

異種強度コンクリートが介在する RC 耐震壁に関する実験的検討

Experimental Study of Reinforced Concrete Shear Wall Using Different Concrete in Strength

松永 健太郎 KENTARO MATSUNAGA

小坂 英之 HIDEYUKI KOSAKA

建築生産計画部 平野 秀和 HIDEKAZU HIRANO

建築生産計画部 松井 幸一郎 KOICHIRO MATSUI

建築生産計画部 佐古 潤治 JUNJI SAKO

スラブと壁板が交差する範囲にもスラブと同強度のコンクリートを打設した RC 壁板の水平加力実験を実施した。スラブの有無、スラブ内に配置した拘束筋の数量およびスタブへの定着の有無をパラメータとした。スラブの無い試験体ではスラブに相当する部分の損傷が顕著であったが、スラブを有する試験体ではスラブ部分での水平ずれが確認されたものの優れた変形性能を示した。壁板のコンクリート強度を用いて計算した終局強度を最大荷重が上回った。これは、スラブの厚さが壁板高さに比べて薄く、上下の高強度のコンクリートと加力直交方向のスラブの存在によって交差範囲が拘束されたことによるものと考えられる。

キーワード：耐震壁，壁板，スラブ，拘束効果，終局強度，曲率

Shear loading tests of wall panel having slab-wall panel joint region whose concrete strength is the same as slab were conducted. The test parameters were the presence or absence of the slab, number of confinements and the presence or absence of anchoring of the confinements. On the one hand the specimen without slab showed significant damage in the slab, on the other hand the specimen with slab showed excellent deformation performance although the horizontal slip between the slab and wall panel was observed. The maximum loads exceeded the ultimate strength calculated by using the compressive strength of wall panel. It was considered for slab-wall panel joint to be confined by slab thickness of wall panel height and high strength concrete of wall panel and orthogonal direction slab.

Key Words: Shear Wall, Wall Panel, Slab, Confinement Effect, Ultimate Strength, Curvature

1. はじめに

通常の建物では、スラブに必要とされるコンクリートの設計基準強度は、耐震壁の設計基準強度よりも低いことが多い。コンクリート打設時には、スラブと壁板（壁梁）の間に型枠（コン止め）を設置して各々に異なるコンクリートを打ち分ける場合（図-1 (1)）と、スラブにも壁板用の高い強度のコンクリートを打設する場合（図-1 (2)）がある。

図-1 (3)に示すように、スラブが壁板と交差する範囲もスラブと同じ強度のコンクリートを打設する工法（以下、本工法）が可能になれば、止め型枠工事が省力化されることによってコンクリートの打継ぎ部の処理に関わる品質上の諸問題を回避でき、施工性も改善される。また、スラブに必要以上の高強度コンクリートを用いる場

合と比べると、材料費を削減することもできるものと考えられる。

本工法の壁板では、壁高さの 1/10～1/15 程度の薄い層（スラブ厚さ相当）のみが壁板の他の部分よりも低い強度のコンクリートで構成されることになり、そのような異種強度のコンクリートが混在する RC 壁板の破壊性状や終局強度は不明である。そこで本研究では、スラブと壁板の交差部に薄い低強度コンクリート層を有する RC 壁板の水平加力実験を行った。

