

(11) 鋼・コンクリート合成サンドイッチ構造部材の終局耐力

|            |        |
|------------|--------|
| 鹿島建設技術研究所  | 秋山 暉   |
| 鹿島建設技術研究所  | ○小関喜久夫 |
| 鹿島建設技術研究所  | 平 和男   |
| 鹿島建設土木設計本部 | 佐々木正廣  |

1. はじめに

巨大な氷荷重が作用するとされる氷海域向け石油掘削用構造物の耐氷壁を、鋼とコンクリートからなるハイブリッド構造とする概念設計が近年数多く提案されている。耐氷壁の構造型式としてハイブリッド構造が有望視されているのは、同構造に、氷海域での要求性能を満足する耐荷力と靱性、並びに優れた施工性などが期待されているためである。一方、沈埋トンネルや貯蔵タンク等の一般土木構造物においても、構造材料の有効利用、止水性の確保、あるいは工期短縮等の観点からハイブリッド構造部材が注目されている。

ハイブリッド構造部材の代表的なものに、鋼製二重殻中にコンクリートを充填した鋼・コンクリート合成サンドイッチ構造部材があり、このサンドイッチ部材に関しては、栖原らの研究<sup>1</sup>、服部らの研究<sup>2</sup>、及び筆者らの研究<sup>3, 4</sup>がこれまでに報告されている。

栖原らは、せん断スパン比  $a/d$  が  $1.5 \leq a/d \leq 2.7$ 、鋼材比  $p$  が  $0.8\% \leq p \leq 1.5\%$  の範囲の実験を実施し、また服部らは、 $a/d \approx 1.7$ 、 $3.7\% \leq p \leq 4.7\%$  の範囲の実験を実施し、同部材の終局耐力はトラス・アナロジーに基づいて算定できること等を報告した。

一方、筆者らは、氷海構造物及び一般土木構造物を対象として  $0.3 \leq a/d \leq 4.8$ 、 $0.5\% \leq p \leq 4.2\%$  の範囲の実験を実施し、①サンドイッチ部材の終局耐力が、RC部材における曲げ耐力算定式ないしはせん断耐力算定式を準用して精度良く推定できること、②耐荷力確保のため鋼材比を大きくした場合でも、優れた変形性能を示すせん断補強を行うことができること、③せん断補強鋼材量を同一とし且つ上下鋼板を適切に結合した場合には、静的な構造挙動がせん断補強鋼材の配置方法に拘らず実質的に同等となること等を示した。

本報告では、筆者らが実施した上述の実験の結果に基づき、鋼・コンクリート合成サンドイッチ構造部材の終局耐力に及ぼす、①せん断スパン比、②鋼材比、及び③せん断補強量の三つの基本要因の影響について考察した結果を報告する。

なお、筆者らの実験研究のうち、氷海構造物を対象とした  $0.3 \leq a/d \leq 2.3$ 、 $1.1\% \leq p \leq 4.2\%$  の範囲の実験<sup>3</sup> は、三井造船㈱との共同研究として実施したものである。

2. 実験方法

せん断スパン比、鋼材比、及びせん断補強量をパラメータとした試験体の種類を表-1に、形状を図-1に示す。表-1には、使用した鋼材及びコンクリートの強度も併記した。

実験では、2スパン連続梁と単純梁の2種類の梁試験体を用い、各々、スパン中央に集中荷重を載荷した。

なお、表-1及び図-1に示したように、比較用としてRC部材に対する実験も行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 実験結果

実験結果は表-1中に示したとおりである。

3.2 ひびわれ状況とたわみ

図-2に、サンドイッチ試験体とRC試験体の最終ひびわれ状況を例示した。同図に示したとおり、RC試験体のひびわれはサンドイッチ試験体に比べより分散していたが、両試験体の終局破壊モードは大略同等と見

