

論文 鉄筋コンクリート造ト型柱梁接合部の力学的性状に及ぼす  
 載荷速度の影響に関する実験的研究

中西三和\*1・安達 洋\*2・増島克巳\*3・山田高史\*3

**要旨：**鉄筋コンクリート造I型柱梁接合部の試験体に対し静的および動的載荷実験を行い、載荷速度が力学的性状に及ぼす影響を調べることを目的とする。なお、梁主筋の柱への定着法がU字型定着と機械式定着の2種類について実験を行っており、定着法の違いが接合部挙動に及ぼす影響についても検討した。

**キーワード：** I型柱梁接合部， 載荷速度， U字型定着， 機械式定着

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート造（以降、RC 造）建物の高層化にともなう施工の省力化と配筋の合理化を目的として開発された梁主筋の柱への機械式定着法の地震時における性能を確認するために、これまでに梁端曲げ降伏強度と接合部せん断強度が、ほぼ同等のト型柱梁接合部試験体の静的および動的載荷実験を行ってきた。その結果、載荷速度がその破壊性状や強度・変形性能に影響を及

ばす可能性のあることを明らかにした<sup>1)</sup>。

しかし、実際の設計では梁端での曲げ降伏を確実にするために接合部せん断強度が梁端曲げ降伏強度を十分上回るよう配慮されている。本研究は、このような梁端曲げ降伏が確実なI型柱梁接合部を対象に U 字型定着と機械式定着を施した試験体に対し、それぞれ静的および動的載荷実験を行い、その力学的性状に及ぼす載荷速度の影響を調べたものである。なお、前述

の梁端曲げ降伏強度と接合部せん断強度が等しい機械式定着された試験体の実験結果<sup>1)</sup>との比較を行うために、同形状同配筋で U 字型定着した試験体の実験もあわせて行った。

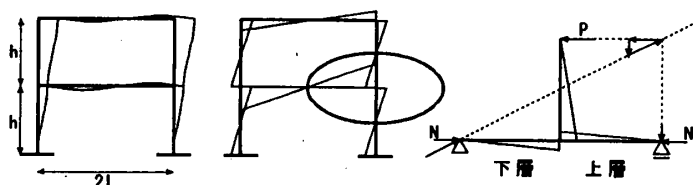


図-1 ト型柱梁接合部の応力状態

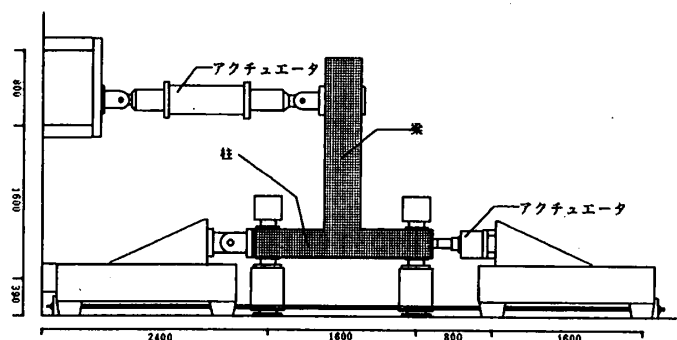


図-2 実験装置

## 2. 実験方法

本実験の対象とした試験体は、RC造建物の外柱と梁からなるト型柱梁接合部を模擬したものである。ト型柱梁接合部の応力状態を図-1に、その応力状態を再現させる実験装置を図-2に示す。柱を水平に寝かし、梁を鉛直に立てた。水平加力は反力壁に取り付けたアクチュエータを用い変位制御により

