

# 太径鉄筋重ね継ぎ手の降伏後挙動に関する実大高速載荷実験

## Experimental studies of the post yield behaviors of lap splices under high speed loading

水野 淳<sup>\*</sup>、草間和宏<sup>\*</sup>、坪田張二<sup>\*\*</sup>、斎藤英明<sup>\*\*\*</sup>、藤田朝浩<sup>\*\*\*</sup>、今村晃<sup>\*\*\*\*</sup>

Jun MIZUNO, Kazuhiro KUSAMA, Haruji TSUBOTA,

Hideaki SAITO, Tomohiro FUJITA, Akira IMAMURA

<sup>\*</sup>工修 鹿島建設(株) 原子力室 (107-8502 東京都港区赤坂 6-5-30)

<sup>\*\*</sup>工博 鹿島建設(株) 技術研究所 (182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

<sup>\*\*\*</sup>工修 東京電力(株) 電力技術研究所 (230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1)

<sup>\*\*\*\*</sup>日本原燃(株) 土木建築部建築課 (030-0802 青森県青森市本町 1-3-9)

キーワード：太径鉄筋、重ね継ぎ手、高速載荷実験

(Large-size rebar, Lap splices, High speed loading)

### 1. はじめに

原子力関連施設のように重要鉄筋コンクリート造構造物においては、万一の航空機の衝突による衝撃荷重に対しても安全性を確保できる設計がなされる場合がある。衝撃荷重が作用すると想定される鉄筋コンクリート造の屋根及び外壁の鉄筋の継ぎ手については、高速載荷時の重ね継ぎ手挙動に関する実験研究が殆ど無いことより、従来機械式継ぎ手が主に用いられている。

近年、太径鉄筋重ね継ぎ手の静的載荷実験[1,2]及び重ね継ぎ手高速載荷実験[3,4,5,6]等の知見も得られてきている。本研究では、衝撃荷重下での太径重ね継ぎ手の可能性を検討するため、実大の太径重ね継ぎ手を有する試験体を用い、鉄筋降伏後の重ね継ぎ手の挙動に着目した高速及び静的載荷実験を実施した。

### 2. 実験概要

試験体は、衝撃荷重が作用する構造物の屋根及び外壁部の鉄筋コンクリート版の重ね継ぎ手部を模擬し、Fig.1に示す中央部にD38鉄筋(SD345)の重ね

継ぎ手を有する梁試験体を用いた。コンクリートの設計規準強度は29.4MPaである。重ね長さは、継ぎ手部の鉄筋降伏後の靱性を確保するため48dとしている。重ね継ぎ手のタイプとしては、Table 1に示

