# 論文 ハーフ軽量 RC 造 T 型梁の耐震性能に関する研究

石井 聡\*1・金久保 利之\*2・成川 史春\*3・大谷 真生\*4

要旨:スラブに軽量コンクリート,梁に普通コンクリートを用いたT型梁(ハーフ軽量)試 験体の逆対称繰返し加力実験を行い,普通コンクリート試験体と耐震性能を比較した。変動 因子は,肋筋量,主筋の配筋,スラブ厚である。その結果,肋筋量およびスラブ厚の増加に ともない靭性能が向上した。また,上端主筋位置で付着破壊しなかった場合に,ハーフ軽量 試験体は普通コンクリート試験体と同等の性能を示した。

キーワード:ハーフ軽量, せん断強度, 曲げ強度, 靭性能, 付着応力度

1. はじめに

著者らは、14 階建鉄筋コンクリート造集合住 宅を想定した最適化構造計算を行い、軽量コン クリートを使用した場合のコストシミュレーシ ョンを行っている。シミュレーションを行った ケースモデルを表-1に、上部+基礎+杭 30m を含む全躯体コストについて, 各モデルと A モ デルとのコスト比率と 1m<sup>3</sup> あたりの普通コンク リートと軽量コンクリート差額単価の関係を図 -1に示す。スラブのみ軽量コンクリートを用い た場合, 普通コンクリートとの差額単価が 3,000 円/m<sup>3</sup>であれば、普通コンクリートと変わらない コストで建造できることがわかる。しかし、ス ラブに軽量コンクリートを用い、梁に普通コン クリートを用いた T 型梁の構造実験による構造 体の性能確認は現在報告されていない。本研究 では、スラブに軽量コンクリートを用い、梁に 普通コンクリートを用いた T 型梁試験体(以下, ハーフ軽量試験体)の構造実験による構造体の 性能確認を目的とし,多段配筋を有する T 型梁 について、繰返し載荷実験を行った。

### 2. 実験概要

試験体概要を図-2に,試験体の一覧を表-2 に示す。試験体は1/3 スケールモデルで, 梁断

| ケースモデル               |              | 部位別使用<br>コンクリート* <sup>1</sup>  |      |          | 終局強度式の<br>低減係数 |           |  |
|----------------------|--------------|--------------------------------|------|----------|----------------|-----------|--|
|                      |              | 柱 大 梁                          | 耐震壁  | スラ<br>ブ他 | せん断<br>強度      | 柱梁接<br>合部 |  |
| A                    | 普通コン<br>クリート | 普                              | 通(42 | 1.0      | 1.0            |           |  |
| в                    | スラブ,<br>壁共軽量 | 普通<br>(42) 軽量(42)              |      |          | 1.0*2          | 1.0       |  |
| С                    | スラブ<br>のみ軽量  | 普通(42) <mark>軽量</mark><br>(42) |      |          | 1.0            | 1.0       |  |
| D                    | 全て軽量         | 軽量(36)                         |      |          | 0.9            | 0.8       |  |
| E                    | 全て軽量         | 軽量(42)                         |      |          | 0.9            | 0.8       |  |
| *1·( ) は設計基進确度 (MPa) |              |                                |      |          |                |           |  |

## 表-1 コスト比較モデルの詳細

\*1:()は設計基準強度(MPa \*2:耐震壁のみ 0.9



| *1 | 筑波大学大学院 システム情報工学専攻(正会員)    |
|----|----------------------------|
| *2 | 筑波大学講師 機能工学系 博士(工学)(正会員)   |
| *3 | 日本メサライト工業(株) 技術部(正会員)      |
| *4 | 太平洋マテリアル(株) 開発研究所 技術開発グループ |
|    |                            |



図-2 試験体概要

面 175×270mm, スラブ片側幅 500mm, せん断 スパン比 2.0 である。本研究では、2 種類のコン クリートをスラブと梁に別々に使用する T 型梁 の構造性能を検討することが主目的なので, 打 継部の性能が重要である。本研究では,研究目 的を明確化するためにハーフ軽量試験体 6 体お よび普通コンクリート試験体 1 体に打継部を明 確に設け, 先打コンクリートの表面をウォータ ージェット処理し, 粗骨材寸法程度の凹凸を設 け,打継部で試験体が破壊しない方法をとった。 パラメータはコンクリート種類, 肋筋量, 主筋 の配筋, スラブ厚とした。使用した材料の機械