表-1 試験体の種類及び実験結果

| 試験体 No | 試験体名 | 構造型式 | 部材種類 | スパン長 ℓ (cm) | 有効高さ d (cm) | 高さ h (cm) | 部材幅 b (cm) | せん断スパン比 ① (a/d)1 | せん断スパン比 ② (a/d)2 | 載荷板幅 r <sub>g</sub> (cm) | 支 承 板 幅 r <sub>c</sub> (cm) | 鋼 材 比 ρ (%) | 鋼 材 指 数 p <sub>sv</sub> /f <sub>c</sub> | せん断補強材比 ρ <sub>v</sub> (%) | せん断補強材指数 p <sub>vf</sub> /f <sub>c</sub> | コンクリート強度 f <sub>c</sub> | 鋼材の降伏強度 f <sub>sy</sub> | せん断の補強材強度 f <sub>vy</sub> | せん断の補強材強度 f <sub>sv</sub> | 曲げひびわれ発生                |                        | 斜めひびわれ発生                |                        | 鋼材降伏                    |                        | 最大荷重                      |                          |     |
|--------|------|------|------|-------------|-------------|-----------|------------|------------------|------------------|--------------------------|-----------------------------|-------------|-----------------------------------------|----------------------------|------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|---------------------------|--------------------------|-----|
|        |      |      |      |             |             |           |            |                  |                  |                          |                             |             |                                         |                            |                                          |                         |                         |                           |                           | 荷重 P <sub>f</sub> (ton) | 変位 δ <sub>f</sub> (mm) | 荷重 P <sub>d</sub> (ton) | 変位 δ <sub>d</sub> (mm) | 荷重 P <sub>y</sub> (ton) | 変位 δ <sub>y</sub> (mm) | 荷重 P <sub>max</sub> (ton) | 変位 δ <sub>max</sub> (mm) |     |
| 1      | 2B   | 連続はり | Sand | 60          | 30.3        | 31.2      | 30         | 0.68             | 0.36             | 16                       | 22                          | 1.98        | 0.19                                    | ---                        | ---                                      | 359                     | 3400                    | ---                       | 7                         | ---                     | 60                     | 0.5                     | 116                    | 0.6                     | 147                    | 1.2                       |                          |     |
| 2      | 2A'  |      |      | 75          | "           | "         | "          | 0.92             | 0.61             | "                        | "                           | "           | 0.17                                    | ---                        | ---                                      | "                       | 3100                    | ---                       | 9                         | ---                     | 50                     | 0.6                     | 89                     | 0.7                     | 117                    | 1.4                       |                          |     |
| 3      | 3A1  |      |      | 90          | "           | "         | "          | 1.17             | 0.86             | "                        | "                           | "           | 0.19                                    | ---                        | ---                                      | "                       | 3400                    | ---                       | "                         | ---                     | 30                     | 0.5                     | 43                     | 3.2                     | 98                     | 1.8                       |                          |     |
| 4      | 3A2  |      |      | 30.2        | 30.6        | "         | "          | "                | "                | 1.06                     | 0.09                        | ---         | ---                                     | ---                        | ---                                      | ---                     | ---                     | ---                       | 9                         | ---                     | 65                     | 0.9                     | 125                    | 2.7                     | 125                    | 2.7                       |                          |     |
| 5      | 3A3  | 単    |      | 30.6        | 32.4        | 32.4      | "          | 1.16             | 0.85             | "                        | 3.92                        | 0.34        | ---                                     | ---                        | ---                                      | 390                     | "                       | ---                       | ---                       | 12                      | 0.1                    | 60                      | 0.8                    | 136                     | 3.0                    | 157                       | 3.7                      |     |
| 6      | 3A0  |      |      | "           | "           | "         | "          | 1.32             | 1.01             | 18                       | 10                          | "           | 0.32                                    | ---                        | "                                        | "                       | ---                     | 51                        | 0.2                       | 281                     | 1.3                    | 353                     | 2.3                    | 444                     | 3.7                    |                           |                          |     |
| 7      | 3B0  |      |      | "           | "           | 90        | "          | "                | "                | "                        | "                           | ---         | ---                                     | ---                        | "                                        | 4200                    | ---                     | 30                        | 0.1                       | 248                     | 1.2                    | 291                     | 1.7                    | 478                     | 5.5                    |                           |                          |     |
| 8      | 3B1  |      |      | 29.8        | 31.8        | 31.8      | "          | 1.36             | 1.04             | "                        | 4.17                        | 0.45        | ---                                     | ---                        | "                                        | 3500                    | 7.5                     | 29                        | "                         | 190                     | 0.6                    | 450                     | 2.0                    | 660                     | 10.9                   |                           |                          |     |
| 9      | 3B2  | 純    |      | "           | "           | "         | "          | "                | "                | "                        | "                           | "           | 1.56                                    | 0.14                       | ---                                      | "                       | 3800                    | ---                       | 31                        | 0.3                     | 210                    | 4.8                     | 218                    | 5.7                     | 284                    | 11.2                      |                          |     |
| 10     | 3B3  |      |      | "           | "           | "         | "          | 2.37             | 2.05             | "                        | "                           | "           | "                                       | 3.25                       | 0.30                                     | ---                     | "                       | 4800                      | 7.5                       | "                       | 0.3                    | (101)                   | (1.0)                  | 279                     | 3.9                    | 470                       | 48.6                     |     |
| 11     | 5B1  |      |      | 150         | "           | "         | "          | "                | "                | "                        | "                           | "           | "                                       | 0.49                       | 0.06                                     | ---                     | "                       | 3700                      | ---                       | "                       | 0.2                    | (121)                   | (1.2)                  | 290                     | 3.7                    | 494                       | 50.5                     |     |
| 12     | 5B2  |      |      | "           | "           | "         | "          | "                | "                | "                        | "                           | "           | "                                       | 0.89                       | 0.11                                     | ---                     | "                       | ---                       | 28                        | "                       | 130                    | 3.3                     | 80                     | 1.4                     | 133                    | 8.8                       |                          |     |
| 13     | 5B3  | ば    | wich | "           | "           | "         | "          | "                | "                | "                        | "                           | "           | 1.79                                    | 0.17                       | ---                                      | 338                     | 2430                    | ---                       | 13                        | 0.3                     | 40                     | 2.0                     | 44                     | 3.0                     | 74                     | 5.8                       |                          |     |
| 14     | 5B4  |      |      | 90          | 30.1        | 30.9      | 60         | 1.35             | 1.03             | "                        | 1.68                        | 0.12        | ---                                     | ---                        | "                                        | "                       | ---                     | 8                         | 0.4                       | 33                      | 3.9                    | 降伏せず                    | ---                    | 33                      | 3.9                    |                           |                          |     |
| 15     | P-1  |      |      | 150         | "           | "         | "          | 2.35             | 2.03             | "                        | "                           | "           | "                                       | ---                        | ---                                      | "                       | 2500                    | ---                       | 4                         | 0.6                     | 発生せず                   | 5.5                     | 2.8                    | 10                      | 58.9                   |                           |                          |     |
| 16     | P-2  |      |      | 210         | "           | "         | "          | 3.34             | 3.03             | "                        | "                           | "           | "                                       | ---                        | ---                                      | "                       | 2620                    | ---                       | "                         | 0.5                     | 発生せず                   | 13                      | 4.1                    | 21                      | 21.3                   |                           |                          |     |