\*1 日本大学助教授 理工学部海洋建築工学科 工博

\*2 日本大学教授 理工学部海洋建築工学科 工博

\*3 日本大学大学院 理工学研究科海洋建築工学専攻

梁先端部に作用させた。また、柱には自動制御型のアクチュエータを用いて常に一定軸力 147[kN]を負荷した。

動の実験における加力スケジュールを表-1に、その変位振幅波形を図-3に示す。変位振幅波形は、最大変位速度を一定として、各振幅ごと2サイクルずつ合計14サイクルの正弦波とした。動的加力の最大変位速度は、最大層間変位速度を100[mm/s]とし、柱長さ、梁長さの関係からアクチュエータの載荷速度を93.75[mm/s]とした。また、静的加力における最大変位速度はその1/1000倍とし、梁と柱の層間変位から求まる部材角R（以後、単にR）が1/200より大きな変位のサイクルでは破壊状況を確認するための観察時間を挿入した加力スケジュールとした。

測定は、梁の水平荷重（以後、荷重）をロードセルで、梁加力位置の水平変位（部材角R）を作

動トランス型変位計で、接合部せん断変形、柱梁節点角をスローク式変位計で、梁、柱主筋および補強筋のひずみをひずみゲージで行った。なお、静的載荷時には1[s]刻みで、動的載荷時には0.005[s]刻みで測定を行った。

### 3. 試験体の設計

試験体の設計を行うにあたって、次の梁端曲げ降伏強度と接合部せん断耐力から接合部せん断余裕度を定め設計上考慮した。

$$\begin{aligned} & \text{・梁曲げ降伏強度} & \text{・接合部せん断耐力} \\ M_u &= 0.9 \cdot a_f \cdot \sigma_y \cdot d^4 & V_{ju} = \kappa \cdot \phi \cdot F_j \cdot b_j \cdot D_j^5 \\ & \text{・接合部せん断余裕度} = Q_j / Q_u \end{aligned}$$

$$Q_j = \frac{2 \cdot j_b \cdot l_c}{L_b \cdot l_c - l_b \cdot j} \times V_{ju} \quad Q_u = \frac{2 \cdot M_u}{L_b}$$

$Q_j$ : 接合部せん断破壊時の梁せん断力

$Q_u$ : 梁曲げ降伏時の梁せん断力

$L_b$ : 梁内法長  $l_c$ : 柱長  $l_b$ : 梁長  $j_b$ : 応力中心間距離  
=2700      =1600      =3000      =305      単位: mm

表-1 加力スケジュール

| サイクル  | 部材角 R | 層間変位 $\delta_c$ [mm] | 梁片振幅 $\delta_b$ [mm] | 周期 T [s] |
|-------|-------|----------------------|----------------------|----------|
| 1-2   | 1/400 | 4.0                  | 3.8                  | 0.25     |
| 3-4   | 1/300 | 5.3                  | 5                    | 0.33     |
| 5-6   | 1/200 | 8                    | 7.5                  | 0.50     |
| 7-8   | 1/100 | 16                   | 15                   | 1.00     |
| 9-10  | 1/50  | 32                   | 30                   | 2.00     |
| 11-12 | 1/25  | 64                   | 60                   | 4.00     |
| 13-14 | 1/12  | 133.3                | 125                  | 8.38     |

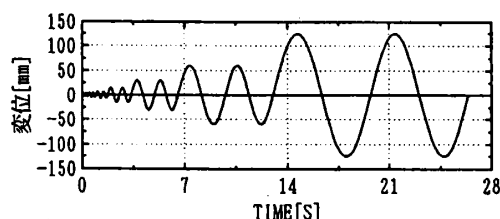


図-3 変位振幅波形

表-3 材料試験結果

| 使用試験体      | B8M  | B8U, N1U, N1M |
|------------|------|---------------|
| 鉄筋降伏強度D19  | 525  | 575           |
| 鉄筋降伏強度D10  | 330  | 404           |
| コンクリート圧縮強度 | 32.4 | 41.6          |

