

重ね継手部の付着割裂破壊を防止する検討を行う場合、継手長さは付着強度から決まる継手筋の定着応力に必要な継手長さに、継手筋の降伏域長さを累加した長さとする必要がある。以上の検討結果および既往の研究より、縦重ね継手の場合、降伏域長さを 0.5D として評価しても良いと思われる。但し、前述したように重ね継手長さにより降伏域は変化する傾向があるため、付着割裂破壊を検討する上で、今後、継手長さと降伏域長さ関係を明確にする必要がある。

図6 下端鉄筋の歪み分布

図7 P C a と内部コンクリートの相対滑り量と界面せん断応力度

3. 2 U字型P C a部材と内部コンクリートの滑り

スパン中央においてU字型P C a部材の底面と内部コンクリートとの打継ぎ部相対滑り量を計測している。スパン中央の計測点の両側で計測された主筋の歪みから得られる応力度差を界面に生じるせん断応力度とし、この界面せん断応力度と計測した相対滑り量の関係を図7に示す。

No.2、No.7 試験体の相対滑り量は小さいが、せん断力が大きいNo.8では明確に滑りが生じている。P C a部材との打継ぎ面のせん断応力度がせん断補強筋の降伏応力度 ($=p_w \sigma_{wy}$) 前後から滑り量が大きくなり始めている。このことより、界面での応力伝達をせん断摩擦と考え、摩擦係数 1.0 とした場合に相当する。但し、界面のせん断応力度の算出に際し、梁幅方向に均一に作用すると仮定していること、およびU字型P C a部材の側面でも一体になることより、実際の摩擦係数はもっと小さいものと推察される。

3. 3 主筋応力度の評価

実験結果において、曲げ降伏する部材の耐力を決定する端部の継手筋よりも重ね継手筋である主筋の鉄筋量を低減したNo.2、3試験体（本実験では、主筋量は端部の鉄筋量の70%程度である。）は通し配筋のNo.1試験体あるいは継手筋と主筋が同径、同本数のNo.4試験体と同等の性能を有している。このことは曲げせん断を受ける部材の場合、同径同本数の鉄筋による重ね継手にする必要がないことを示唆している。そこで、主筋応力度の推定を試みる。

曲げ及びせん断力を受ける部材において、せん断力をトラス機構により全て負担すると仮定し、任意断面での力の釣合いを考える。図8に示すように、せん断力Vに抵抗するコンクリートの斜め圧縮ストラットの材軸方向力成分の反力に対して梁の上下主筋の引張力Tにより釣合いと仮定すると、任意断面での引張側主筋応力度は(1)式により推定することができる。

$$\Sigma T = V \cdot \cot \phi, \sigma = M / (0.9 \cdot d \cdot \Sigma a_t) + V \cdot \cot \phi / \Sigma a \quad (1)$$

図8 トラス機構によるせん断力と主筋応力関係

(1)式による引張主筋応力度の推定に関する妥当性を検証するため、実験の歪ゲージから得られた梁主筋応力度と $\cot \phi = 1$ とした場合の(1)式による計算値の対応を図9に示す。なお、図9に

図9 主筋応力度の実験値と計算値の対応

図10 付着割裂強度に関する実験値と藤井・森田式による計算値との対応

図11 付着割裂強度に関する実験値と田畑・西原らの式による計算値との対応

は、変形角 0.005rad と 0.02rad の場合について継手筋がカットオフされるB断面と二段筋がカットオフされるC断面における梁下端主筋応力度に関して示す。図9より、梁端部であることよりトラス機構のコンクリートの圧縮ストラット角度を 45 度として評価した計算値と実験値はよく対応しており、 $\cot \phi = 1$ として(1)式により下端主筋応力度を推定することが可能である。

4. 付着割裂強度の評価

4. 1 縦重ね継手に対する既往の付着割裂強度式の適用

既往の付着割裂強度評価式の縦重ね継手に対する適用性を検証するため、縦重ね継手に関する純曲げ実験結果（文献4）、曲げせん断実験結果（文献6、9、10、11、12）、および本実験結果から得られた最大付着応力度と既往の付着割裂強度式による付着割裂強度の比較を行った。

付着応力度に関して、(2)式による計算値と(3)式による計測歪みから算定される付着応力度がよく対応することより、実験結果の最大付着応力度において文献中に記載されていないものは(2)式により算定した。また、最大付着応力度の算定に際し、継手筋の降伏が認められるものに関しては、3. 1において述べたように降伏域長さを梁端部から梁せいの1/2とし有効重ね継手長さは(2)式に示すように重ね継手長さからD/2引いた値とした。

