

## [175] 地震力を受ける RC 耐震壁の開口補強に関する解析的研究

正会員 野口 博 (千葉大学工学部)

正会員 ○鶴田 正一 (RIA建築総合研究所)

## 1. はじめに

開口がある鉄筋コンクリート (RC) 造耐震壁は、開口が小さければ無開口の耐震壁と同様に扱える。現行の日本建築学会RC構造計算規準 (RC規準) では、開口の存在による耐力の低下に対して開口の大きさによる低減率  $r$  を用いることを認めている。また開口周囲の応力集中に対しては、その斜め引張力及び縁応力に応じて開口周囲に縦、横及び斜め筋を配筋することになっている。しかしこのRC規準は<sup>1)</sup>弾性論に基づいており、せん断ひびわれ発生後の塑性領域での開口補強筋の効果についての実験、解析は数少なく、その妥当性は明らかでない。近年、原子力発電所等で従来にない厳しい安全性を要求される構造物もあり、有開口耐震壁の許容耐力算定式及び開口周囲の補強に関する設計法の確立が必要となってきている。そこで本研究では、開口周囲の補強方法が異なる有開口耐震壁を含む耐震壁について非線形有限要素解析を行い、学会RC規準の妥当性を問うと共に、開口の有無による耐力、及び破壊性状の相違及び開口周囲の補強の有無及びその量がどのような性状の相違をもたらすかについて検討することを目的とする。

## 2. 解析方法

解析方法は参考文献に述べてあるので省略した。<sup>4)</sup>

## 3. 解析モデル

解析対象には、楠木、藤本らが行った有開口耐震壁に関する実験<sup>1)</sup>のうち8体を選んだ。試験体名称をM-II-15-30-9を例として説明する。M-II (シリーズ) -15 (開口幅15cm) -30 (開口高30cm) -9 (開口隅角部斜め補強筋1-9φ) 試験体形状及び代表試験体の配筋図を図-1に、試験体概要を表-1に示す。M-Iシリーズでは、壁筋比  $P_w=1.4\%$  で開口の有無による耐力及び変形の違いを観察する。M-IIシリーズでは、開口隅角部の斜め補強筋のみが異なり、その効果を検討する。M-IIIシリーズではM-IIシリーズの壁筋を半減した場合について検討する。

コンクリートの要素分割は、無開口耐震壁と有開口耐震壁の2種類を用意した。要素分割図を図-2に示す。解析のひびわれパターンは実験での最終ひびわれ図を参考にして定めたが、試験体によって大きな差がなかったので共通とした。表-2に材料定数を示す。ボンドリンクの材料定数は既往の解析的研究を参考に表-3で示す位置でボンドリンクの材料定数を変化させた。開口周囲の斜め補強筋には折れ曲がり部分があるが、この部分の付着は、鉄筋の直線部分に比べるとコンクリートによってやすべりが拘束されると考えられるので表-3に示す値<sup>5)</sup>に定めた。

## 4. 破壊経過

表-4に諸現象発生荷重を示す。また図-3に無開口耐震壁、及び有開口耐震壁の変形図を示す。

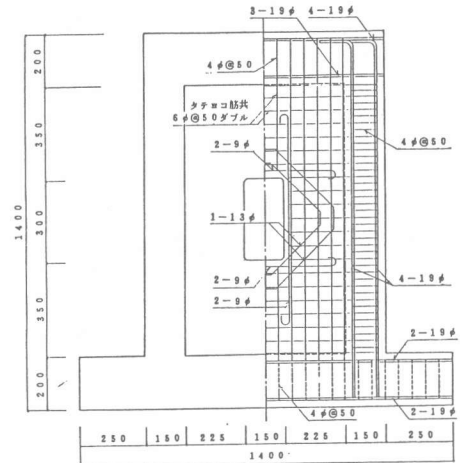


図-1 試験体形状及びM-II-15-30-2.13配筋図

表-1 試験体概要

| 試験体名             | 開口の大きさ | 壁筋比 (%) | 開口補強<br>縦・横筋 | 開口補強<br>斜め筋 |
|------------------|--------|---------|--------------|-------------|
| M-I-0-0-0        | —      | 1.4     | —            | —           |
| M-I-15-30-0      | 15×30  | 1.4     | 2-6φ         | —           |
| M-II-15-30-9     | 15×30  | 1.4     | 2-9φ         | 1-9φ        |
| M-II-15-30-13    | 15×30  | 1.4     | 2-9φ         | 1-13φ       |
| M-II-15-30-2.13  | 15×30  | 1.4     | 2-9φ         | 2-13φ       |
| M-III-0-0-0      | —      | 0.7     | —            | —           |
| M-III-15-30-9    | 15×30  | 0.7     | 2-9φ         | 1-9φ        |
| M-III-15-30-2.13 | 15×30  | 0.7     | 2-9φ         | 2-13φ       |

試験体名称: M-(シリーズ)-(開口幅)-(開口高)-(開口隅角部斜め筋)