単位: MPa

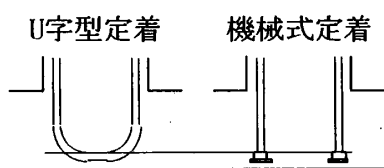


図-5 定着方法

表-2 試験体記号と構造諸元

| 試験体名 | 梁       |                       |     | 柱                 |                      | 接合部              |
|------|---------|-----------------------|-----|-------------------|----------------------|------------------|
|      | 主筋      | 補強筋                   | 定着法 | 主筋                | 補強筋                  | 補強筋              |
| B8M  | 6-D19   | 2-D10                 | 機械式 | 12-D19<br>(SD490) | 2-D10<br>(SD295)     | *                |
| B8U  | (SD490) | (SD295)               | U字型 |                   | (SD295)              | 2-D10<br>(SD295) |
| N1U  | 4-D19   | (a) 100<br>$p_w=0.55$ |     |                   | (a) 75<br>$p_w=0.64$ | (a) 75           |
| N1M  | (SD490) | [%]                   |     |                   | 機械式                  | [%]              |

\* 2-D10(SD295) (a) 37.5  $p_w=1.28$  [%]

試験体名 B 8 U S

接合部せん断余裕度 B8: 低い  
N1: 高い  
梁主筋定着法 U: U字型定着  
M: 機械式定着  
載荷速度 S: 静的  
D: 動的

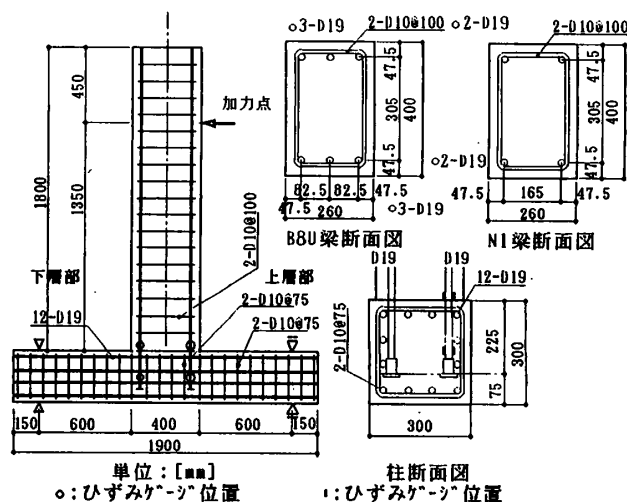


図-4 試験体図

試験体記号と構造諸元を表-2に、試験体寸法および配筋詳細を図-4に、定着法の異なる試験体の定着位置の合わせ方を図-5に示す。B8シリーズは接合部の応力状態が厳しい試験体で、接合部せん断余裕度が1.0に近い試験体である。N1シリーズは高層RC造建物の実施設計例を文献調査した結果の下限值に近い、接合部せん断余裕度=1.6を目標に設計した試験体である。Uは梁主筋をU字型定着した試験体、Mは機械式定着した試験体で、Sが静的載荷用、Dが動的載荷用試験体である。なお、B8Mは一昨年に報告した試験体である<sup>1)</sup>。