| 試験体<br>名 | コンク<br>ト積<br>スラ<br>ブ | フリー<br>重類<br>梁 | 打継 | 主筋<br>の配<br>筋        | 肋筋量<br><i>p</i> w<br>(%) | スラ<br>ブ厚<br>(mm) |
|----------|----------------------|----------------|----|----------------------|--------------------------|------------------|
| No.11    | 权县                   | 普通             | あり | 一段<br>6本<br>二段<br>2本 | 0.55                     | 50               |
| No.12    | 忙里                   |                |    |                      | 0.43                     |                  |
| No.13    | 普通                   | 普通             |    |                      |                          |                  |
| No.21    | 軽量                   | 普通             |    | 一段<br>4本<br>一印       | 0.55                     | 50               |
| No.22    |                      |                |    |                      |                          | 70               |
| No.23    |                      |                |    |                      |                          | 90               |
| No.24    | 普通                   |                | なし | 段<br>4本              |                          | 50               |
| No.25    |                      |                |    |                      |                          | 90               |

表-2 試験体一覧

的性質を表-3に示す。加力は建研式の正負交 番繰返し加力とし,部材角 *R*=1/400~1/15rad の 計 11 サイクルの加力を行った。

表-3 材料の機械的性質

| 鉄筋<br>種別      | 引張<br>強度<br>(MPa) | 降伏<br>強度<br>(MPa) | 備考                |  |  |  |  |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|--|--|--|--|
| D10           | 512               | 362               | 主筋(No.11~13)      |  |  |  |  |
| D6            | 483               | 297*              | スラブ筋(No.11~13)    |  |  |  |  |
| D4            | 290               | 222               | 肋筋(No.11~13)      |  |  |  |  |
| D10           | 502               | 349               | 主筋(No.21~25)      |  |  |  |  |
| D6            | 529               | 426*              | スラブ筋(No.21,24)    |  |  |  |  |
|               | 289               | 205               | 肋筋(No.21~25)      |  |  |  |  |
| D4            |                   |                   | スラブ筋(No.22,23,25) |  |  |  |  |
| コン            | 圧縮                | 割裂                |                   |  |  |  |  |
| クリ            | 強度                | 強度                | 備考                |  |  |  |  |
| ート            | (MPa)             | (MPa)             |                   |  |  |  |  |
| 普通            | 32.2              | 2.59              | No.11~13 梁部       |  |  |  |  |
| 普通            | 32.7              | 2.80              | No.13 スラブ部        |  |  |  |  |
| 軽量            | 35.6 3.11         |                   | No.11~12 スラブ部     |  |  |  |  |
| 並通            | 33.0              | 2.74              | No.21~23 梁部       |  |  |  |  |
| 日辺            |                   |                   | No.24~25          |  |  |  |  |
| 軽量            | 38.3              | 2.64              | No.21~23 スラブ部     |  |  |  |  |
| *は0.2%オフセット耐力 |                   |                   |                   |  |  |  |  |

3. 実験結果および結果の検討

### 3.1 破壊経過

全ての試験体において, 1/200rad~1/100radの

加力サイクルで曲げ降伏が先行した。試験体 No.11,12,13 は, 1/100rad の加力サイクルで, 試 験体 No.21.24 は、1/200rad の加力サイクルで、 スラブと梁の境界面にある上端二段目主筋に沿 った付着ひび割れが生じ始め、最終的にその部 分で付着割裂破壊を起こして,耐力が低下した。 試験体 No.22 は、1/200rad の加力サイクルで、 梁端部にせん断ひび割れが生じ始め、最終的に その部分でせん断引張破壊を起こして、耐力が 低下した。試験体 No.23 は、1/200rad の加力サ イクルで,試験体 No.25 は, 1/100rad の加力サ イクルで、下端二段目主筋に沿った付着ひび割 れが生じ始め、最終的にその部分で付着割裂破 壊を起こして,耐力が低下した。 打継部を設け た試験体 No.21 において, 打継部での破壊が若 干見られた。

### 3.2 荷重-部材角関係の包絡線の比較

各試験体の荷重-部材角関係の包絡線の比較 を図-3に示す。同配筋で、コンクリート種類、 pwが異なる試験体 No.11~13 の比較において、 pw=0.43%でスラブ軽量・梁普通コンクリート試 験体 No.12 の荷重低下が、R=1/50~R=1/33rad に かけて試験体 No.11, No.13 より大きい。スラブ 部のコンクリート種類のみが異なる試験体 No.13 と比較しても荷重の低下が見られるため、 本試験体のように上端主筋での付着破壊を起こ した場合にはスラブ部のコンクリートの性能に よって梁の構造性能が影響を受けると考えられ る。しかし、試験体 No.11 は、試験体 No.13 よ り荷重低下が小さいので,普通コンクリート試 験体と同様に肋筋量の増加により荷重低下が小 さくなる。