2. 実験概要

(1) 試験体

試験体一覧を表-1 に、試験体の形状および配筋を図-2 に示す。試験体は側柱のない単層の RC 壁板 5 体であ

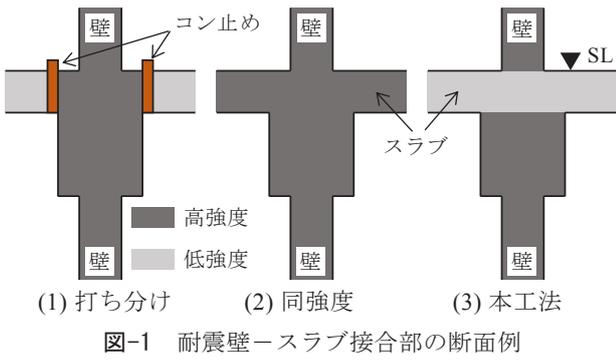


図-1 耐震壁-スラブ接合部の断面例

表-1 試験体一覧

| 試験体 | 壁 | | | | スラブ | | U字筋 | |
|--------------------|------------|------------|-------------|-------------|-----|--------------|-----|----------|
| | 厚さ | | 縦筋 | 横筋 | 有無 | 配筋 | 組数 | 定着 |
| | 計画 (mm) | 実測 (mm) | | | | | | |
| NO13 ¹⁾ | | 53 | | | 無し | | - | |
| NO13-N | | 55 | | | 無し | | - | |
| NO13-S | 50 | 81 | 1-D6 @50 | 1-D6 @85 | 有り | 1-D6 @100 | - | |
| NO13-SU12S | | 58 | | | | | 12 | 無し 有り |
| NO13-SU12 | | 53 | | | | | 9 | 有り |
| NO13-SU9 | | 53 | | | | | | |