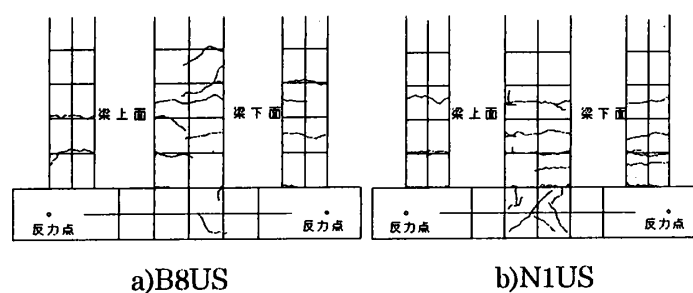
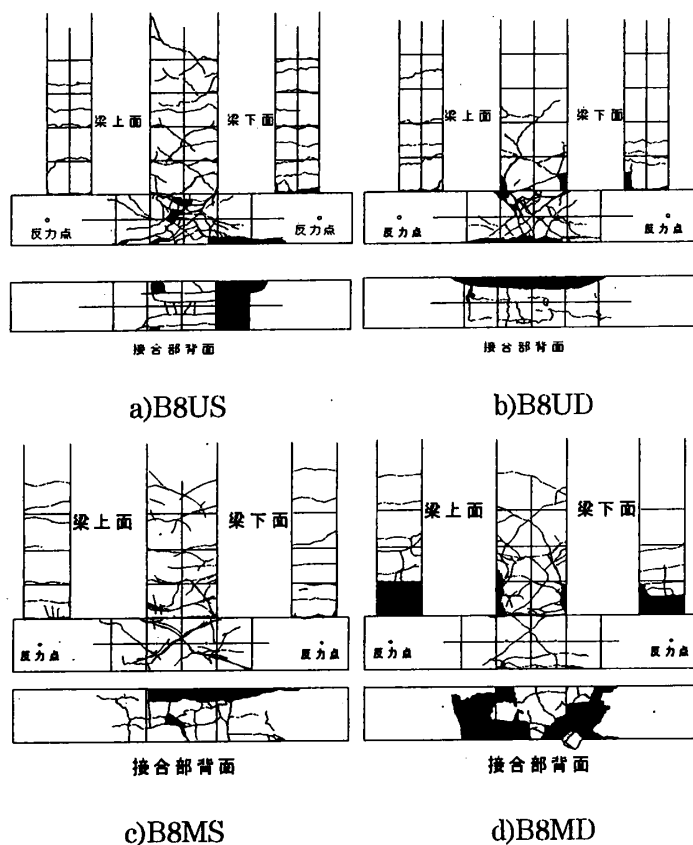


図-6 R=1/100 時のひび割れ図



d) 図-7 B8 最終破壊状況

各試験体とも同形状で、梁主筋量および柱への梁主筋の定着法が異なっている。U字型定着の折り曲げ底面の内側と機械式定着の定着ナットの内側が同じ位置となるよう梁主筋の定着長さを定め、定着性能がほぼ同等となることを目標とした。

使用した鉄筋とコンクリートの材料試験結果を表-3に示す。梁・柱の主筋には $\phi$ 19鉄筋(D19)を、せん断補強筋には異形鉄筋(D10)を閉鎖型に溶接したものを用いた。使用した鉄筋は、試験体寸法と比較するとやや太径であり、接合部内での定着が厳しくなることが予測される。し

かし、これまでに実施された実験(文献1, 2)の継続した実験として位置づけるために同径の鉄筋を使用した。

## 4. 実験結果

### 4.1 ひび割れ状況

梁主筋をU字型定着した静的載荷試験体のR=1/100時のひび割れ状況を図-6に、B8の最終破壊状況を図-7に、N1の最終破壊状況を図-8に示す。静的載荷実験によって確認した破壊過程は、途中まで、ひび割れ本数に若干の差異は見られるが各試験体とも共通しており、R=1/300で梁端曲げひび割れが発生し、R=1/100までに接合部せん断ひび割れが起こった。以後の破壊過程は次のとおりである。

B8, N1ともに動的載荷に比べ静的載荷のほうが接合部の損傷が激しく、動的載荷は梁端部に損傷が集中している。そして、U字型定着のほうが機械式定着よりもわずかにひび割れが多い。