| 17     | P-8  | り    |      | 300         | 29.8        | 30.2      | "          | 4.89             | 4.57             | "                        | 0.50                        | 0.04        | ---                                     | ---                        | "                                        | 2430                    | ---                     | "                         | "                         | "                       | 31                     | 12.1                    | 20                     | 5.8                     | 31                     | 12.1                      |                          |     |
| 18     | P-9  |      |      | "           | 29.9        | 30.5      | "          | 4.87             | 4.55             | "                        | 0.90                        | 0.07        | ---                                     | ---                        | "                                        | 2850                    | ---                     | 6                         | 0.6                       | 32                      | 6.7                    | 降伏せず                    | ---                    | 32                      | 6.7                    |                           |                          |     |
| 19     | P-10 |      |      | "           | 30.1        | 30.9      | "          | 4.84             | 4.52             | "                        | 1.68                        | 0.12        | ---                                     | ---                        | "                                        | 376                     | 2510                    | 2510                      | 32                        | 160                     | 4.5                    | 120                     | 2.9                    | 227                     | 22.8                   |                           |                          |     |
| 20     | P-11 |      |      | "           | 31.2        | 31.2      | "          | 4.83             | 4.51             | "                        | 2.24                        | 0.19        | ---                                     | ---                        | "                                        | 3670                    | 7.9                     | 30                        | 0.4                       | 125                     | 2.9                    | 105                     | 2.3                    | 221                     | 20.4                   |                           |                          |     |
| 21     | P-12 | り    |      | "           | 29.8        | 31.8      | "          | 2.37             | 2.05             | "                        | 4.17                        | 0.28        | 1.23                                    | 0.10                       | "                                        | "                       | 3490                    | 30.0                      | 23                        | "                       | 185                    | 6.1                     | 130                    | 3.3                     | 218                    | 20.3                      |                          |     |
| 22     | P-13 |      |      | 150         | 29.8        | "         | "          | 2.60             | 2.25             | "                        | 5.18                        | 0.34        | ---                                     | ---                        | "                                        | "                       | ---                     | 28                        | "                         | 100                     | 3.7                    | 104                     | 4.8                    | 135                     | 9.8                    |                           |                          |     |
| 23     | P-14 |      |      | "           | 27.1        | "         | "          | 2.37             | 2.05             | "                        | 4.17                        | 0.28        | 0.90                                    | 0.07                       | ---                                      | ---                     | "                       | 2940                      | 30.0                      | 35                      | 0.5                    | 158                     | 4.4                    | 125                     | 3.0                    | 212                       | 20.1                     |     |
| 24     | P-15 |      |      | "           | 29.8        | "         | "          | "                | "                | "                        | "                           | "           | "                                       | "                          | "                                        | "                       | "                       | ---                       | 18                        | ---                     | 40                     | ---                     | ---                    | ---                     | 75                     | 6.6                       |                          |     |
| 25     | P-16 | RC   | RC   | "           | "           | "         | "          | "                | "                | 16                       | 22                          | 0.92        | 0.09                                    | ---                        | ---                                      | 359                     | 3700                    | ---                       | 10                        | ---                     | 20                     | ---                     | 90                     | ---                     | 90                     | 8.8                       |                          |     |
| 26     | P-17 |      |      | "           | "           | "         | "          | "                | "                | "                        | "                           | "           | 1.54                                    | 0.16                       | ---                                      | "                       | "                       | ---                       | 10                        | ---                     | 30                     | ---                     | 100                    | ---                     | 105                    | 6.7                       |                          |     |
| 27     | RC1  |      |      | 90          | 31.0        | 36.0      | 30         | 1.14             | 0.84             | 16                       | 22                          | 0.92        | 0.09                                    | ---                        | ---                                      | "                       | ---                     | 338                       | 3660                      | ---                     | 20                     | 0.2                     | 145                    | 3.6                     | 130                    | 2.4                       | 148                      | 5.6 |
| 28     | RC2  |      |      | "           | "           | "         | "          | "                | "                | "                        | "                           | "           | 2.16                                    | 0.22                       | ---                                      | ---                     | "                       | ---                       | 15                        | 0.3                     | 40                     | 1.4                     | 降伏せず                   | ---                     | 65                     | 5.2                       |                          |     |
| 29     | RC3  | 単    |      | "           | "           | "         | "          | "                | "                | "                        | "                           | "           | 0.36                                    | 0.04                       | ---                                      | 366                     | "                       | 4510                      | 8.9                       | 18                      | 0.4                    | "                       | "                      | 73                      | 3.6                    | 102                       | 41.9                     |     |
| 30     | C-13 |      |      | 150         | "           | "         | "          | 1.35             | 1.18             | 18                       | 10                          | 1.54        | 0.17                                    | ---                        | ---                                      | "                       | ---                     | 10                        | "                         | "                       | 3.6                    | 降伏せず                    | ---                    | 40                      | 3.6                    |                           |                          |     |
| 31     | C-14 |      |      | "           | "           | "         | "          | 2.35             | 2.18             | "                        | "                           | "           | "                                       | ---                        | ---                                      | "                       | ---                     | 6                         | 0.9                       | 33                      | 10.0                   | 28                      | 8.1                    | 33                      | 10.0                   |                           |                          |     |
| 32     | C-15 |      |      | "           | "           | "         | "          | "                | "                | "                        | "                           | "           | "                                       | "                          | ---                                      | ---                     | "                       | ---                       | "                         | "                       | "                      | "                       | "                      | "                       | "                      | "                         |                          |     |
| 33     | C-16 | 純    |      | 210         | "           | "         | "          | 3.35             | 3.18             | "                        | "                           | "           | "                                       | ---                        | ---                                      | "                       | ---                     | "                         | "                         | "                       | "                      | "                       | "                      | "                       | "                      |                           |                          |     |
| 34     | C-17 |      |      | 300         | "           | "         | "          | 4.85             | 4.68             | "                        | "                           | "           | "                                       | ---                        | ---                                      | "                       | ---                     | "                         | "                         | "                       | "                      | "                       | "                      | "                       | "                      |                           |                          |     |