本実験において、梁端部からD/2中央側の測定歪みから(3)式により算定した最大付着応力度を表3に示す。

$$\tau u = M / (0.9 \cdot d \cdot \Sigma \psi \cdot l_e) \quad (2)$$

$$\tau u = E_s \cdot \epsilon \cdot a / (\psi \cdot l_s) \quad (3)$$

M: 梁端部曲げモーメント

d: 継手筋重心から圧縮縁までの距離

ψ : 継手筋周長和、a: 継手筋断面積

E_s : ヤング係数、 ϵ : 計測位置での各鉄筋の平均歪み

l_e : 有効重ね継手長さ、 l_s : 重ね継手長さ

継手筋降伏が報告されている場合: $l_e = l - D/2$

継手筋降伏が報告されていない場合: $l_e = l$

l_s : 鉄筋の計測歪み位置からカットオフ位置までの長さ

付着割裂強度評価式として藤井・森田式^{文献13)}を用いた場合の実験値と計算値の対応を図10に示す。また、縦重ね継手の場合よく対応すると報告している田畑・西原らが提案している付着割裂強度評価式^{文献4)}を用いた場合の実験値と計算値の対応を図11に示す。両図において、曲げ降伏後の付着割裂破壊と報告されている試験体も

図 12 コンクリートの圧縮ストラットを考えた縦重ね継手部での力の釣合い

付着割裂破壊として整理した。また、PC a 部材と内部コンクリートとの界面破壊と報告されている試験体は付着割裂破壊に至っていないため曲げ破壊他として整理した。縦重ね継手の付着割裂強度を藤井・森田式により評価した場合、計算値よりも実験値の方が高く、全体的に安全側の評価となっている。一方、田畑・西原らの式により評価した場合は、純曲げ実験による実験値と計算値は比較的良好に対応しているが、曲げせん断実験結果においては計算値よりも実験値が高く、安全側の評価である。また、最終破壊モードが曲げ破壊の場合でも計算値より実験値の方が高い評価となる。

以上より、梁下端筋の上に継手筋を設けた縦重ね継手の付着割裂強度は、鉄筋単体の付着割裂強度よりも高く、また、曲げせん断を受ける部材では純曲げの場合よりも付着割裂強度は上昇することが推察される。

4. 2 縦重ね継手の付着割裂強度の評価法

図 12 に、各鉄筋の付着応力度分布は一定であると仮定し、継手筋を梁主筋の上に設けた縦重ね継手におけるコンクリートの圧縮ストラットによる応力伝達機構を考慮した力の釣り合いを示す。継手筋の単位長さ当たりの付着力を Tu 、下端主筋の単位長さ当たりの付着力を Td 、継手筋上部の圧縮ストラットの角度を ϕ_1 、継手筋と下端主筋間の圧縮ストラットの角度を ϕ_2 とする。

継手筋の上下部分に生じる斜め方向圧縮ストラットの鉛直方向成分 $(Tu - Td) \cdot \tan \phi_1$ と $Td \cdot \tan \phi_2$ の大小関係により、鉛直方向成分に釣合う鉛直方向圧縮ストラットが生じる位置が異なるため、鉛直方向圧縮ストラットが継手筋と下端主筋間に生じる場合と継手筋の上部に生じる場合に分けて考える。

○ $Tu \cdot \tan \phi_1 \geq Td \cdot (\tan \phi_1 + \tan \phi_2)$ のとき

継手筋と下端主筋間には Td に釣合う斜め方向圧縮ストラット $Td / \cos \phi_2$ が生じる。また、継手筋上部には継手筋と下端主筋間に生じる斜め方向圧縮ストラットの鉛直方向成分と釣合う F_1 と水平方向力 $(Tu - Td - F_1 \cos \phi_1)$ に釣合う F_2 の斜め方向圧縮ストラットが継手筋上部に生じる。この時、継手筋と下端主筋間には鉛直方向圧縮ストラット C が生じることになる。図中の各力は力の釣り合い関係より下式の通りである。

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= Td \cdot \tan \phi_2 / \sin \phi_1 \\ F_2 &= Tu / \cos \phi_1 - Td \cdot (1 / \cos \phi_1 + \tan \phi_2 / \sin \phi_1) \\ C &= Tu \cdot \tan \phi_1 - Td \cdot (\tan \phi_1 + \tan \phi_2) \\ Vc &= (Tu - Td) \cdot \tan \phi_1 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

