

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，筋筋量，主筋の配筋，スラブ厚である。その結果，筋筋量およびスラブ厚の増加にともない靱性能が向上した。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，靱性能，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 1m³ 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/m³ 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

表 - 1 コスト比較モデルの詳細

ケースモデル		部位別使用 コンクリート ^{*1}			終局強度式の 低減係数	
		柱	大梁	耐震壁 スラブ他	せん断 強度	柱梁接 合部
A	普通コン クリート	普通(42)			1.0	1.0
B	スラブ， 壁共軽量	普通 (42)	軽量(42)		1.0 ^{*2}	1.0
C	スラブ のみ軽量	普通(42)		軽量 (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：() は設計基準強度 (MPa)

*2：耐震壁のみ 0.9

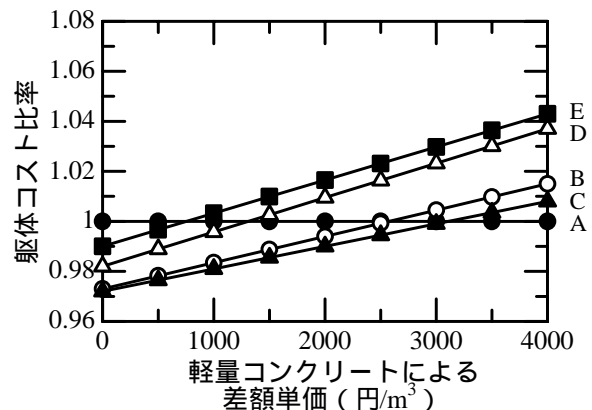


図 - 1 コスト比較

*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

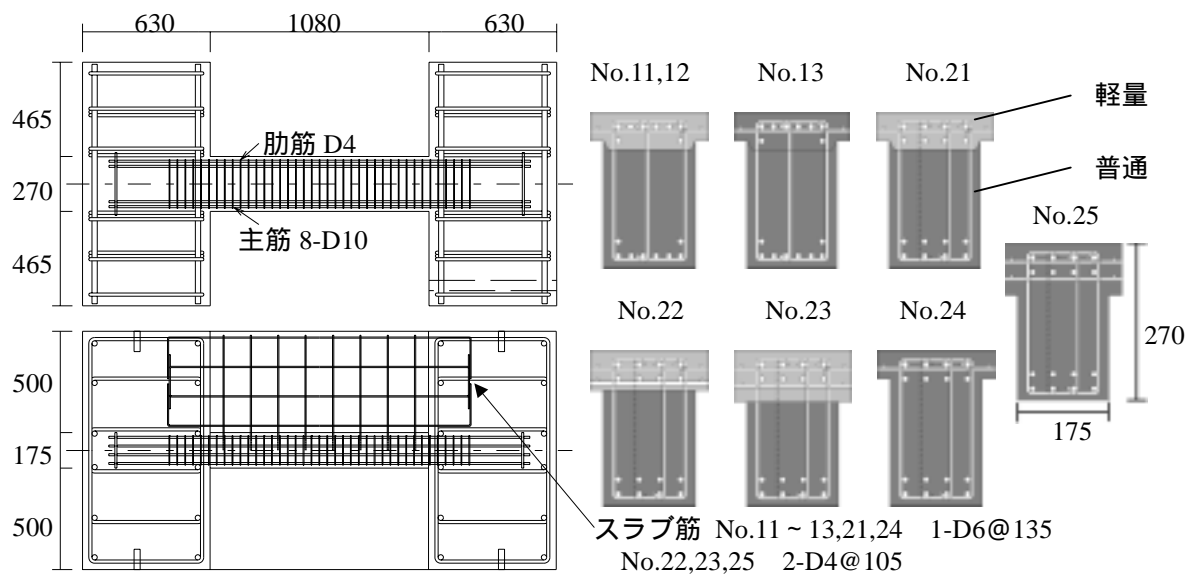


図 - 2 試験体概要

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，筋筋量，主筋の配筋，スラブ厚とした。使用した材料の機械