同配筋, 同スラブ厚でコンクリート種類の異 なる試験体 No.23 と No.25 の比較において, 下 端主筋での付着割裂破壊を起こした試験体 No.23, No.25 の荷重-部材角関係は同様な傾向 を示していることが分かる。上端主筋での付着 破壊を起こした場合には, スラブ部のコンクリ ートの性能によって梁の構造性能が影響を受け るが, 下端主筋での付着割裂破壊を起こした場 合には, 梁の構造性能はスラブ部のコンクリー トの性能の影響を大きく受けないと考えられる。

同配筋でスラブ厚の異なる試験体 No.21~23 の比較において、スラブ厚を大きくすると、荷 重低下が小さくなることが分かる。

### 3.3 諸強度の実験値と計算値

実験で得られた降伏強度,最大強度と諸強度 の計算値を表-4に示す。せん断強度を計算す るにあたっては,試験体 No.11~13, No.21~23 は梁とスラブでコンクリート種類が異なるので, 梁部コンクリートの強度を使った計算値と,ス ラブ部コンクリートの強度を使った計算値を求 めた。表-4より,降伏強度はすべての試験体 において実験値は曲げ強度計算値を上回ってお り,実験値の計算値に対する比は平均して 1.22 である。また,最大荷重についてもすべての試 験体の実験値は曲げ強度計算値を上回っており, 実験値の計算値に対する比は,平均して 1.29 で



図-3 荷重-部材角関係の包絡線の比較

|        |      | 実題                          | <b></b> | :値           |               | 計算値           |               | /計算值         |                        |        |  |
|--------|------|-----------------------------|---------|--------------|---------------|---------------|---------------|--------------|------------------------|--------|--|
|        |      | 降伏                          | 最大      | 曲げ           | せん断           | せん断           |               |              |                        |        |  |
| 試験体    |      | 荷重                          | 荷重      | 強度           | 強度            | 余裕度           | eQy           | eQmax        | 破壊形式                   |        |  |
|        |      | <sub>e</sub> Q <sub>y</sub> | eQmax   | $_{c}Q_{mu}$ | $_{c}Q_{su}A$ | $_{c}Q_{su}A$ | $/_{c}Q_{mu}$ | $/_c Q_{mu}$ |                        |        |  |
|        |      | (kN)                        | (kN)    | (kN)         | (kN)          | $/_c Q_{mu}$  |               |              |                        |        |  |
| No.11  | 梁部   | 117 1                       | 118.2   |              | 123.0         | 1.37          | 1.30          | 1.31         | F→B <sub>Ou</sub>      |        |  |
|        | スラブ部 | 117.1                       |         |              | 126.0         | 1.40          |               |              |                        |        |  |
| No 12  | 梁部   | 112.2                       | 112.2   | 117.2        |               | 107.0         | 1.19          | 1.25         | 1 20                   | E→D.   |  |
| 10.12  | スラブ部 | 112.5                       | 117.2   |              | 110.0         | 1.22          | 1.23          | 1.50         | г ′D <sub>Ou</sub>     |        |  |
| No 12  | 梁部   | 106 7                       | 7 115.6 |              | 107.0         | 1.19          | 1.19          | 1.29         | F→B <sub>Ou</sub>      |        |  |
| NO.15  | スラブ部 | 100.7                       |         |              | 107.0         | 1.19          |               |              |                        |        |  |
| No 21  | 梁部   | 108.2                       | 121.1   | 99.1         | 121.9         | 1.23          | 1.10          | 1.22         | F→B <sub>Ou</sub>      |        |  |
| 190.21 | スラブ部 | 108.2                       |         |              | 125.3         | 1.26          |               |              |                        |        |  |
| No 22  | 梁部   | 100.2                       | 111 7   | 95.2         | 121.9         | 1.43          | 1.28          | 1.31         | $F \rightarrow S_T$    |        |  |
| INO.22 | スラブ部 | 109.2                       | 111.7   |              | 125.3         | 1.47          |               |              |                        |        |  |
| No.23  | 梁部   | 105.5                       | 105.5   | 105.5        | 111.0         | 03.5          | 121.9         | 1.43         | 1 1 9                  | 1 2 1  |  |
|        | スラブ部 | 105.5                       | 111.9   | 111.9        |               | 125.3         | 1.47          | 1.10         | 1.51                   | L ADOG |  |
| No.24  |      | 120.7                       | 123.7   | 99.1         | 121.9         | 1.23          | 1.20          | 1.25         | $F \rightarrow B_{Ou}$ |        |  |
| No.25  |      | 108.7                       | 116.0   | 85.3         | 121.9         | 1.43          | 1.25          | 1.36         | $F \rightarrow B_{Od}$ |        |  |