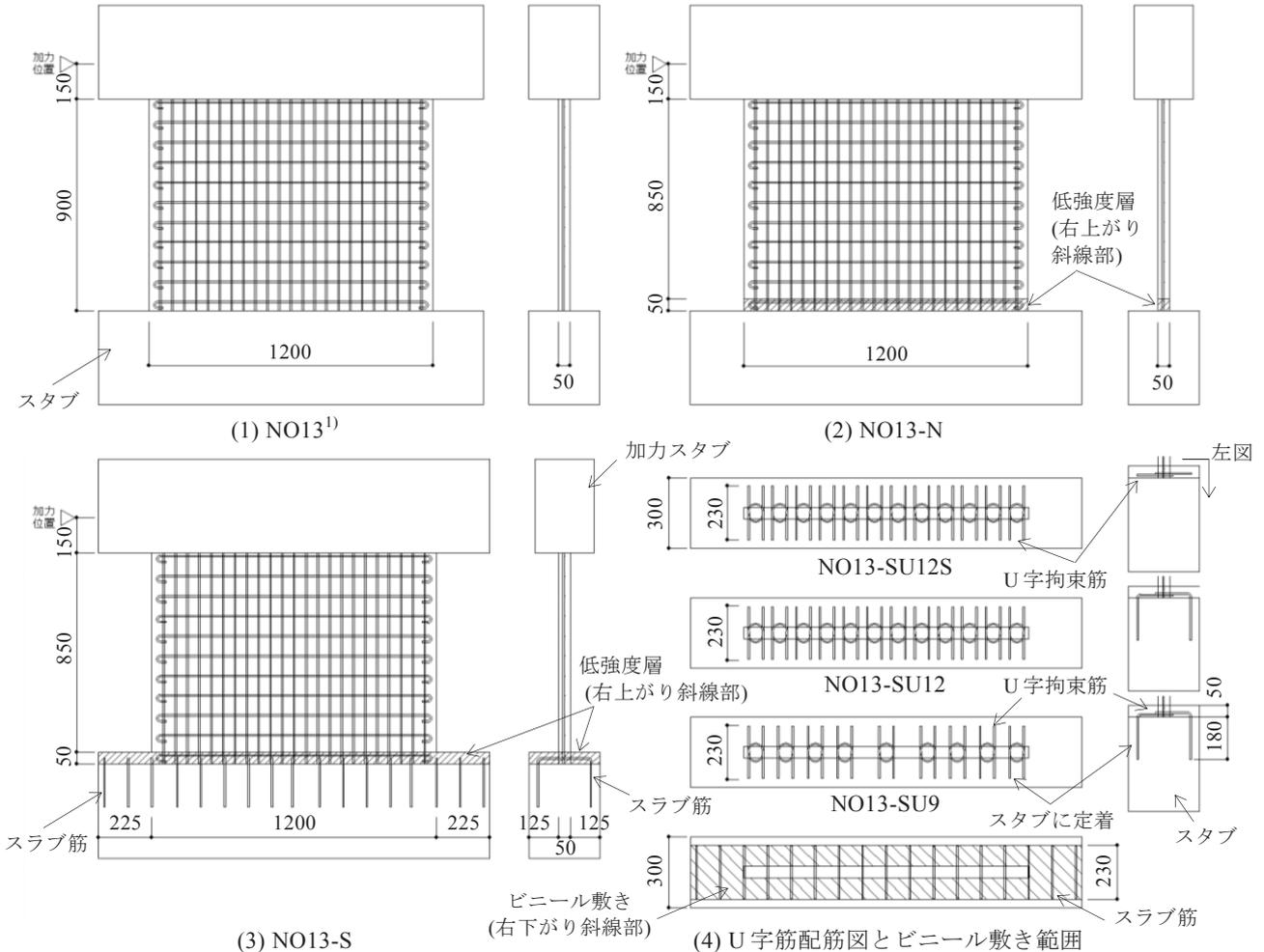


図-2 試験体の形状と配筋

る。いずれもスタブ上面から高さ 50mm の範囲にはスラブを想定して低い強度のコンクリート（以下、低強度層と記す）を用い、低強度層を除く壁板部分、スタブおよび加力スタブには、圧縮強度が低強度層よりも 2 倍以上高いコンクリートを用いた。試験体の形状および配筋は、既報¹⁾においてせん断破壊を示した壁板全体が同一コンクリートで打設された NO13 と同一とした。

NO13-N はスラブがなく、低強度層にスラブのない試験体である。NO13-S、NO13-SU12S、NO13-SU12 および NO13-SU9 の 4 体は、低強度層にスラブを設けた試

験体である。スラブコンクリートは、スタブ上面の図-2 (4) に示す範囲にビニールを敷いた後、壁板部分（壁板とスラブの交差部分）を含めて同時に打設した。スラブ内には加力直交方向にスラブ筋（D6@100mm）を配筋し、両端部をスタブに折り曲げ定着させている。したがって、スラブ筋定着部のせん断抵抗によって低強度層は横方向に拘束された状態になっている。NO13-SU12S、NO13-SU12 および NO13-SU9 には、スラブ筋のほかに図-2 (4) に示すように U 形の補強筋（U 字拘束筋）を配筋した。U 字拘束筋 2 本を組み合わせると壁板部で円形状

表-2 コンクリートの材料試験結果

| 試験体 | 壁 | | スラブ | |
|------------|---|---|---|---|
| | 圧縮強度 $w\sigma_B$ (N/mm ²) | ヤング係数 wE_c (N/mm ²) | 圧縮強度 $s\sigma_B$ (N/mm ²) | ヤング係数 sE_c (N/mm ²) |
| NO13 | 37 | 24800 | - | - |
| NO13-N | 55 | 24800 | 21 | 17300 |
| NO13-S | 70 | 23700 | 21 | 17600 |
| NO13-SU12S | 56 | 25600 | 15 | 15000 |
| NO13-SU12 | 61 | 26100 | 19 | 16400 |
| NO13-SU9 | 61 | 26800 | 18 | 15200 |

表-3 鉄筋の材料試験結果

| 試験体 | 呼び名 | 降伏点 σ_y (N/mm ²) | 引張強度 σ_u (N/mm ²) | 伸び (%) | 適用部位 |
|------------|-----|---|--|-----------|-----------------|
| NO13 | D6 | 388 | 548 | 23 | 壁筋 |
| NO13 以外 | D19 | 379 | 580 | 24 | スタブ・加力スタブ主筋 |
| | D10 | 360 | 503 | 22 | スタブ・加力スタブ主筋 |
| | D6 | 342 | 520 | 24 | 壁筋, スラブ筋, U字拘束筋 |

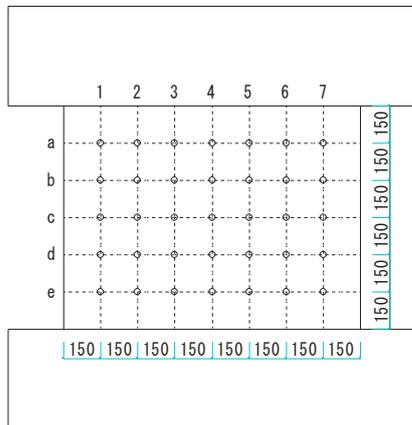


図-3 壁厚計測位置

になるようにし、これを 1 組として NO13-SU12S および NO13-SU12 には 12 組を、NO13-SU9 には 9 組を配筋した。NO13-SU12S は U 字拘束筋の端部をスタブに定着させていないが、NO13-SU12, NO13-SU9 は端部をスタブに折り曲げ定着させている。