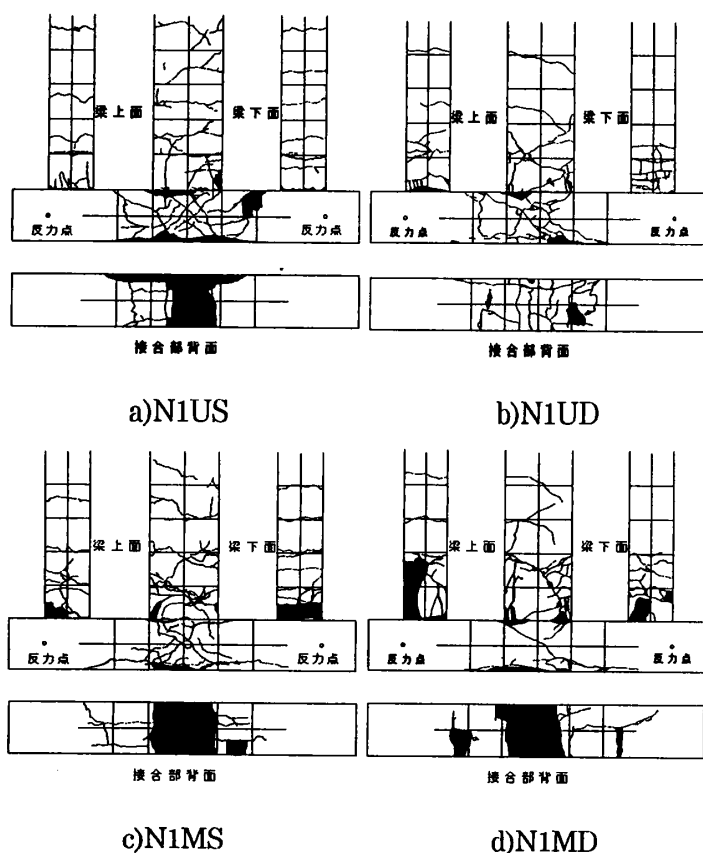
最終的にはU字型定着では接合部背面に沿った割裂状のひび割れが発生し、機械式定着では接合部背

面に定着金物の押し抜きによると思われるひび割れ、剥落が起こった。

## 4. 2 荷重－変形曲線

図－9に荷重－変形曲線を示す。いずれの試験体ともその履歴性状は  $R=1/50$  の繰り返しま

では曲げ破壊の特徴を表す紡錘型を示している。一方、 $R=1/25, 1/12$  の大変形の繰り返し载荷では、N1UDを除くU字型定着試験体3体は、せん断破壊や支圧破壊の特徴を表す逆S字型の履歴性状を示している。これは、接合部せん断破壊と梁主筋の定着破壊が進展したためと考えられる。U字型定着試験体が  $R=1/25$  までに最大耐力を経験しているのに対し、機械式定着の試験体ではB8MSを除く3体で  $R=1/12$  の大変形で、B8MSは  $R=1/25$  で最大耐力に至っている。