(注) \* ウェブパネルの便宜上のピッチ。

\*\* 水平鉄筋のせん断補強効果を無視。

\*\*\* 斜めひびわれ発生時期が必ずしも明確でなかった場合は、( ) で示した。

做することができた。

図-3には、No.15サンドイッチ試験体とその比較用であるNo.30RC試験体の荷重-たわみ ( $P-\delta$ ) 曲線の例を示したが、両試験体のたわみ特性も大略同等と見做すことができた。

なお、図-3にはせん断補強の無いサンドイッチ試験体 (No.8, No.11) とせん断補強の有るサンドイッチ試験体 (No.10, No.14) の  $P-\delta$  曲線も示したが、両者の比較結果から、せん断補強をすることによりサンドイッチ部材の耐荷性能と変形性能を大幅に改善できることが確認された。

### 3.3 終局耐力に及ぼす各構造パラメータの影響

#### サンドイッチ試験体の終局耐力

の計算値の算定に当たっては、RC構造に関する曲げ耐力算定式 (圧縮鋼材無視、圧縮鋼材考慮、引張鋼材のひずみ硬化考慮の3種類)、及びせん断耐力算定式 (二羽式<sup>5</sup>、岡村らの式<sup>6</sup>、荒川式<sup>7</sup>、Zsutty式<sup>8</sup>、ACI式<sup>9</sup>) を準用した。

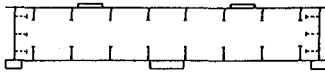
実験値と計算値の比較結果を表-2に示した。各構造パラメータの影響を検討した結果を以下に示す。

#### (A) せん断スパン比 $a/d$ の影響

図-4に、せん断補強の無いサンドイッチ部材 ( $pf_{sy}/f'_c = 0.12$ ) とRC部材 ( $pf_{sy}/f'_c = 0.17$ ) における  $a/d$  の効果を示したが、両部材における  $a/d$  の効果はほぼ同等であった。

図-4中には、RC曲げ耐力算定式 (圧縮鋼材考慮) 及びせん断耐力算定式 (二羽式、岡村らの式、荒川式、Zsutty式) による計算値も併記したが、斜めひびわれの発生が最終破壊に先行した  $a/d \leq 2.4$  の試験体では二羽式により、また斜めひびわれの発生と同時に最終破壊した  $a/d \geq 3.3$  の試験体では曲げ耐力算定式、岡村らの式、荒川式、及びZsutty式により、終局耐力の実験値を比較的精度良く表現できることが示された。なお、 $a/d$  が斜めひびわれの傾きを示すものとするディープビーム ( $a/d < 3$ ) を対象とした二羽式の準用に当たっては、斜めひび