壁厚の計測位置を図-3 に示す。水平・鉛直両方向に 150mm 間隔に計 35 箇所を計測した。壁厚は 50mm とする計画であったが、NO13-S はコンクリート打設時に型枠下部が変形し、壁板下部が上部よりも厚くなって均等な断面形状ではなかったため、計測値の相加平均を壁厚の実測値とした。以後の検討に用いる壁厚は表-1 に示す実測値とする。

試験体を使用したコンクリートおよび鉄筋の材料試験結果を表-2 および表-3 にそれぞれ示す。

(2) 加力方法および計測位置

加力方法は既報¹⁾と同様であり、図-4 に示す加力装置を用いて試験体上部に拘束力 V_j (180kN) を加えなが

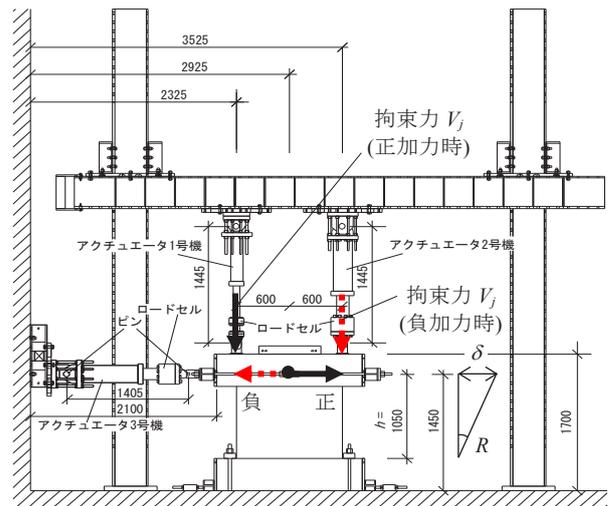


図-4 加力方法

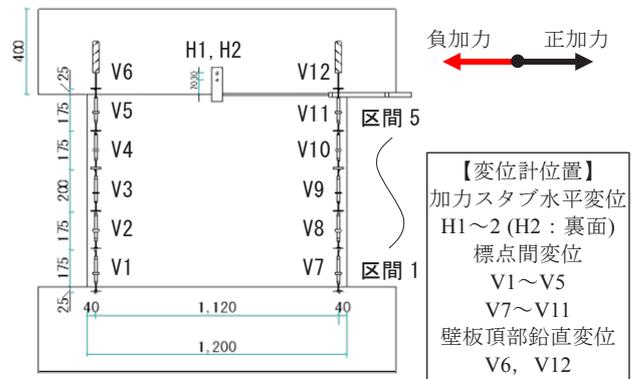


図-5 変位の計測位置

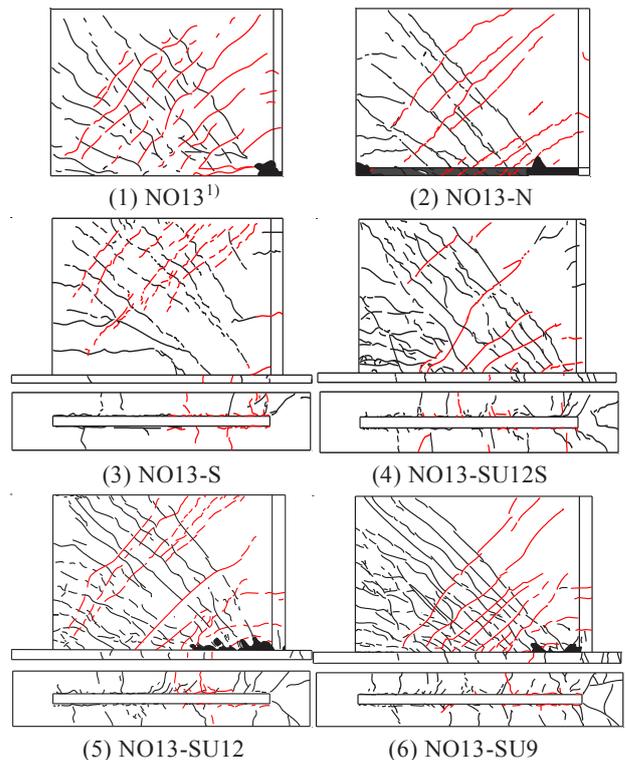


図-6 ひび割れ状況 (黒：正加力, 赤：負加力)