表-4 実験結果の一覧

注)降伏荷重,最大荷重は正加力時に得られた値  $_{c}Q_{mu}$ : HFW 指針式  $_{0.9\Sigma}(a_{t} \cdot \sigma_{y} \cdot d)/L$  (スラブ筋全本有効)  $_cQ_{su}A$ :日本建築学会終局強度型指針式 A 法  $bj_tP_w\sigma_{wy}\cot\phi + \tan\theta(1-\beta)bDv\sigma_B/2$  破壊形式 F:曲げ降伏 S<sub>T</sub>:端部でのせん断引張破壊 B<sub>ou</sub>:上端二段目での付着割裂破壊 B<sub>od</sub>:下端二段目での付着割裂破壊

ある。降伏強度,最大荷重とも pwの違いによる 差やコンクリートの違いによる差、スラブ厚の 差,主筋配筋による差は見られない。

## 3.4 等価粘性減衰定数の比較

部材角 R=1/200, 1/100, 1/50, 1/33rad の1回 目および2回目加力サイクルの等価粘性減衰定 数(h<sub>ea</sub>)の変化を図-4に示す。各部材角の 1 回目において,等価粘性減衰定数の値は, No.24 を除く全ての試験体が R=1/50rad まで増大する。 各部材角で、せん断余裕度の大きい試験体の方 が小さな試験体よりも、また、スラブ厚の大き い試験体の方が小さい試験体よりも概ね大きな 値を示している。スラブ部のコンクリートのみ が異なる試験体 No.12 と No.13, No.21 と No.24, No.23 と No.25 を比較するとハーフ軽量試験体 の方が小さな値を示している。試験体 No.11 と No.12 を比較すると, 肋筋量の多い試験体 No.11 の方が値が大きい。各部材角の2回目において, 試験体 No.23 を除く全ての試験体で,等価粘性

等価粘性減衰定数 hea 1.0 1回目 No.12 No.11 **∆**– No.21 - No.13 -No.22 - - No.23 No.24 等価粘性减衰定数 hea 1.0 1.0 2回目 0 1/200 1/100 1/50 1/33 部材角(rad) 図-4 等価粘性減衰定数の変化

減衰定数の値は, R=1/100rad までしか増大しな

い。各部材角の1回目と同様の傾向を示し、特 にスラブ厚の違いによる値の差が1回目加力サ イクルよりも大きい。

### 3.5 耐力維持率

せん断余裕度と耐力維持率の関係を図-5に 示す。ここで耐力維持率とは,正加力時の *R*=1/33rad の 2 回目の荷重の最大荷重に対する 比と定義した。図-5より,せん断余裕度の値 が大きくなると耐力維持率も増大する。試験体 No.25 と同程度のせん断余裕度を有する試験体 No.23 では,耐力維持率に差異を見られず,ス ラブに軽量コンクリートを用いた場合でも耐力 維持率で評価すると普通コンクリートと差異が 見られないことが分かる。



#### 3.6 最大付着応力度の検討

本試験体の多くが付着割裂で破壊したので, 破壊後の主筋周辺のコンクリートの状態を考察 するために,加力終了後に内法スパン中央部で 試験体を切断し,断面を観察した。試験体 No.23 の断面を図ー6に示す。二段目主筋に沿ったサ イドスプリット型の割裂線が見られるが,最外 主筋からは梁とスラブ入隅部に向かって斜めに 発生しているひび割れが確認できる。各主筋の 付着応力度を検討するにあたり,付着割裂強度