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 $R=1/400 \sim 1/15rad$ の計 11 サイクルの加力を行った。

表 - 3 材料の機械的性質

鉄筋種別	引張強度 (MPa)	降伏強度 (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)
D4	289	205	肋筋(No.21 ~ 25)
			スラブ筋(No.22,23,25)
コンクリート	圧縮強度 (MPa)	割裂強度 (MPa)	備考
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
普通	33.0	2.74	No.21 ~ 23 梁部
			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

表 - 2 試験体一覧

試験体名	コンクリート種類		打継	主筋の配筋	肋筋量 p_w (%)	スラブ厚 (mm)	
	スラブ	梁					
No.11	軽量	普通	あり	一段 6 本	0.55	50	
No.12							
No.13	普通	普通		二段 2 本	0.43		
No.21	軽量	普通		一段 4 本	0.55		50
No.22							70
No.23			90				
No.24	普通	なし	なし	4 本	0.55	50	
No.25						90	

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、 p_w が異なる試験体 No.11 ~ 13 の比較において、 $p_w=0.43\%$ 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、 $R=1/50 \sim R=1/33\text{rad}$ 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筋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

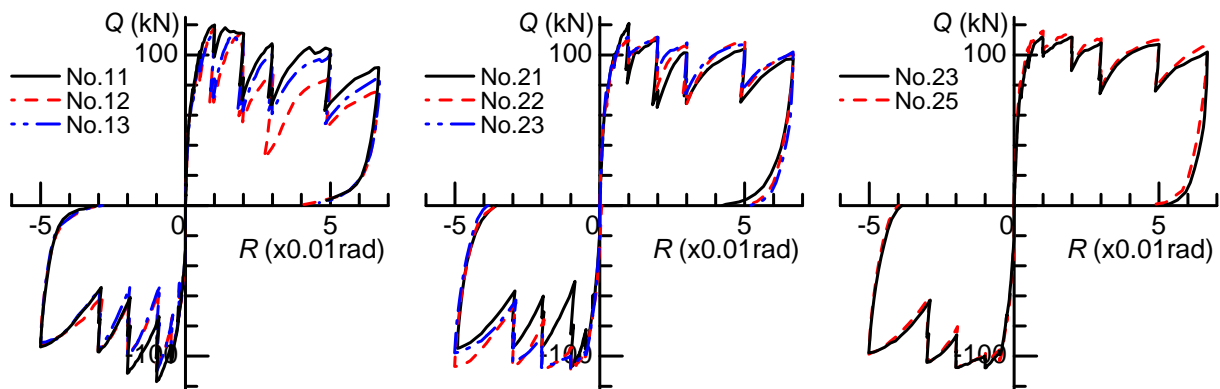


図 - 3 荷重-部材角関係の包絡線の比較

表 - 4 実験結果の一覧

試験体		実験値		計算値			実験値/計算値		破壊形式				
		降伏荷重 eQ_y (kN)	最大荷重 eQ_{max} (kN)	曲げ強度 cQ_{mu} (kN)	せん断強度 $cQ_{str}A$ (kN)	せん断余裕度 $cQ_{str}A / cQ_{mu}$	eQ_y / cQ_{mu}	eQ_{max} / cQ_{mu}					
No.11	梁部	117.1	118.2	89.9	123.0	1.37	1.30	1.31	F B _{Ou}				
	スラブ部				126.0	1.40							
No.12	梁部	112.3	117.2		107.0	1.19	1.25	1.30					
	スラブ部				110.0	1.22							
No.13	梁部	106.7	115.6		107.0	1.19	1.19	1.29					
	スラブ部				107.0	1.19							
No.21	梁部	108.2	121.1		99.1	121.9	1.23	1.10		1.22	F B _{Ou}		
	スラブ部					125.3	1.26						
No.22	梁部	109.2	111.7	85.3		121.9	1.43	1.28	1.31	F S _T			
	スラブ部					125.3	1.47						
No.23	梁部	105.5	111.9			121.9	1.43	1.18	1.31			F B _{Od}	
	スラブ部					125.3	1.47						
No.24		120.7	123.7			99.1	121.9	1.23	1.20			1.25	F B _{Ou}
No.25		108.7	116.0			85.3	121.9	1.43	1.25			1.36	F B _{Od}