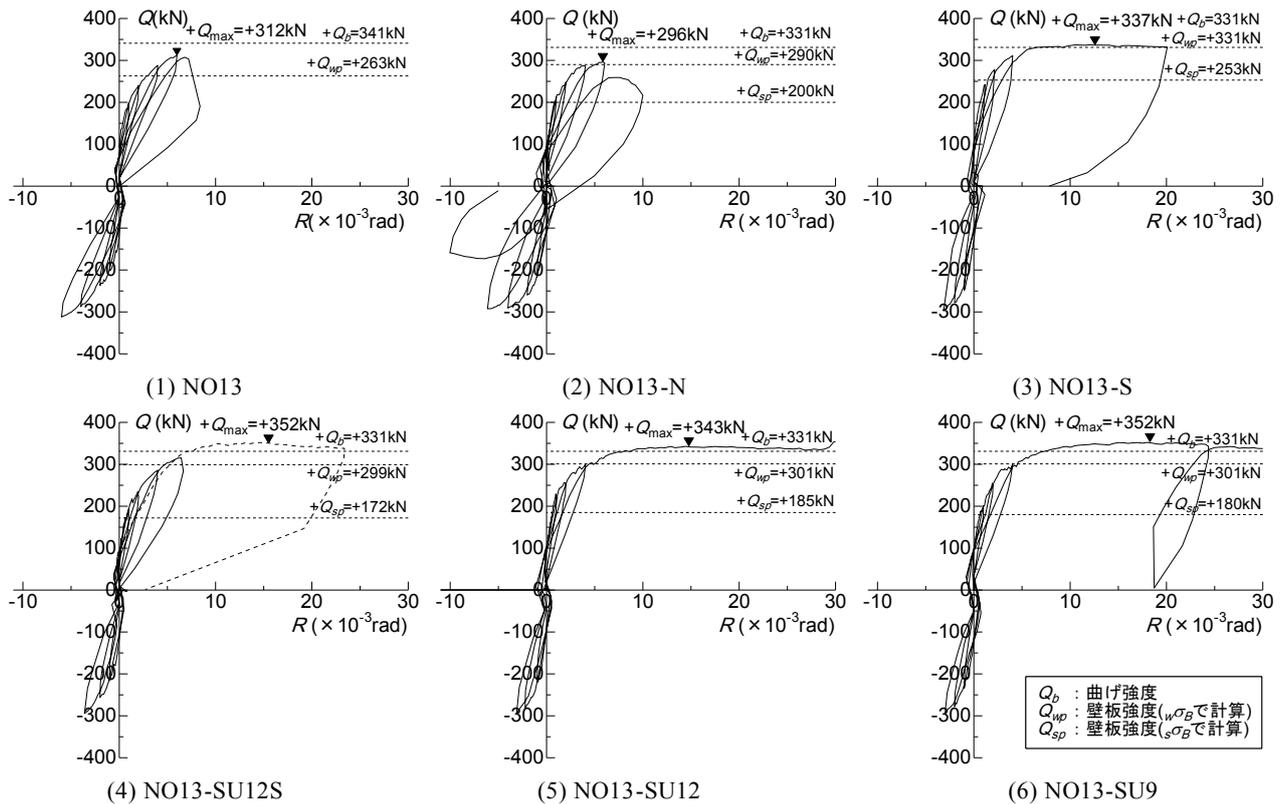


図-7 荷重-変形曲線

ら、水平力 Q を載荷した。水平力は変位漸増の正負繰返し加力とし、各サイクルの部材角 R は 1000 分の 1, 2, 4, 6, 10, 20rad を基本とした。拘束力 V_j は各サイクルの正負の移行時 ($R=0$) に所定の側に切り替えて、加力方向に対して曲げ引張側のみ加えている。