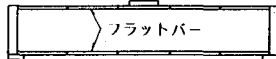
No.3, No.4, No.5 (No.1, No.2, No.6, No.7 も同タイプ。ただしNo.6, No.7は単純梁。)



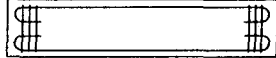
No.27, No.28, No.29



No.11, No.16 (No.17~No.21も同タイプ。)



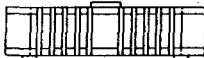
No.31 (No.30~No.34も同タイプ。ただしNo.32はスタップあり。)



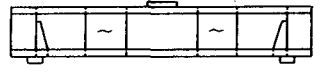
No.8, No.15



No.9, No.10 (No.12, No.13, No.14も同タイプ。)



No.22



No.23



No.24



No.25



No.26



図-1 試験体の形状

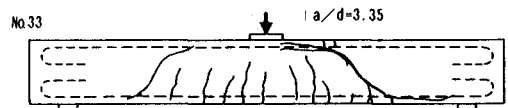
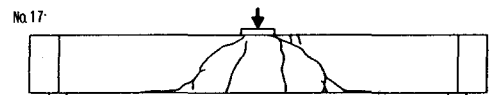
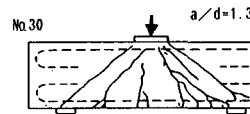
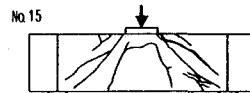
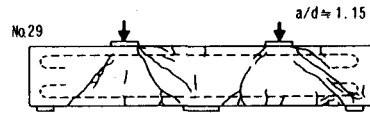


図-2 最終ひびわれ状況

表-2 終局耐力の実験値と計算値の比較

| 試験体 No. | 最大荷重 $P_{max}$ | 曲 げ                      |                          |                     | せん 断                    |                         |                                  |                                   |                                   |                                |
|---------|----------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
|         |                | 圧縮鋼材<br>無視<br>$P_{cal1}$ | 圧縮鋼材<br>考慮<br>$P_{cal2}$ | ひずみ硬化<br>$P_{cal3}$ | 二 羽                     |                         | 岡 村 ら<br>$(a/d)_1$<br>$P_{cal6}$ | 荒川(耐力)<br>$(a/d)_1$<br>$P_{cal7}$ | Zsutty<br>$(a/d)_1$<br>$P_{cal8}$ | ACI<br>$(a/d)_1$<br>$P_{cal9}$ |
|         |                |                          |                          |                     | $(a/d)_1$<br>$P_{cal4}$ | $(a/d)_2$<br>$P_{cal5}$ |                                  |                                   |                                   |                                |
| 1       | 147            | 150                      | 172                      | ----                | 111                     | 171                     | ----                             | 67                                | ----                              | 48                             |
| 2       | 117            | 99                       | 112                      | ----                | 92                      | 148                     | ----                             | 56                                | ----                              | 51                             |
| 3       | 98             | 90                       | 103                      | ----                | 71                      | 115                     | ----                             | 46                                | ----                              | 44                             |
| 4       | 62             | 43                       | 46                       | 69                  | 61                      | 100                     | ----                             | 41                                | ----                              | 38                             |
| 5       | 125            | 144                      | 186                      | ----                | 91                      | 147                     | ----                             | 55                                | ----                              | 51                             |
| 6       | 157            | 132                      | 166                      | ----                | 111                     | 151                     | ----                             | 64                                | ----                              | 58                             |
| 7       | 444            | 395                      | 499                      | ----                | 333                     | 453                     | ----                             | 192                               | ----                              | 174                            |
| 8       | 478            | 469                      | 668                      | 807                 | 325                     | 445                     | ----                             | 185                               | ----                              | 168                            |
| 9       | 660            | "                        | "                        | "                   | * "                     | * "                     | ----                             | 279                               | ----                              | 258 (90)                       |
| 10      | 784            | "                        | "                        | "                   | * "                     | * "                     | ----                             | 322                               | ----                              | 280 (112)                      |
| 11      | 284            | 269                      | 384                      | 461                 | 140                     | 178                     | ----                             | 110                               | 110                               | 92                             |
| 12      | 384            | "                        | "                        | "                   | * "                     | * "                     | ----                             | 172                               | * "                               | 146 (54)                       |
| 13      | 470            | "                        | "                        | "                   | * "                     | * "                     | ----                             | 193                               | * "                               | 187 (95)                       |
| 14      | 494            | "                        | "                        | "                   | * "                     | * "                     | ----                             | 213                               | * "                               | 204 (112)                      |
| 15      | 133            | 101                      | 111                      | 155                 | 151                     | 207                     | ----                             | 93                                | ----                              | 89                             |
| 16      | 74             | 58                       | 64                       | 89                  | 66                      | 83                      | ----                             | 55                                | 53                                | 44                             |
| 17      | 33             | 41                       | 45                       | 62                  | ----                    | ----                    | 46                               | 39                                | 44                                | 40                             |
| 18      | 10             | 9                        | 9                        | 13                  | ----                    | ----                    | 26                               | 20                                | 26                                | 34                             |
| 19      | 21             | 17                       | 18                       | 24                  | ----                    | ----                    | 32                               | 23                                | 31                                | 35                             |
| 20      | 31             | 28                       | 31                       | 43                  | ----                    | ----                    | 40                               | 27                                | 39                                | 38                             |
| 21      | 32             | 42                       | 48                       | 69                  | ----                    | ----                    | 45                               | 29                                | 43                                | 39                             |
| 22      | 227            | 134                      | 116                      | 247                 | * 91                    | * 116                   | ----                             | 117                               | * 72                              | 111 (52)                       |
| 23      | 221            | "                        | "                        | "                   | * "                     | * "                     | ----                             | 116                               | * "                               | 108 (47)                       |
| 24      | 135            | "                        | "                        | "                   | * 80                    | * 102                   | ----                             | * 63                              | * 65                              | * 54 (--)                      |
| 25      | 218            | "                        | "                        | "                   | * 91                    | * 116                   | ----                             | 109                               | * 72                              | 93 (32)                        |
| 26      | 212            | "                        | "                        | "                   | * "                     | * "                     | ----                             | "                                 | * "                               | " (")                          |
| 27      | 75             | 62                       | 62                       | ----                | 53                      | 86                      | ----                             | 35                                | ----                              | 33                             |
| 28      | 90             | 99                       | 98                       | ----                | 61                      | 98                      | ----                             | 40                                | ----                              | 38                             |
| 29      | 105            | 110                      | 112                      | ----                | 76                      | 122                     | ----                             | 49                                | ----                              | 48                             |
| 30      | 148            | 135                      | 136                      | ----                | 147                     | 201                     | ----                             | 90                                | ----                              | 86                             |
| 31      | 65             | 77                       | 79                       | ----                | 64                      | 81                      | ----                             | 54                                | 51                                | 43                             |
| 32      | 102            | 78                       | 79                       | 113                 | * 67                    | * 85                    | ----                             | 91                                | * 52                              | 70 (26)                        |
| 33      | 40             | 55                       | 55                       | ----                | ----                    | ----                    | 45                               | 40                                | 44                                | 40                             |
| 34      | 33             | 38                       | 39                       | ----                | ----                    | ----                    | 40                               | 28                                | 39                                | 39                             |