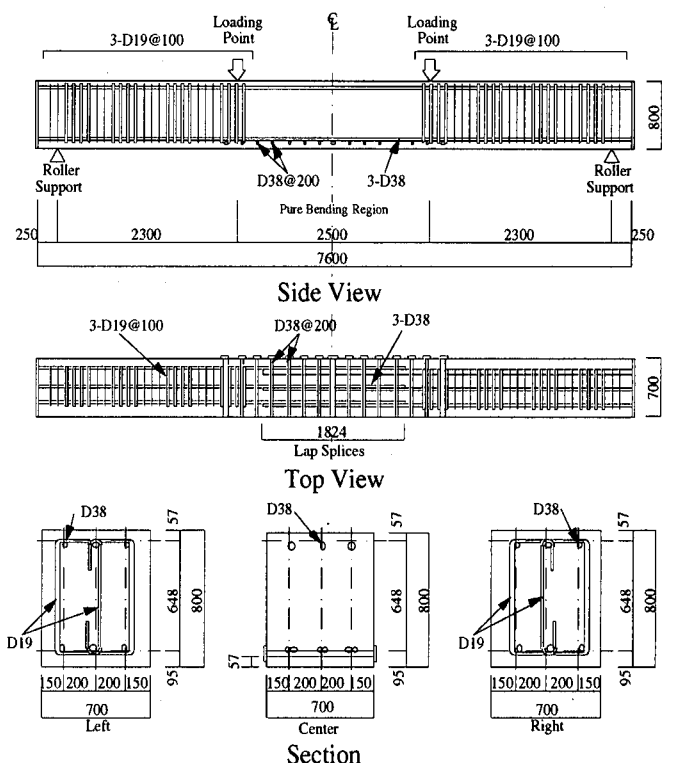


Fig. 1 Test specimen of B-I-A<sub>H</sub>

すように重ね継ぎ手全数が同じ箇所に配置されるケースを TypeA、重ね継ぎ手の位置を千鳥配置に交互にづらして配置する場合を想定した試験体を Type B と称する。Table 1 に示すように、5 ケースの高速載荷実験と 1 ケースの静的載荷実験を実施した。No.1 試験体は参照用の継ぎ手無しの試験体であり、No.2,3,6 の試験体は、内側主筋に継ぎ手を有する試験体、No.4 及び No.5 は外側の主筋に継ぎ手を有する場合を想定した試験体である。主筋のかぶり厚さは、内側主筋の場合 95mm、外側主筋配置の場合 57mm である。試験体 No.6 は、No.3 試験体と同一の試験体であるが唯一の静的試験用である。

高速載荷及び静的載荷には、Fig.2 に示す住金テクノロジー所有の高速載荷装置を用いた。

加力は、試験機が引張試験用に制作されているため Fig.2 に示すように上方一方向加力であり、継ぎ手領域の外側 2 点で加力フレームに取り付けたローラー支承を通じて加力した。試験体端部は支持フレームに取り付けたローラー支承で支持した。試験体への載荷速度は、航空機衝突時に構造物の鉄筋コンクリート版の応答変位速度を評価して 2.0m/s と設定した。

計測は、圧電式ロードセルで荷重を、光学変位計により試験体中央部変形を、継ぎ手部鉄筋のひずみをストレインゲージにより計測した。

Table 2 に試験体のコンクリート及び鉄筋の静的材料強度試験結果を示す。

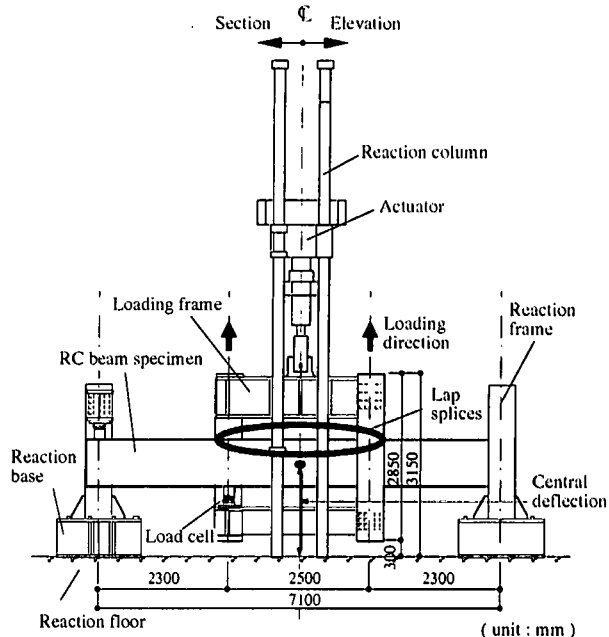


Fig. 2 High-speed loading apparatus

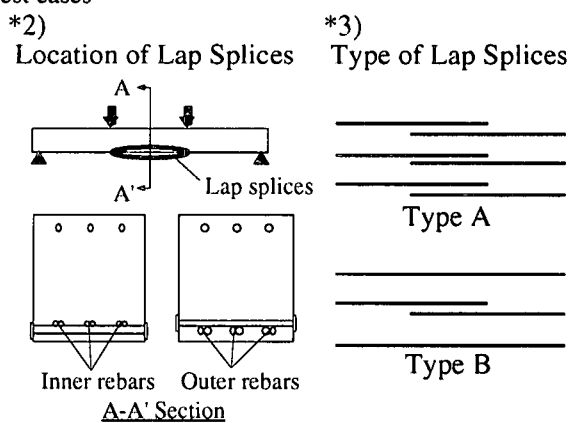
Table 2 Material properties (Static)

	Test name	Compressive strength (MPa)	Young's modulus ( $\times 10^4$ MPa)
Concrete	B <sub>H</sub>	31.9	2.24
	B-I-A <sub>H</sub>	32.3	2.24
	B-I-B <sub>H</sub>	34.6	2.26
	B-O-A <sub>H</sub>	32.1	2.23
	B-O-B <sub>H</sub>	32.1	2.23
	B-I-B <sub>S</sub>	31.7	2.24