変位の計測位置を図-5 に示す。壁板端部位置における鉛直（標点間）変位および加力スタブ中央の水平変位を計測した。

3. 実験結果

(1) ひび割れ状況

各試験体の加力後のひび割れ状況を、壁板がせん断破壊した NO13¹⁾と比較して図-6 に示す。スラブのない NO13-N は、NO13 に比べて壁板の斜めひび割れはやや少なく、加力の進展に伴って低強度層の曲げ圧縮域でコンクリートの圧壊が進み、低強度層の損傷が顕著であった。

スラブのある 4 体では、曲げ引張域から伸びる水平のひび割れが NO13, NO13-N よりも多く確認され、低強度層では水平ずれが確認された。NO13-S は、壁厚の厚い壁下部では斜めひび割れは比較的少ないが、NO13-SU12S, NO13-SU12, NO13-SU9 では壁板に斜めひび割れが多数発生した。低強度層の上部の高強度コンクリー

トの圧壊の状況は U 字拘束筋を定着させた NO13-SU12, NO13-SU9 のほうが、U 字拘束筋を定着していない NO13-SU12S に比べて激しくなっている。

(2) 荷重-変形関係

各試験体の荷重-変形曲線を図-7 に示す。なお、NO13-SU12S については実験治具の不備により $R=6.43 \times 10^{-3}\text{rad}$ 時点でねじれが大きくなったため、その後にねじれを防止して再実験を行った結果を破線で示す。スラブのない NO13-N は、部材角 $R=5.84 \times 10^{-3}\text{rad}$ で最大荷重を示し、その後荷重が低下した。破壊形式は、壁板全体が同一コンクリートの NO13 と同様にせん断破壊であった。

一方、スラブのある NO13-S, NO13-SU12S, NO13-SU12 および NO13-SU9 では、最大荷重は NO13-N を上回り、荷重低下は見られず、優れた変形性能を示した。この 4 体の最大荷重は同程度であり、いずれも破壊形式は曲げ破壊と判断される。

(3) 曲率分布

$R=6 \times 10^{-3}\text{rad}$ 時の曲率分布を図-8 に示す。曲率は、図-5 に示す壁両端位置で計測（高さ方向に 5 分割）した各標点間の鉛直変位から求めた。せん断破壊を示した NO13 では、最下部の区間 1 の曲率は $16 \times 10^{-6}/\text{mm}$ となっている。これに対し、スラブのない NO13-N では、低強度層を含む区間 1 の曲率は $40 \times 10^{-6}/\text{mm}$ と大きな