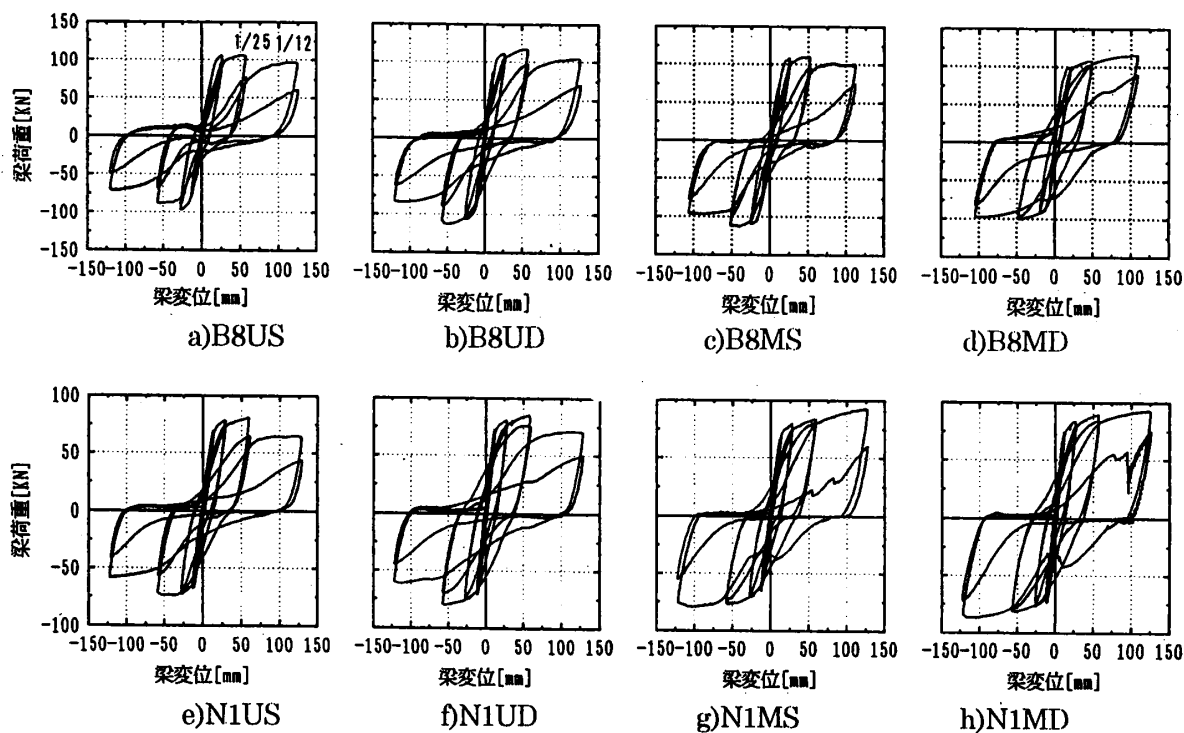
図－8 N1 最終破壊状況

## 5. 力学的性状に及ぼす

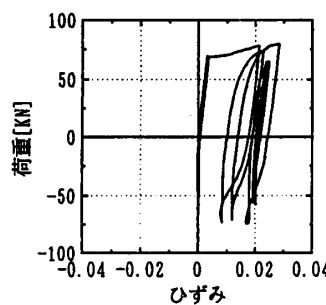
### 載荷速度の影響

### 5. 1 荷重－ひずみ速度曲線

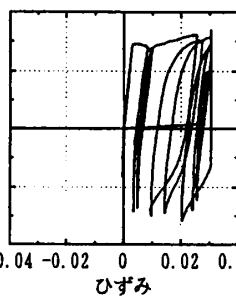
N1U 試験体の梁端部主筋の荷重－ひずみ曲線を図－10に、降



図－9 荷重－変形曲線

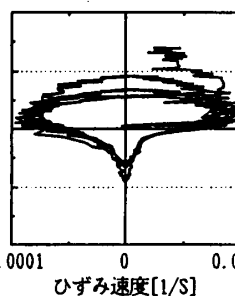


a)N1US

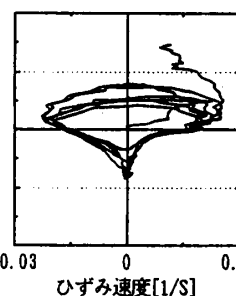


b)N1UD

図-10 荷重-ひずみ曲線



a)N1US



b)N1UD

図-11 荷重-ひずみ速度曲線

表-4 強度一覧

|           |        | B8US<br>(KN) | B8UD<br>(KN) | D/S  | B8MS<br>(KN) | B8MD<br>(KN) | D/S  | N1US<br>(KN) | N1UD<br>(KN) | D/S  | N1MS<br>(KN) | N1MD<br>(KN) | D/S  |
|-----------|--------|--------------|--------------|------|--------------|--------------|------|--------------|--------------|------|--------------|--------------|------|
| 計算値       | 梁曲げ    | 116.62       | 128.38       | 1.10 | 105.84       | 116.62       | 1.10 | 77.62        | 85.36        | 1.10 | 77.62        | 85.36        | 1.10 |
|           | 梁せん断   | 202.86       | 217.56       | 1.07 | 193.06       | 206.78       | 1.07 | 194.04       | 207.76       | 1.07 | 194.04       | 207.76       | 1.07 |
|           | 接合部せん断 | 445.90       | 474.32       | 1.06 | 398.86       | 422.38       | 1.06 | 445.90       | 474.32       | 1.06 | 410.62       | 437.08       | 1.06 |
| 実験値       | +      | 134.26       | 143.08       | —    | 120.54       | 127.40       | —    | 134.26       | 143.08       | —    | 123.48       | 131.32       | —    |
|           | -      | 106.82       | 117.60       | —    | 110.74       | 116.62       | —    | 80.56        | 84.97        | —    | 92.90        | 93.20        | —    |
|           | -      | 97.61        | 112.70       | —    | 113.68       | 99.96        | —    | 74.09        | 79.38        | —    | 79.97        | 87.02        | —    |
|           | 平均     | 102.21       | 115.15       | 1.13 | 112.21       | 108.29       | 0.97 | 77.32        | 82.17        | 1.06 | 86.44        | 90.11        | 1.04 |
| 実験値平均/梁曲げ |        | 0.88         | 0.90         | —    | 1.06         | 0.93         | —    | 1.00         | 0.96         | —    | 1.11         | 1.06         | —    |