注) 降伏荷重, 最大荷重は正加力時に得られた値 cQ_{mu} : HFW 指針式 $0.9\sum(a_i \cdot \sigma_y \cdot d)/L$ (スラブ筋全本有効)

$cQ_{str}A$: 日本建築学会終局強度型指針式 A 法 $b_j p_w \sigma_{wy} \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) b D v \sigma_B / 2$ 破壊形式 F: 曲げ降伏

S_T: 端部でのせん断引張破壊 B_{Ou}: 上端二段目での付着割裂破壊 B_{Od}: 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 p_w 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 $R=1/200, 1/100, 1/50, 1/33$ rad 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_{eq}) 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 $R=1/50$ rad 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, 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

減衰定数の値は, $R=1/100$ rad までしか増大しな

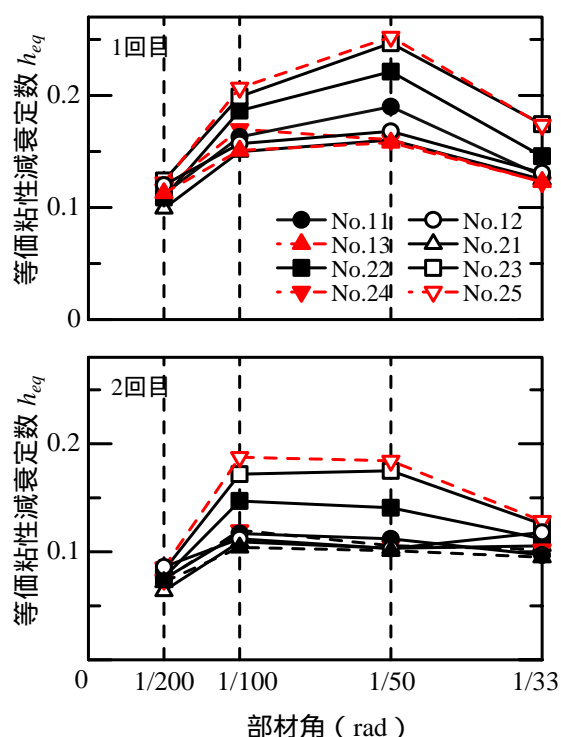


図 - 4 等価粘性減衰定数の変化

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 $R=1/33\text{rad}$ 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。

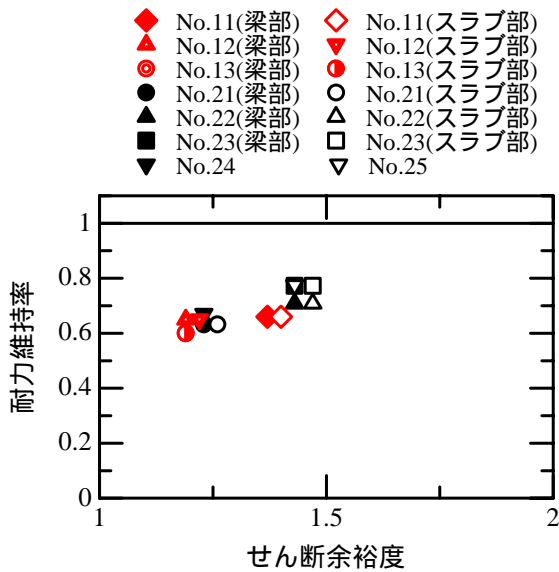


図 - 5 せん断余裕度と耐力維持率の関係

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 - 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