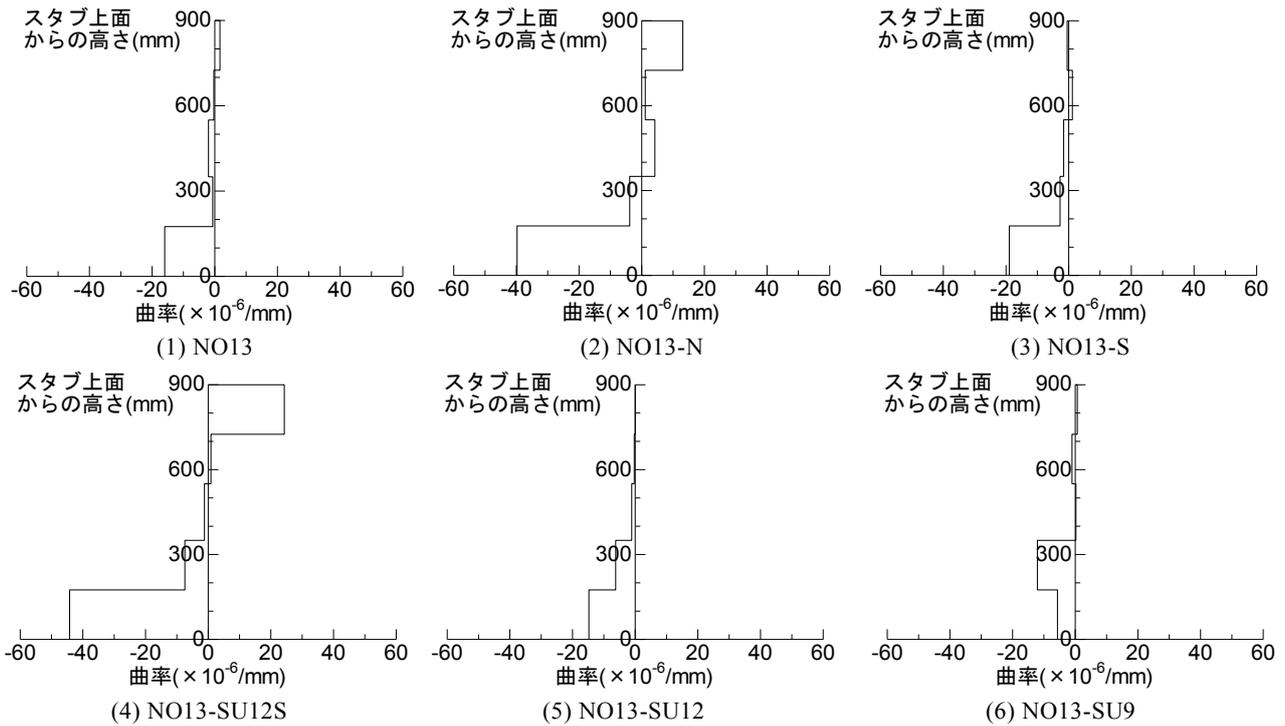


図-8 壁板の曲率分布 ($R=6 \times 10^{-3}$ rad 時)

表-4 最大荷重実験値と強度計算値

| 試験体 | 最大荷重時実験値 | | | 壁板強度計算値 | | | | 破壊形式 | |
|------------|-------------------------|--|---|----------------------------|----------------------------------|--------------------------|----------------------------------|------|--------------------------|
| | 荷重 Q_{max} (kN) | せん断応力度 τ_{max} (N/mm ²) | 部材角 R_{max} ($\times 10^{-3}$ rad) | 曲げ強度 Q_b^{*1} (kN) | 壁のコンクリート 強度 $\nu\sigma_B$ 使用時 | | スラブのコンクリート 強度 $s\sigma_B$ 使用時 | | |
| | | | | | Q_{wp} (kN) | $\frac{Q_{max}}{Q_{wp}}$ | Q_{sp} (kN) | | $\frac{Q_{max}}{Q_{sp}}$ |
| NO13 | 312 | 4.91 | 5.99 | 341 | 263 | 1.18 | - | - | せん断 |
| NO13-N | 296 | 4.49 | 5.84 | 331 | 290 | 1.02 | 200 | 1.48 | せん断 |
| NO13-S | 337 | 3.47 | 12.7 | 331 | 331 | 1.02 | 253 | 1.33 | 曲げ |
| NO13-SU12S | 352 | 5.06 | 15.5 | 331 | 299 | 1.18 | 172 | 2.04 | 曲げ |
| NO13-SU12 | 343 | 5.43 | 14.8 | 331 | 301 | 1.14 | 185 | 1.85 | 曲げ |
| NO13-SU9 | 352 | 5.56 | 19.1 | 331 | 301 | 1.17 | 180 | 1.95 | 曲げ |

※1 $Q_b = M_u/h$, $M_u = 0.5p_{sv}t_w l_w' \sigma_{sv} l + 0.5Nl + M^2$, $l = 0.9l_w'$, h : 加力高さ, l_w' : 壁板長さ, p_{sv} : 壁縦筋比, t_w : 壁厚 (表-1 の実測値), σ_{sv} : 壁縦筋の降伏強度, N : 軸力 ($=V_j$), M : 拘束力 V_j による曲げ戻しモーメント

っている。NO13-S では、壁板下部の壁厚が厚いために、区間 1 の曲率は NO13 と同程度であった。スラブ内に U 字拘束筋を配筋した 3 体の曲率分布を比較すると、U 字拘束筋の端部を定着していない NO13-SU12S では区間 1 の曲率が NO13-N と同程度に大きくなっているのに対し、U 字拘束筋をスタブに定着させた NO13-SU12 と NO13-SU9 では区間 1 の曲率は小さくなっている。これは、定着のある鉄筋 (スラブ筋+U 字拘束筋) の多い試験体のほうが低強度層の横拘束が大きくなったためであると考えられる。スラブが連続する場合の拘束の程度については別途検討が必要であるが、壁板の両側にスラブがあり、上下に高強度コンクリートがあることによって、低強度層の壁板部のコンクリートは拘束されたような応力状態になることが推察される。