梁せん断耐力は荒川mean式により算出

\*: 接合部せん断耐力を梁せん断力に換算した値

伏直前までの荷重-ひずみ速度曲線を図-11に示す。なお、他の各試験体も同様の性状を示した。各試験体の梁主筋の降伏したサイクルを調べると、接合部内部ではすべてが $R=1/25$ のサイクルのときに降伏し、接合部側梁端部ではN1UDで $R=1/100$ 、他の試験体では $R=1/50$ のサイクルで降伏している。

図-10より、動的載荷時の降伏時の主筋ひずみが静的載荷時のそれに比べ大きく、動的載荷時に梁端に破壊が集中することと対応している。図-11よりひずみ速度の最大値のレベルは静的載荷実験で $10^{-4}[1/s]$ 、動的載荷実験で $10^{-2}[1/s]$ であった。

## 5.2 各変形時の強度比較

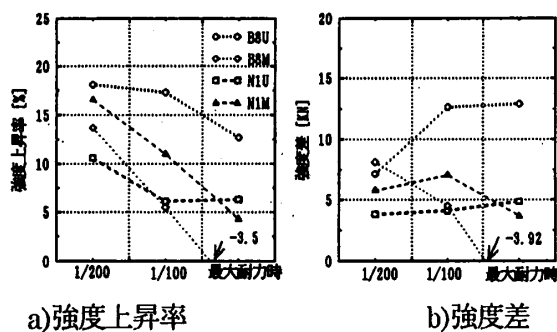
表-4に各試験体の諸強度計算値と実験値最大耐力を比較して示す。静的載荷実験を行った試験体の諸強度計算には表-3に示した材料試験結果を用い、動的載荷実験を行った試験体に対してはひずみ速度を考慮した下式に、前節に示したひずみ速度の最大値を代入して求めた材料強度推定値を用いて計算した。

$$\text{鉄筋 } f_y' = 1.2 + 0.05 \cdot \log |\dot{\epsilon}_D| \quad (1)^7$$

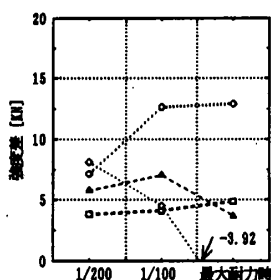
$$\text{コンクリート } f_c' = 1.3699 + 0.1417 \cdot |\dot{\epsilon}_D| + 0.0135 \cdot (|\dot{\epsilon}_D|)^2 \quad (2)^8$$

いずれの試験体とも最大耐力は計算値の梁曲げ強度に近い値を示しており、せん断余裕度が小さなB8シリーズでもすべてが接合部せん断強度を下回っている。一方、各シリーズにおける試験体に対する静的および動的載荷実験結果を比較するとU字型定着した両シリーズの試験体では、ほぼその材料強度上昇に見合う耐力上昇であるのに対し、機械式定着した試験体ではいずれのシリーズともほぼ同じ耐力であることが分かる。