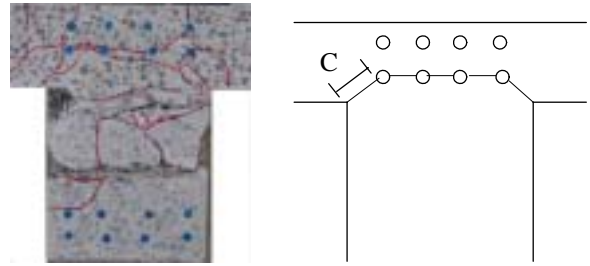


図 - 6 破壊後の梁断面と想定割裂線

の計算値を以下に示す靱性保証型指針式¹⁾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

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

二段目主筋

$$\tau_{bu2} = \alpha_2 \alpha_t \left\{ (0.086b_{si2} + 0.11) \sqrt{\sigma_B} + k_{st2} \right\} \quad (2)$$

ここで、 b_{si} ：割裂線の長さ

$$b_{si} = \frac{b}{Nd_b} - 1 \quad (\text{一段目主筋}) \quad (3)$$

$$b_{si2} = (b - N_2 d_b) / (N_2 d_b) \quad (\text{二段目主筋}) \quad (4)$$

ここで、 α_t ：上端筋に対する付着強度低減係数、 α_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、 σ_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。

$$b_{si2} = (b - 2C_s - N_2 d_b + 2C) / (N_2 d_b) \quad (5)$$

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_{si2} に靱性保証型指針式に示される(4)式を、一点鎖線は b_{si2} 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

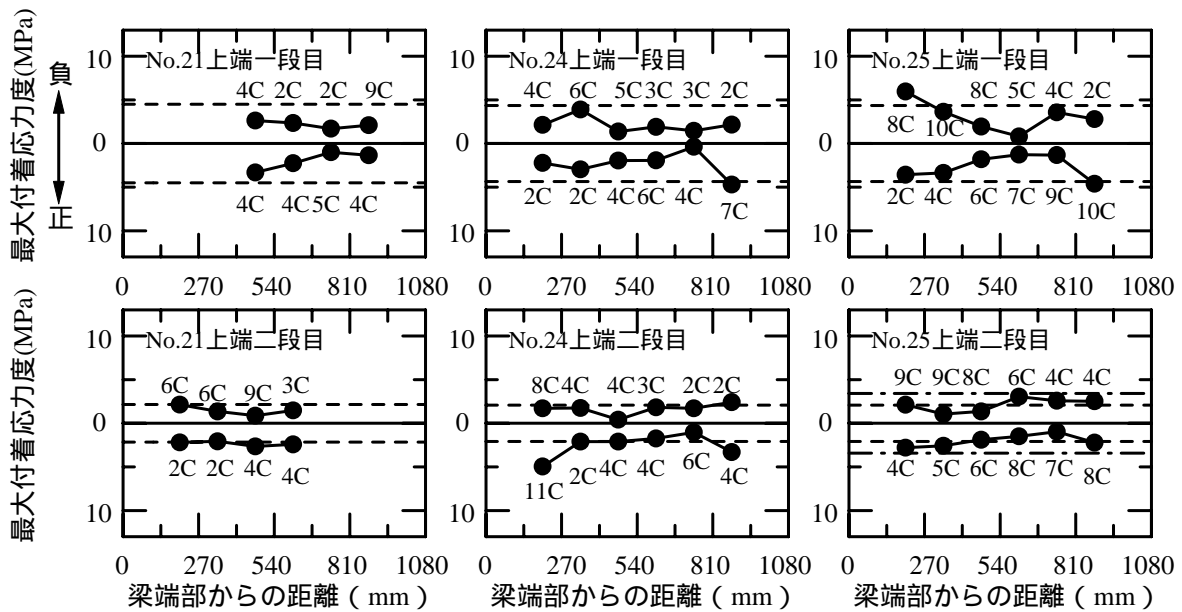


図 - 7 最大付着応力度

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(τ)として次式により求めた。

$$\tau = \Delta\sigma \cdot a_t / (\phi \cdot l) \quad (6)$$

ここで、 τ ：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、 ϕ ：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、靱性能が劣る

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筋筋量、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

- 1) 日本建築学会：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，1999. 8