	Nominal diameter, area	Yield strength (MPa)	Young's modulus ( $\times 10^5$ MPa)
Rebar D38 SD345(JIS)	38mm, 11.4cm <sup>2</sup>	383	2.11

Table 1 Test cases

No	Test name <sup>*1</sup>	Location of lapsplices <sup>*2</sup>	Type of lap splices <sup>*3</sup>	Loading rate
1	B <sub>H</sub>	—	None	2.0m/s
2	B-I-A <sub>H</sub>	Inner rebars	A	2.0m/s
3	B-I-B <sub>H</sub>	Inner rebars	B	2.0m/s
4	B-O-A <sub>H</sub>	Outer rebars	A	2.0m/s
5	B-O-B <sub>H</sub>	Outer rebars	B	2.0m/s
6	B-I-B <sub>S</sub>	Inner rebars	B	0.1mm/s (Static)

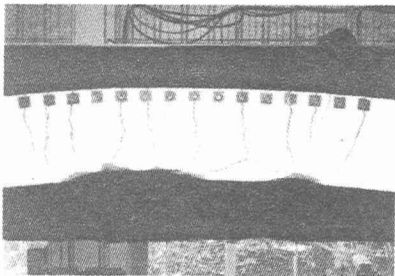
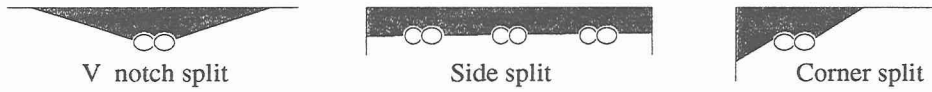


\*1) Test name B-I-A<sub>H</sub>, for example, denotes Beam-Inner rebars -A type under High speed loading

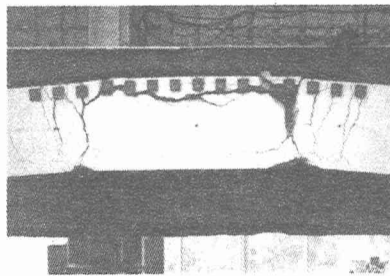
Table 3 Experimental results

Test name	Initial rebar yield		Failure of lap splices				Failure mode <sup>*1</sup>
	Load P <sub>y</sub> (kN)	Deflection δ <sub>y</sub> (mm)	Load P <sub>u</sub> (kN)	Deflection δ <sub>u</sub> (mm)	Rebar strain ε <sub>u</sub> (μ)	Ductility factor δ <sub>u</sub> / δ <sub>y</sub>	
B <sub>H</sub>	941	26.2	—	—	—	—	—
B-I-A <sub>H</sub>	849	26.6	926	228.0	46930	9	Side split
B-I-B <sub>H</sub>	742	22.0	816	249.9	44540	11	Side split
B-O-A <sub>H</sub>	874	23.6	995	203.6	43310	9	Side split
B-O-B <sub>H</sub>	969	26.9	993	183.8	41160	7	V notch
B-I-B <sub>s</sub>	724	20.3	822	173.0	29730	8	Side split

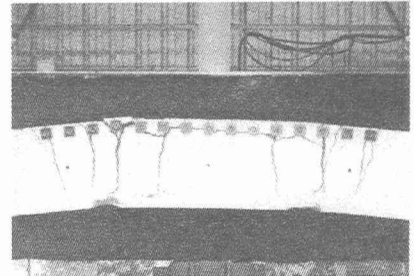
\*1) Typical failure modes of lap splices