注)・ $P_{cal9}$ のカッコ内の数字はVsに対応する値。

・\*はVcのみに対応する値。

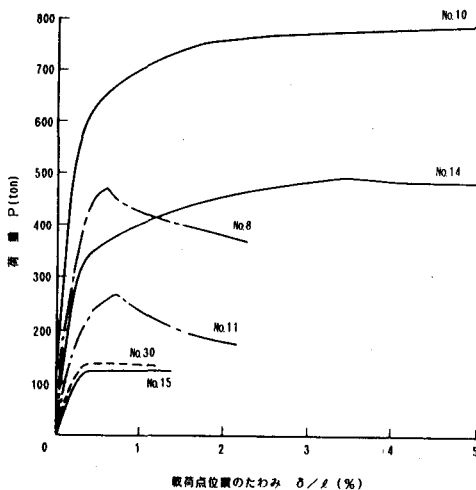


図-3 P-δの関係

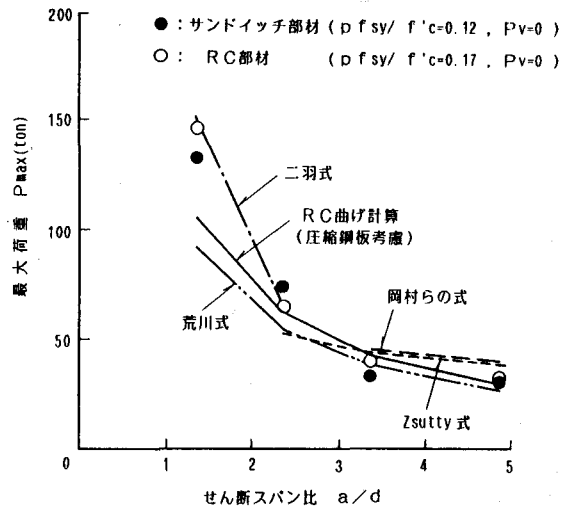


図-4 P-a/dの関係

われが載荷板と支点板の内端を結ぶように入ったことを考慮し、せん断スパンを便宜的に載荷板と支点板の内側水平距離とした検討（表-1中の(a/d)2に相当）も行った。検討の結果、鋼材指数が0.3以上の場合には、(a/d)2を用いた計算値の方が、通常の(a/d)1を用いたものより実験値に良く近似する傾向が認められた。