次に、最大耐力を経験した部材角が $R=1/50$



a)強度上昇率



b)強度差

図-12 載荷速度間の強度上昇率、強度差

以降の大きな変形角であったことから、設計時の目標とされる部材角  $R=1/200$  あるいは  $R=1/100$  の同変形時における強度の比較を行った。図-12に各部材角時の強度上昇率（強度差（動的載荷時強度-静的載荷時強度）/静的載荷時強度）と強度差の変化を示す。いずれの試験体とも、部材角が  $1/200$  の変形時には、ひずみ速度による主筋の降伏強度の増加にみあう強度上昇あるいはそれ以上の強度上昇であるものが、変形の増大に伴って減少していくことがわかる。また、せん断余裕度の大きな試験体では、各変形レベルでの強度差が少ない結果が得られた。一方、機械式定着とU字型定着を比べると機械式定着の強度上昇率の減少が大きいことがわかる

### 5. 3 等価粘性減衰

N1 試験体の正側の各部材角の第2サイクルの等価粘性減衰定数  $h_{eq}$  を図-13に示す。各試験体とも  $R=1/100$  の変形までは変化はあまり見られないが、 $R=1/50$  で急激に上昇し、その後の変化はあまり見られない。また、動的載荷時には静的載荷時に比べ等価粘性減衰定数が幾分上昇する。また、U字型定着のほうが機械式定着よりも等価粘性減衰定数がわずかに大きい。なお、B8 試験体でも同様の結果が得られた。

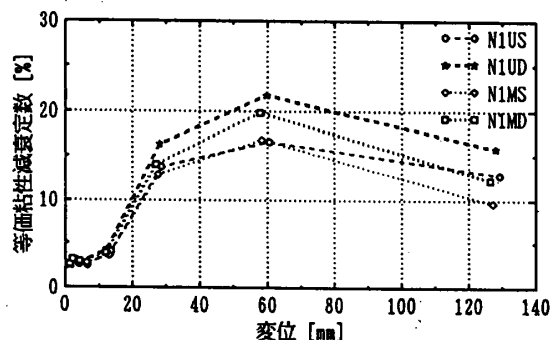


図-13 等価粘性減衰

## 6. まとめ

RC 造ト型柱梁接合部の静的および動的載荷実験結果から、力学的性状に及ぼす載荷速度の影響に関する検討を行い、以下の知見を得た。

1. 動的載荷時には静的載荷時に比べ、全体的にひび割れが少なく、梁の端部に損傷が集

中する傾向が見られた。

2. 機械式定着試験体は U 字型定着試験体に比べて大きな変形で最大耐力に至った。
3. U 字型定着試験体は、材料強度上昇に見合う耐力上昇をしたが、機械式定着試験体はほぼ同じ耐力であった。
4. 変形の小さな部材角では強度上昇率に大きな差があり、変形の増大にともなってそれが減少した。
5. 動的載荷時には静的載荷時に比べて等価粘性減衰定数が幾分上昇した。

## 謝辞

本研究は、平成9年度文部省科学研究費補助金（基盤研究 B2）「鉄筋コンクリート部材の強度と変形性能の把握に関する研究」（研究代表者：安達 洋）の一環として行ったものである試験体製作には東京鉄鋼(株)のご援助を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 安達洋ほか：機械式定着法を用いた鉄筋コンクリートト型柱梁接合部の動的な定着性状に関する研究，コンクリート工学年次論文報集，1996，Vol.18, No.2, pp.971～976
- 2) 村上雅英ほか：曲げ降伏型ト型骨組みにおけるはり主筋の機械式定着性状，コンクリート工学年次論文報集，1996, Vol.18, No.2, pp.977～982
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説，1990
- 4) 日本建築センター：建築物の構造規定 1991
- 5) 靱性設計小委員会：靱性設計小委員会報告書，1992
- 6) (財)国土開発技術センター：構造性能分科会報告書，1993
- 7) 小谷俊介：解説・鉄筋コンクリートにおける載荷速度の影響，コンクリート工学
- 8) 藤本盛久ほか：高速荷重を受ける鉄筋コンクリート柱に関する実験的研究，日本建築学会学術講演梗概集，1988, C 構造 II, pp.753～756