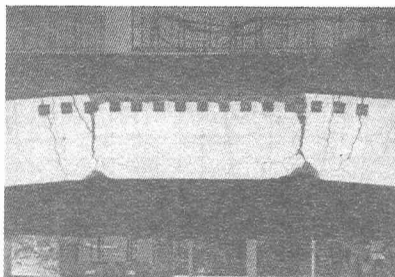
(1) B<sub>H</sub>



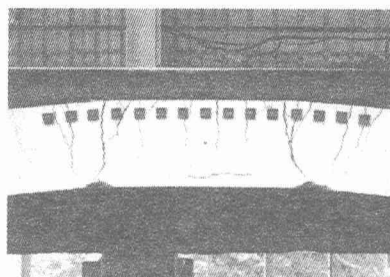
(2) B-I-A<sub>H</sub>



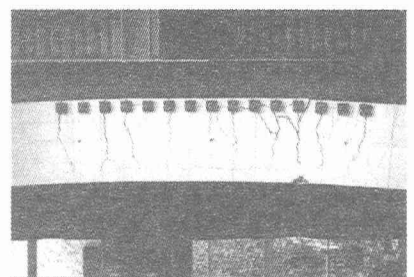
(3) B-I-B<sub>H</sub>



(4) B-O-A<sub>H</sub>



(5) B-O-B<sub>H</sub>



(6) B-I-B<sub>s</sub>

Fig. 3 Failure modes of specimens

### 3. 試験結果

#### 3.1 試験体の破壊モードと実験結果

試験体の破壊の最終状況を Fig.3 に示す。全ての試験体は、試験体中央圧縮側のかぶりコンクリートの圧壊を伴う曲げ破壊であるが、全数が重ね継ぎ手である B-I-A<sub>H</sub> 及び B-O-A<sub>H</sub> の試験体では、継ぎ手端部に曲げクラックが集中する傾向が見られる。それに対して、継ぎ手無し及び TypeB の試験体では曲げモーメント一定ゾーンに曲げクラックは比較的分散して生じている。試験体の破壊状況の詳細な観察より継ぎ手の破壊モードとして、Table3 に示すように、かぶりが小さく重ね継ぎ手が少ない B-O-B<sub>H</sub> の V ノッチモード以外は、サイドスプリットモードである。

Table 3 に、鉄筋の初期降伏時荷重、重ね継ぎ手破壊時荷重、対応する変形、塑性率及び継ぎ手端部のひずみ（両側の平均）を示している。また各試験体の荷重-変位関係を Fig.4 - 6 に示す。荷重については、試験体そのものの耐力を評価するため、荷重計測値より高速載荷による慣性力分を差し引き、ローパスフィルター処理後の値を示している。[4] また、各試験体の継ぎ手部付近のひずみゲージで計測されたひずみと試験体中央部の変形の関係を Fig.7 に示している。以下に、実験結果について、載荷速度の影響、重ね継ぎ手が内側または外側の主筋にある場合の差異、継ぎ手タイプによる影響について着目し、より詳しく示す。

#### 3.2 載荷速度の影響

Fig.4 には、主筋内側に B Type 継ぎ手を有する試験体の高速及び静的載荷の実験ケース B-I-B<sub>H</sub> 及び B-I-B<sub>S</sub> を、参考として継ぎ手無し高速載荷実験 B<sub>H</sub> の結果とともに示している。B-I-B<sub>H</sub> 及び B-I-B<sub>S</sub> の鉄筋初降伏後の荷重-変形関係の折れ点荷重（部材の降伏荷重）に着目すると、高速載荷実験の対応する荷重は約 900kN であり、静的な値約 700kN (1) B-I-B<sub>S</sub>N より約 30% 程度大きくなっている。継ぎ手破壊時に塑性率も高速載荷時の方が約 40% 程度大きくなっている。更に、Fig.7 に示す継ぎ手部の鉄筋ひずみと中央変位の関係を見ると、継ぎ手端部位置 (BC-2L 又