この時、継手筋に作用する付着割裂強度に影響を及ぼす鉛直方向

拘束力 Vc は F_1 と F_2 の鉛直方向成分の和となる。

○ $Tu \cdot \tan \phi_1 < Td \cdot (\tan \phi_1 + \tan \phi_2)$ のとき

継手筋上部には $(Tu - Td)$ に釣合う斜め方向圧縮ストラットが生じる。また、継手筋と下端主筋の間には継手筋上部の鉛直方向力に釣合う F_1 と水平方向力 $(Td - F_1 \cos \phi_2)$ に釣合う F_2 の斜め方向圧縮ストラットが生じることになる。この時、継手筋上部には鉛直方向圧縮ストラット C が生じることになる。

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= (Tu - Td) \cdot \tan \phi_1 / \sin \phi_2 \\ F_2 &= Td \cdot (1 / \cos \phi_2 + \tan \phi_1 / \sin \phi_2) - Tu \cdot \tan \phi_1 / \sin \phi_2 \\ C &= Td \cdot (\tan \phi_1 + \tan \phi_2) - Tu \cdot \tan \phi_1 \\ Vc &= Td \cdot \tan \phi_2 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

この時、継手筋に作用する付着割裂強度に影響を及ぼす鉛直方向力 Vc は F_1 と F_2 の鉛直方向成分の和となる。

縦重ね継手が無い場合、同一の付着力を伝達するために必要な鉛直方向力は $Tu \cdot \tan \phi_1$ であり、縦重ね継手の場合と縦重ね継手がない場合の必要鉛直方向拘束力比は $Vc / (Tu \cdot \tan \phi_1)$ である。逆に、同一の鉛直方向拘束力に対して、縦重ね継手の場合と縦重ね継手が無い場合の付着力比は前述の必要鉛直方向拘束力比の逆比になる。また、付着割裂強度は鉛直方向拘束力に依存することは既往の研究^{文獻 14)} 等より明らかであり、付着力を伝達するために必要な鉛直方向拘束力が縦重ね継手が無い場合に比べ小さくなる縦重ね継手の場合は逆に付着割裂強度が高くなることが推察される。

以上より、付着割裂強度が鉛直方向拘束力に比例すると仮定すると、縦重ね継手の継手筋の付着割裂強度 τ_{bu} は、付着割裂強度に及ぼす要因が同一である単独の鉄筋に関する既往の付着割裂強度式を用い (6) 式により算定することが可能である。

$$\tau_{bu} = 1 / \alpha \cdot \tau'_{bu} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \alpha &= (Tu - Td) \cdot \tan \phi_1 / (Tu \cdot \tan \phi_1) \\ &= Td \cdot \tan \phi_2 / (Tu \cdot \tan \phi_1) \end{aligned} \quad \begin{aligned} &: Tu \cdot \tan \phi_1 \geq Td \cdot (\tan \phi_1 + \tan \phi_2) \\ &: Tu \cdot \tan \phi_1 < Td \cdot (\tan \phi_1 + \tan \phi_2) \end{aligned}$$

$$Tu = \tau_u \cdot \psi$$

$$Td = \sigma \cdot db^2 \cdot \pi / (4 \cdot l)$$

τ'_{bu} : 既往の付着割裂強度式による付着割裂強度

τ_u : (2) 式または (3) 式により算定される継手筋付着応力度

σ : (1) 式により算定される継手筋カットオフ位置での主筋応力度

db : 主筋径、 l : 重ね継手長さ、 ψ : 継手筋周長

図 13 付着割裂強度に関する実験値と提案評価法による計算値との対応

既往の付着割裂強度式として藤井・森田式を用い τ_{bu} を算定し、付着割裂強度に関する実験値と(6)式による計算値の対応を図13に示す。縦重ね継手端位置での梁下端主筋応力度は、3.3において示したように、せん断抵抗機構をトラス機構とし $\cot \phi = 1$ として算定した。但し、純曲げ試験体に関してはせん断力 $V=0$ として算定した。同様に、(6)式において $\tan \phi_1 = \tan \phi_2 = 1.0$ とした。

図13より、鉛直方向拘束力と付着割裂強度が比例すると仮定して、単独の鉄筋に関する既往の付着割裂強度式を用い縦重ね継手における継手筋の付着力伝達に必要な鉛直方向拘束力を考慮した本評価法は、4.1で示した既往の付着割裂強度評価式に比べ、計算値は実験値とよく対応している。曲げ破壊他とされる試験体において実験値が計算値を上回っているものが多少あるが、純曲げ実験及び曲げせん断実験における付着割裂破壊と判定された試験体に関しては非常によく対応しており、この評価法により梁下端主筋の上に継手筋を配した縦重ね継手部の付着割裂強度を推定することが可能であると判断される。本研究におけるデータ数が少ないことより、今後、曲げせん断試験体データを増やし、本評価法の妥当性をさらに検証する必要がある。