図-6 破壊後の梁断面と想定割裂線

の計算値を以下に示す靭性保証型指針式 <sup>1)</sup>によ り求めた。なお, コンクリート強度にはスラブ 部コンクリートの強度を使用した。

一段目主筋

$$\tau_{bu} = \alpha_t \left\{ (0.086b_i + 0.11) \sqrt{\sigma_B} + k_{st} \right\}$$
(1)  
二段日主筋

$$\tau_{bu2} = \alpha_2 \alpha_t \left( (0.086b_{si2} + 0.11) \sqrt{\sigma_B} + k_{st2} \right)$$
(2)  
ここで、  $b_{si}$ : 割裂線の長さ

$$b_{si} = \frac{b}{Nd_b} - 1 \quad (- \mathfrak{B} \exists \pm \mathfrak{K}) \tag{3}$$

 $b_{si2} = (b - N_2 d_b) / (N_2 d_b)$  (二段目主筋) (4) ここで、 $\alpha_t$ :上端筋に対する付着強度低減係数、  $\alpha_2$ :二段目主筋に対する低減係数、 $k_{st}$ :横補 強筋拘束効果の違いを表す係数、 $d_b$ :主筋径、 b:梁幅、 $\sigma_B$ :コンクリート圧縮強度 (MPa)

さらに、二段目主筋の付着強度を求めるにあ たっては、二段目主筋の割裂線を、図-6に示 すように仮定し、以下の式を用いて計算した。

 $b_{si2} = (b - 2C_s - N_2d_b + 2C)/(N_2d_b)$  (5) ここで、C:最短かぶり厚さ  $C = \sqrt{C_s^2 + C_b^2}$ (図-6参照)、 $C_s$ :側面かぶり厚さ、 $C_b$ :底 面かぶり厚さ

試験体 No.21, No.24, No.25 の上端一段目お よび上端二段目主筋の端部 0.5D (D は梁せい) 区間を除いた各測定区間の最大付着応力度と最 大に達した時の加力サイクルを,付着割裂強度 の計算値とともに図-7に示す。図中の破線は b<sub>si2</sub>に靭性保証型指針式に示される(4)式を,一 点鎖線は b<sub>si2</sub>に提案式(5)を用いた時の付着割裂 強度の計算値を示している。付着応力度は,鉄 筋の除荷・再載荷曲線に完全弾塑性モデルを用 いて主筋の歪を応力度に直し,各測定区間の 2



つのゲージの応力度の差から単位断面積あたり の付着応力度( $\tau$ )として次式により求めた。

 $\tau = \Delta \sigma \cdot a_t / (\phi \cdot l) \tag{6}$ 

ここで、 $\tau$ :隣あった歪ゲージ間の主筋の付 着応力度、 $\Delta \sigma$ :隣あった歪ゲージ間の主筋の 応力度の差、 $a_t$ :主筋1本の断面積、 $\phi$ :主筋 の周長、l:隣あった歪ゲージ間の距離

上端主筋で付着割裂破壊を起こした試験体 No.21, No.24 の最大付着応力の実験値は,一段 目主筋では計算値を下回り,二段目主筋ではお おむね計算値と対応している。上端主筋での付 着割裂破壊が二段目主筋位置で進行している現 象と対応しているものと思われる。

一方,下端主筋位置での付着割裂破壊が顕著 であった試験体 No.25 の最大付着応力の実験値 は,(4)式による計算値とよい対応を示している。 しかし,下端位置の破壊であることを考えると 上端位置での付着強度は潜在的に実験値より大 きな値であることが考えられ,(5)式による評価 の可能性が伺える。

4. まとめ

(1)上端主筋の付着割裂破壊を起こした試験体において、ハーフ軽量試験体は、普通コンクリート試験体と比較して、靭性能が劣る

結果となった。これは,試験体の破壊が上 端主筋の付着割裂破壊で決定しており,そ の部分のコンクリートの性能の差によるも のと考えられる。上端主筋の付着割裂破壊 以外の破壊を起こした試験体において,ハ ーフ軽量試験体は,普通コンクリート試験 体と比較して, 靱性能は大きく変わらない 結果だった。

- (2) ハーフ軽量試験体においても、普通コンク リート試験体と同様に肋筋量、スラブ厚が 増加すれば靱性能が向上する。
- (3) 上端主筋で付着割裂破壊した試験体の上端 二段目主筋の付着応力は、計算値とよい対 応を示した。また、スラブ付帯による割裂 線長さの評価方法を提案した。

### 謝辞

本研究は、ハーフ軽量 RC 造検討委員会の活動の一環として実施されたものである。委員会 委員の方々や関係者各位に感謝いたします。

### 参考文献

 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の 靭性保証型耐震設計指針・同解説,1999.8