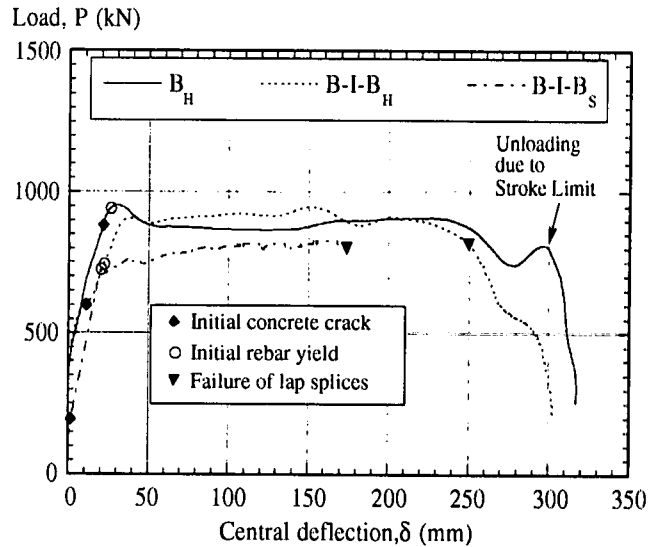


Fig.4 Load-deflection curves with variation of loading rate

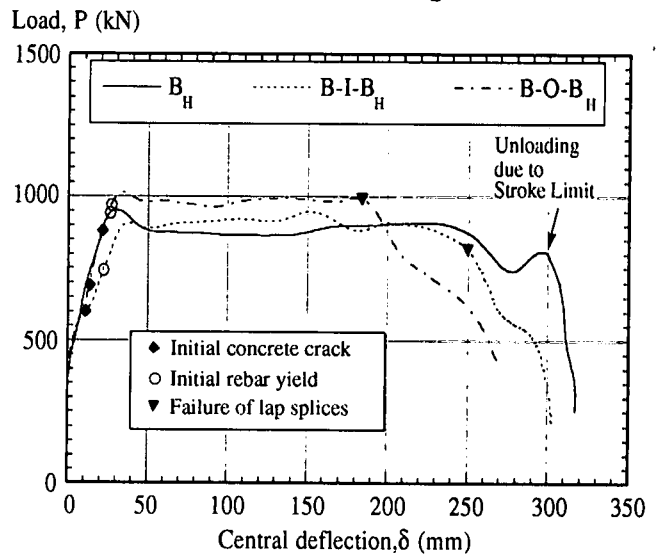


Fig.5 Load-deflection curves with variation of location of lap splices

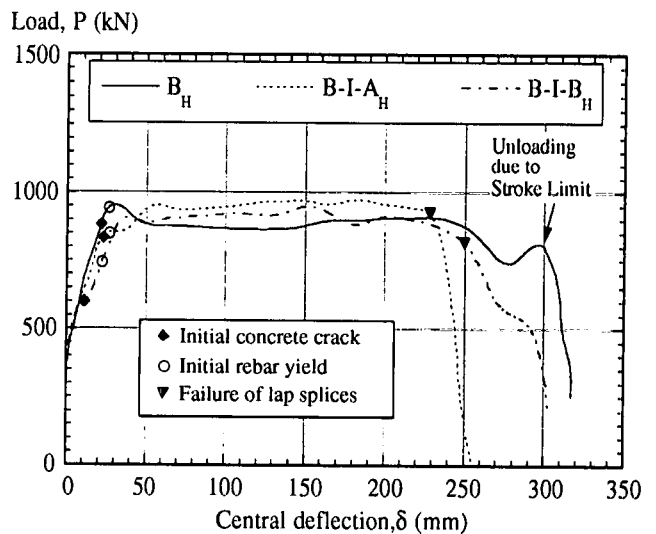
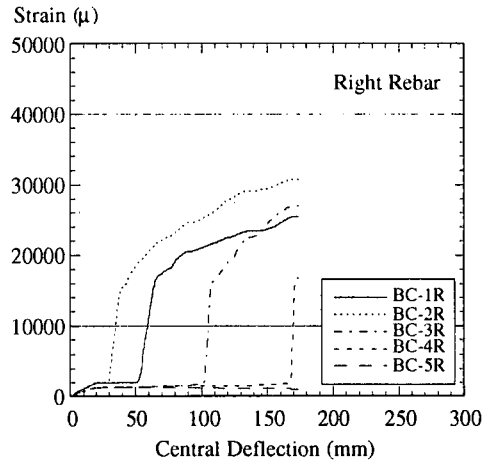
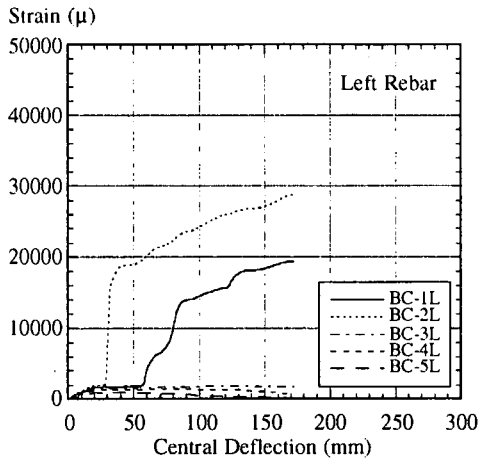
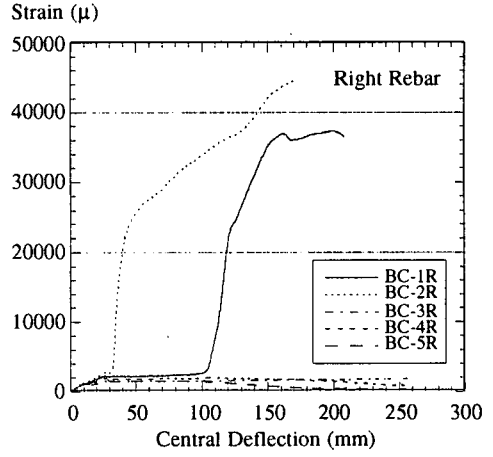
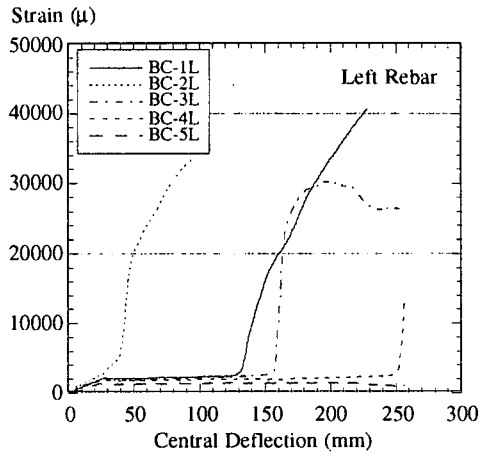