5. 結論

下端主筋とせん断補強筋を打込んだU字型PCA部材を用い梁端部で継手筋を梁下端主筋の上に配置した全数縦重ね継手を設けた梁部材の曲げせん断実験を行い以下の知見が得られた。

- 1) SD390材を用い、重ね継手長さ40dで変形角0.05radまで重ね継手部に付着割裂破壊は起きず、耐力低下が生じない安定した履歴性状が確保された。
- 2) 曲げ降伏破壊した試験体において、U字型PCA部材を用い、重ね継手長さ40d、主筋量が端部引張鉄筋量の70%程度の試験体であっても、一体打ちの通し配筋の試験体あるいは継手筋と主筋が同径、同本数の試験体と同等の性能を有しており、重ね継手の有無、PCAの有無、継手長さの相違及び下端主筋径の違いによる性状の変化はほとんど見られなかった。
- 3) 材端に縦重ね継手を設けた場合、降伏域は通し配筋の場合よりも短くなり、梁せいの約1/2程度の長さであった。

- 4) PCA部材と後打ちコンクリート界面での滑りは、せん断補強筋の降伏強度前後から大きくなっている。
- 5) 縦重ね継手における継手端の下端主筋応力度は、せん断力をトラス機構により負担すると仮定し圧縮ストラットの角度を45°として算定されるせん断力により生じる応力度と曲げモーメントにより生じる応力度の累加により推定可能である。
- 6) 縦重ね継手において柱梁接合部に定着される継手筋の付着割裂強度は、既往の付着割裂強度式^{文献13)}による計算値よりも高い。また、曲げせん断を受ける場合、継手筋の付着割裂強度は縦重ね継手に関する既往の付着割裂強度式^{文献1)}による計算値よりも高い。
- 7) 単独の鉄筋に関する既往の付着割裂強度式を用い、付着力とコンクリートの圧縮ストラットによる力の釣合いから求める継手筋の付着力伝達に必要な鉛直方向拘束力を考慮した縦重ね継手の付着割裂強度評価法を得た。

参考文献

- 1) 重ね継手の全数継手設計指針(案)・同解説, 日本建築学会, 1996
- 2) 桜田智之, 師橋憲貴, 田中礼治: 重ね継手の付着割裂強度に及ぼす横補強筋および中子筋の効果に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第465号, pp.119-128, 1994.11
- 3) 角陸純一, 猿田正明: 高強度鉄筋コンクリート部材の重ね継手に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C, pp.143-114, 1987.10
- 4) 田畑卓, 西原寛, 師橋憲貴, 桜田智之: 主筋を梁せい方向に重ねた全数重ね継手の付着割裂強度に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第529号, pp.143-150, 2000.3
- 5) 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 日本建築学会, 1999
- 6) 田畑卓, 西原寛, 松本智夫, 鈴木英之: 全数重ね継手を用いた梁部材の変形および付着性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.2, pp.473-476, 1996
- 7) 田畑卓, 西原寛, 師橋憲貴, 桜田智之: 主筋を梁せい方向に重ねた全数重ね継手の付着割裂強度に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.3, pp.205-210, 1998
- 8) 桜田智之, 師橋憲貴, 西原寛, 田畑卓, 田中礼治: 太径鉄筋を用いた全数重ね継手の付着割裂強度に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第478号, pp.153-162, 1995.12
- 9) 崎浜博史, 西原寛, 松本智夫, 鈴木英之, 田畑卓: 梁端部に重ね継手を用いたU字型プレキャスト梁の曲げせん断実験 その1実験概要、その2実験結果の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C, pp.969-972, 1994.9
- 10) 飯島宣章, 原田直哉, 岡野創, 井上富太: U字型ハーフプレキャスト梁部材に関する実験的研究(梁端重ね継手部の曲げせん断実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C, pp.613-614, 1993.9
- 11) 田畑卓, 西原寛, 松本智夫, 鈴木英之: 下端主筋を材端で全数重ね継手した梁部材の変形および付着割裂性状, 日本建築学会構造系論文集, 第491号, pp.89-96, 1997.1
- 12) 桜本文敏, 別所佐登志: ラーメンプレファブ工法の開発その1U型薄肉プレキャスト部材を用いた梁の構造, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C, pp.187-188, 1989.10
- 13) 藤井栄, 森田司郎: 異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究 第2報 付着割裂強度算定式の提案, 日本建築学会論文報告集, 第324号, pp.45-52, 昭和58.2
- 14) 角徹三, 山田守, 合衆将三: 鉄筋コンクリート部材の付着割裂強度算定式の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第414号, pp.23-33, 1990.8

(2003年8月7日原稿受理, 2003年12月11日採用決定)