(4) 終局強度

各試験体の最大荷重実験値 Q_{max} と強度計算値 Q_b , Q_{wp} , Q_{sp} を表-4 に示す。 Q_b は同表脚注に示す曲げ強度式による M_u のせん断力換算値である。壁厚には表-1 に示す実測値を用いた。 Q_{wp} は壁板部分の高強度コンクリートの圧縮強度 $\nu\sigma_B$ を用いて算定した壁板強度であり、 Q_{sp} はスラブ部分の低強度層のコンクリートの圧縮強度 $s\sigma_B$ を用いて計算した壁板強度である。本壁板強度算定法³⁾は、壁縦筋を考慮したトラスアーチ機構に基づくものであり、コンクリートの ϕ 方向圧縮応力度 (ϕ : トラス機構の圧縮束の角度, $\cot\phi=1$) が有効強度 ($\nu\sigma_B$, ν : 有効係数, σ_B : コンクリートの圧縮強度) に達する場合はせん断強度を、 $\nu\sigma_B$ 未満で壁縦筋が全降伏する場合は曲げ強度 (Q_b に一致) を与えるものである。

せん断破壊を示した NO13 の実験値 Q_{max} は Q_b を下回り、壁板強度計算値 Q_{wp} との比率 Q_{max}/Q_{wp} は 1.18 となっている。スラブがなく低強度層を有する NO13-N の Q_{max} は曲げ強度のせん断力換算値 Q_b に達しておらず、実験時にせん断破壊を示したことと対応しているが、 Q_{max} は低強度層の ${}_s\sigma_B$ を用いて計算した Q_{sp} の 1.48 倍 ($=Q_{max}/Q_{sp}$) となり、高強度コンクリートの ${}_w\sigma_B$ を用いて計算した Q_{wp} 相当 ($Q_{max}/Q_{wp}=1.02$) の終局強度を示した。

スラブのある NO13-S の Q_{max} は Q_b 相当の荷重を示している。壁板下部の壁厚が厚い試験体であるため、 Q_{wp} 、 Q_{sp} を壁厚の実測値を用いて算定すると、 Q_{max}/Q_{wp} は 1.02、 Q_{max}/Q_{sp} は 1.33 であった。

スラブ内に U 字拘束筋のある NO13-SU12S、NO13-SU12 および NO13-SU9 の Q_{max} は同程度であり、いずれも Q_b を上回り、 Q_{max}/Q_{wp} は 1.14~1.18、 Q_{max}/Q_{sp} は 1.85~2.04 となっている。本実験では U 字拘束筋の定着の有無や数量によって最大荷重に差異は見られなかった。

4. まとめ

スラブと壁板の交差部に薄い低強度コンクリート層を有する RC 壁板の水平加力実験を行った結果、その低強度層にスラブを設けた試験体の最大荷重は、壁板の大部分を占める高強度コンクリートの圧縮強度を用いて計算した壁板強度を上回った。これは、低強度層の厚さが壁板高さに比べて比較的薄く、上下には高強度のコンクリートが存在し、加力直交方向にはスラブが存在することによって、低強度層が拘束されたことによるものと考えられる。

謝辞

本実験は、室蘭工業大学構造物水平加力試験室で実施されたものである。実験の実施にあたり同大学大学院教授 溝口光男博士ならびに溝口研究室の大学院生・学部生の皆様より多大なるご協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高橋俊一，荒井康幸，溝口光男，小坂英之，山中久幸：鉛直接合部滑り破壊型 PCa 連層耐震壁における壁パネルの強度についての実験（その 3. 追加実験），日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2 構造IV，pp.171-172，2006.9
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所他：壁式鉄筋コンクリート造設計施工指針，海文堂出版，p.10，

2003.2

- 3) 小坂英之，溝口光男，荒井康幸：鉄筋コンクリート連層壁板の強度算定法，日本建築学会構造系論文集，第 79 巻，第 695 号，pp.129-136，2014.1