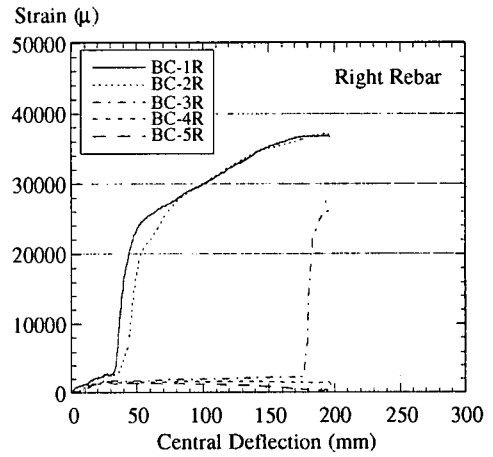
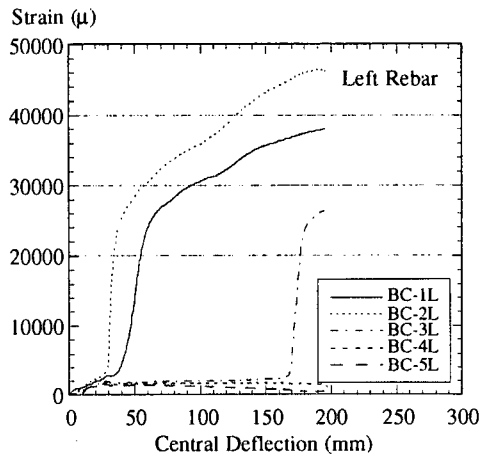
Fig.6 Load-deflection curves with variation of types of lap splices



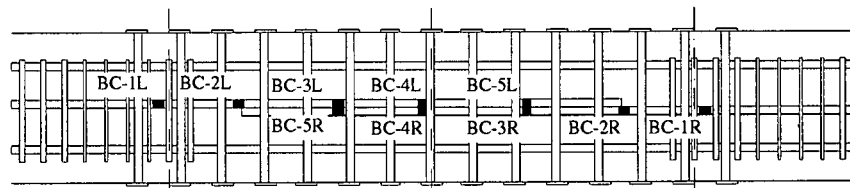
(1) B-I-Bs



(2) B-I-BH



(3) B-O-BH



Location of strain gages

Fig. 7 Variation of rebar strain with central deflection

はR)での継ぎ手破壊時のひずみは、静的約30000 $\mu$ に対して、高速載荷時約40000 $\mu$ と30%以上増加している。

### 3.3 継ぎ手位置の影響

Table 1 に示すように、試験体 B-I-A<sub>H</sub> 及び B-I-B<sub>H</sub> は引張側の主筋が内側に配置し重ね継ぎ手を設けた試験体であり、試験体 B-O-A<sub>H</sub> 及び B-O-B<sub>H</sub> は、外側に重ね継ぎ手を有する主筋を配置したものである。Table 3、Fig. 5 及び Fig. 7 に示すように、継ぎ手破壊時の塑性率及び継ぎ手端部の鉄筋ひずみは、内側の主筋に重ね継ぎ手を設けた場合の方が外側主筋の重ね継ぎ手の場合より若干大きい。これは、内側主筋の場合の方が継ぎ手部のかぶりが大きいことによると考えられる。継ぎ手破壊時の継ぎ手端部の鉄筋ひずみは、内側主筋の継ぎ手の場合は45000 $\mu$  - 47000 $\mu$ であるが、外側主筋に継ぎ手を設けた場合41000 $\mu$  - 43000 $\mu$ である。