### (B) 鋼材比 $p$ の影響

鋼材比  $p$  の代りに鋼材指数  $pf_{sy}/f'_c$  を用いて、せん断補強の無いサンドイッチ部材 ( $a/d = 1.17, 4.85$  の2ケース) とRC部材 ( $a/d = 1.14, 4.85$  の2ケース) の終局耐力に及ぼす鋼材比の影響を調べた。結果は図-5に示したとおりであり、両部材における鋼材量の影響はほぼ同等と認められた。

図-5中には、RC曲げ耐力算定式（圧縮鋼材考慮）及びせん断耐力算定式（二羽式、荒川式）による計算値も併記したが、 $a/d = 1.15$  では二羽式により定性的に、また  $a/d = 4.85$  では曲げ耐力算定式、荒川式により比較的精度良く、実験値を表現できることが示された。

前述の各種せん断耐力式では、RC部材の終局耐力が  $p^n$  ( $n \leq 1$ ) の関数として表わされており、これは、 $p$  の増加につれて、①中立軸が移動しコンクリートの圧縮部領域が深くなって、コンクリートの抵抗せん断力が増加すること、②RC部材の場合には、さらに鋼材によるdowel効果も増加することにより、部材のせん断抵抗力は増大すること、などに対応している。また曲げ耐力算定式では、RC部材の終局耐力が  $pf_{sy}$  の2次関数として表わされており、鋼材降伏後に破壊する場合の鋼材降伏強度  $f_{sy}$  の影響も考慮されている。前述の結果は、 $a/d = 1.15$  で  $pf_{sy}/f'_c > 0.25$  の場合、試験体が最終的にせん断破壊したことを示している。

### (C) せん断補強鋼材量の影響

せん断補強鋼材比  $p_v$  の代りにせん断補強鋼材指数  $p_v f_{vy}/f'_c$  を用いて、せん断補強を行ったサンドイッチ部材 ( $a/d = 1.36, 2.37$ 、 $pf_{sy}/f'_c = 0.43$  の2ケース) の終局強度に及ぼすせん断鋼材量の影響を調べた。結果は図-6に示したとおりであり、同図には、RC部材 ( $a/d = 2.35, pf_{sy}/f'_c = 0.17$ ) に対する実験結果も参考のためにのせた。

図-6中には、ACI式によるせん断補強効果算定結果 ( $V_s$  に対応する値) も併記したが、 $a/d = 1.36$  のサンドイッチ試験体では、支点板間純スパン/有効高さ比  $\ell_n/d < 5$  ( $a/d < 2.5$ , ディープビーム) 用の  $V_s$  算定式はせん断補強効果をやや小さめに、 $\ell_n/d \geq 5$  ( $a/d \geq 2.5$ ) 用の  $V_s$  算定式はやや大きめに評価した。また  $a/d = 2.37$  のサンドイッチ試験体では、 $\ell_n/d < 5$  用の  $V_s$  算定式は実測のせん断補強効果よりやや小さめの値を与え、 $\ell_n/d \geq 5$  用の  $V_s$  算定式はせん断補強効果を精度良く評価した。以上より、 $a/d = 1.36 \sim 2.37$ 、 $pf_{sy}/f'_c = 0.43$  のサンドイッチ試験体において、 $\ell_n/d < 5$  ( $a/d < 2.5$ ) 用の  $V_s$  算定式を用いた場合にはやや低めに、 $\ell_n/d < 5$  用及び  $\ell_n/d \geq 5$  用の両  $V_s$  算定式によって求めた計

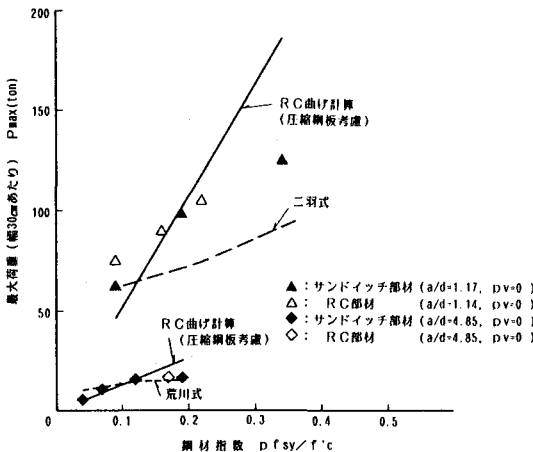


図-5  $P - pf_{sy}/f'_c$  の関係

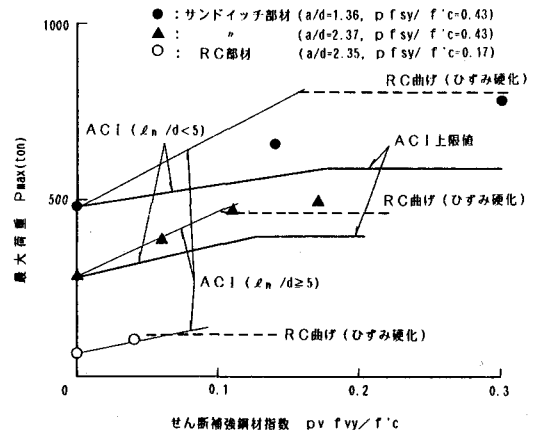


図-6  $P - p_v f_{vy}/f'_c$  の関係

算値の平均値を用いた場合には精度良く、ACI式でせん断補強効果を評価できることが示された。

また、図-6から、 $a/d = 2.37$ 、 $\rho f_{sy}/f'_c = 0.43$  及び  $\rho_v f_{vy}/f'_c = 0 \sim 0.17$  のサンドイッチ試験体に対するせん断補強効果には上限があることが示唆され、その上限値は、ACI式で規定されている値よりは大きく、ひすみ硬化を考慮した曲げ耐力によって決定されるものであると考えられた。