### 3.4 継ぎ手タイプの影響

重ね継ぎ手のタイプとしては、Table 1 に示すように Type A は重ね継ぎ手全数が同じ箇所に配置されるケースを、Type B は重ね継ぎ手の位置を千鳥配置に交互にづらして配置する場合を想定したものである。Fig. 6 に示す B-I-A<sub>H</sub> 及び B-I-B<sub>H</sub> の荷重-変形関係の比較を継ぎ手無しの結果とともに示すが、両者共継ぎ手破壊時の塑性率は10程度となっており、継ぎ手破壊以前においては、荷重-変位関係も継ぎ手無しと同様に安定したものとなっている。ただし、Type B の方が若干大きめの塑性率を示している。

## 4. まとめ

衝撃荷重に対する太径鉄筋重ね継ぎ手の耐衝撃性及び適用性を検討するため、D38 の48dの実大重ね継ぎ手を梁試験体を用い、鉄筋降伏後の靱性挙動に着目した高速載荷実験を実施した。実験結果により得られた知見を以下に示す。

- 1) 高速載荷時の重ね継ぎ手破壊時の継ぎ手端部の鉄筋ひずみは、静的載荷時に比して大きく上昇し、高速載荷時において試験体の靱性が大きくなる。
- 2) 高速載荷時に、継ぎ手破壊時までの試験体の塑

性率は10程度であり、継ぎ手端部の鉄筋ひずみも40000以上の値を示す。また、継ぎ手無しの試験体に比して継ぎ手破壊時までの耐力低下は小さく安定している。

- 3) 本実験結果により、衝撃荷重が作用する部位におけるD38のような太径鉄筋の継ぎ手に、48d程度の十分な重ね長さをとることにより重ね継ぎ手を用いる適用性があると考えられる。

## 謝辞

本研究の成果は、電力共通研究「外部飛来物に対する合理的構造の確立に関する研究」の成果であり、ご指導を賜った青山博之東大名登教授、森田司郎京大名譽教授及び関係各位に謝意を表します。

## 参考文献

- [1] Kadoriku, J., Sugita, M. and Yano, A., *Experimental Study on Lapped Splices in Shear Walls*, Proc. of 9th SMiRT Conference, pp. 493-498, 1987
- [2] 角陸純一, 高強度太径鉄筋重ね継ぎ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報告集第456号, pp.51-58, 1992年2月
- [3] Limberger, E. and Brandes, K., *Versuche zum Verhalten von Stahlbetonbalken mit Übergreifungsstößen der Zugbewehrung unter stoßartiger Belastung*, Forschungsbericht der BAM 157, 1989
- [4] Tsubota, H., Mizuno J., Kusama K., Momma T., K. Brandes, J. Herter, E. Limberger, Yamashita T., Fujita T. and Sugimoto Y., *Experimental studies on the inelastic behaviors of reinforced concrete panels under high speed loading Part 1. Effects of dynamic loading*, Proc. of the 5th Int. Conf. on Structures Under Shock and Impact, Thessaloniki, Greece, pp. 743-758, 1998
- [5] Tsubota, H., Mizuno J., Kusama K., Momma T., K. Brandes, J. Herter, E. Limberger, Nakazawa M., Matsumoto H. and Nukui Y., *Experimental studies on the inelastic behaviors of reinforced concrete panels under high speed loading Part 2. Effects of rebar ratio and lap splices*, Proc. of the 5th Int. Conf. on Structures Under Shock and Impact, Thessaloniki, Greece, pp. 759-771, 1998
- [6] Mizuno J., Kusama K., Momma T., Sawamoto Y., Kusaka A., Sawada S., Saito H. and Imamura A., *Experimental studies of the post yield behaviors of lap splices under high speed loading*, Proc. of the 3rd Asia-Pacific Conf. on Shock&Impact Loads on Structures, Singapore, pp. 319-326, 1999