一方、No.22~No.26 のサンドイッチ試験体を用いて、せん断補強方法の違いがせん断補強効果へ及ぼす影響を調べた結果、せん断補強鋼材量をほぼ同一とし且つ上下鋼板を適切に結合したNo.22, No.23, No.25, No.26の各試験体においては、ほぼ同等なせん断補強効果を期待できることが確認された。従って、実構造物の設計においては、鋼材の製作性や据付方法、あるいはコンクリートの打設性等の施工上の問題を考慮して、最適な部材内部のせん断補強構造を選定すれば良いことが分かった。

#### (D) その他の検討

最終破壊時に圧縮コンクリートが剥落することによって生じる断面欠損の量が、サンドイッチ試験体の終局強度に及ぼす影響を調べるために、No.6とNo.7を用いて、梁試験体の部材幅を変えた実験を行ったが、両試験体とも引張鋼板が降伏した後に破壊したこともあり、終局強度に及ぼす部材幅の影響は見られなかった。

また、今回の実験においては、2スパン連続梁と単純梁の2種類の梁試験体を用いて実験を行ったが、破壊モードや終局耐力に関しては、両者間に明確な差は認められなかった。

### 3. 4 サンドイッチ部材の破壊機構

RC部材の破壊機構に関しては、一般に次のように言われている：i)  $a/d \leq 1$  では、斜めひびわれ発生後タイアーチ的な耐荷機構に変化し、鋼材が最終破壊し、終局耐力は曲げ耐力と同等となる、ii)  $1 \leq a/d \leq 2.5$  では、斜めひびわれ発生後、圧縮ストラットまたはアーチリブを形成するコンクリートの載荷点側の圧壊（せん断圧縮破壊）あるいは支付近での引張鉄筋の定着破壊（せん断引張破壊）によって最終的に破壊し、終局耐力の曲げ耐力に対する比率は  $a/d$  の増加に伴い低下する、iii)  $2.5 \leq a/d \leq 5$  では、斜めひびわれの発生と同時に鉄筋に沿ったひびわれが発生して部材が破壊（斜め引張破壊）し、終局耐力の曲げ耐力に対する比率は  $a/d$  の増加に伴って増加する、iv)  $a/d \geq 5$  の範囲では、曲げ破壊する。また、 $a/d$  に基づく破壊機構の差は鉄筋比  $\rho$  にも依存し、 $\rho$  が小さくなるにつれて終局耐力が曲げ耐力で決定される領域が拡大する。

上記の特性は、サンドイッチ部材でも確認されており、ひびわれ分散度や鋼材のずれ特性が若干異なるものの、サンドイッチ部材は、複鉄筋を配したRC部材とマクロ的には等価に取扱うことができる。

一方、鋼とコンクリートの合成が十分なサンドイッチ部材の場合、同じ有効高さを有する複鉄筋を配したRC部材に比して、圧縮合力の作用点が圧縮縁側に近づくためモーメントの\_armが長くなり、曲げ耐力は相対的に大きくなる。

#### 4. むすび

鋼・コンクリート合成サンドイッチ構造に関する強度実験結果に基づき、同部材の終局耐力に及ぼすせん断スパン比、鋼材指数、及びせん断補強量の影響を明らかにした。

#### 参考文献

- 1) 栖原, 他, 日本造船学会論文集, 第 141号, 昭和52年 6月, pp.205-216 .
- 2) 服部, 他, 日本造船学会論文集, 第 157号, 昭和60年 9月, pp.369-382 .
- 3) 秋山, 他, 鹿島建設技術研究所年報, Vol. 34 , 昭和61年 6月, pp.25-32 .
- 4) 秋山, 他, 第 8回コンクリート工学年次講演会論文集; 昭和61年 6月, pp.605-608 .
- 5) 二羽, 第 2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究コロキウム論文集, 1983年10月, pp.119-128 .
- 6) Okamura, H., Higai, T., Proceedings of JSCE, No.300, August, 1980, pp.131-141 .
- 7) 荒川, コンクリート・ジャーナル, Vol.8, No.7, July, 1970, pp.11-20 .
- 8) Zsutty, T. , ACI Journal, Feb., 1971 , pp.138-143 .
- 9) ACI 318 Committee , Building Code Requirements for Reinforced Concrete, 1983, pp.43-54 .