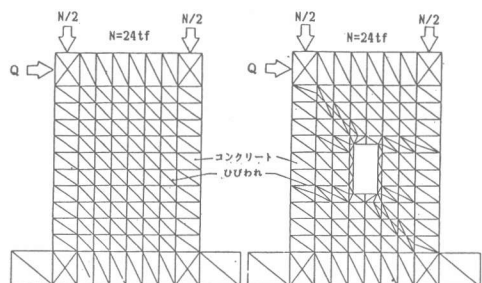


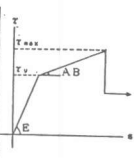
図-2 要素分割図

表-2 材料定数

| コンクリート           |                              |                              |                              |                        |
|------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------|
| 試験体名             | $E_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | $F_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | $F_t$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | $\varepsilon_{cu}$ (%) |
| M-I-0-0-0        | 2.11                         | 2.48                         | 24.2                         | 0.201                  |
| M-I-15-30-0      | 2.07                         | 2.55                         | 25.0                         | 0.196                  |
| M-II-15-30-9     | 2.32                         | 2.63                         | 16.8                         | 0.203                  |
| M-II-15-30-13    | 1.86                         | 2.10                         | 21.3                         | 0.193                  |
| M-II-15-30-2.13  | 2.21                         | 2.53                         | 22.5                         | 0.201                  |
| M-III-0-0-0      | 2.39                         | 2.81                         | 21.6                         | 0.206                  |
| M-III-15-30-9    | 2.14                         | 2.22                         | 22.0                         | 0.195                  |
| M-III-15-30-2.13 | 2.31                         | 2.65                         | 19.7                         | 0.203                  |

表-3 ボンドリンクの材料定数

| E      | AB     | $\tau_u$ | $\tau_{max}$ | ボンドリンクの位置        |
|--------|--------|----------|--------------|------------------|
| 8000   | 80     | 24.6     | 49.2         | 壁面内のひびわれでない部分    |
| 8000   | 80     | 12.3     | 24.6         | 壁面内のひびわれ面        |
| 100000 | 100000 | 9999     | 9999         | 基礎・はり部の定置部分      |
| 25000  | 25000  | 9999     | 9999         | 開口補強筋における折れ曲がり部分 |
| 8000   | 80     | 17.2     | 34.4         | ひびわれ面に近い位置       |



無開口耐震壁では、引張側柱脚に曲げひびわれが入る。実験値との発生荷重に大きな差があるが、これは実験での曲げひびわれ発生位置が柱中央であるためである。その位置での解析値と実験値はよい対応を示す。実験でも柱脚部に先に曲げひびわれが生じていたことも考えられる。その後、せん断変形  $R = 4 \times 10^{-4}$  程度で壁板にせん断ひびわれが入る。発生位置は実験、解析とも引張柱に近い位置であった。せん断力の増加によってせん断ひびわれの発生領域が壁板の引張柱側の柱脚に近い位置から右上に向かって、つまり圧縮柱側の柱頭に向かって広がっていく。せん断力がある程度の大きさに達すると、数本あるせん断ひびわれの幅は、ほとんど一様になる。コンクリートの圧壊は、最大耐力近傍で起こるが、発生位置は実験では圧縮柱柱脚であったのに対し、解析では壁板の対角線上であった。これらの性状は、同じ試験体を解析した瀬谷の報告<sup>2)</sup>と類似している。

有開口耐震壁では、 $R = 2 \times 10^{-4}$  程度で壁板の開口隅角部にせん断ひびわれが入る。20tf付近までは、開口隅角部に発生し進展したひびわれが顕著であるが、その後は開口横のせん断ひびわれが急激に進展してくる。圧壊の位置は開口隅角部であった。以上の性状は荷重に多少の差はあるものの、開口補強筋の量によらず、ほぼ同様であった。

#### 5. 荷重-変形関係

図-4に荷重-変形曲線を示す。M-Iシリーズは実験の荷重-変形曲線の包絡線も併せて示した。

初期剛性は全試験体とも解析値が実験値をやや上回っている。曲線全体を見ると特に目立った剛性低下が起きることなく、徐々に剛性が低下していく。今回対象とした試験体は、柱が比較的剛 ( $P_g = 6.05\%$ ) であるため、多少耐震壁に破壊が起こって

鉄筋

| 種別                                | 19φ  | 13φ  | 9φ   | 6φ   | 4φ   |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|
| $E_s$ (kgf/cm <sup>2</sup> )      | 2.05 | 2.07 | 2.23 | 2.08 | 1.63 |
| $\sigma_y$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | 3334 | 3017 | 3429 | 3108 | 3760 |

表-4 諸現象発生荷重

| 試験体名             | せん断ひびわれ     | 曲げひびわれ      | コンクリート圧壊    |
|------------------|-------------|-------------|-------------|
| M-I-0-0-0        | 15.8 (21.5) | 11.0 (21.5) | 47.5 (53.3) |
| M-I-15-30-0      | 5.0 (4.6)   | 9.0 (19.0)  | 34.0 (31.5) |
| M-II-15-30-9     | 4.1 (4.5)   | 7.0 (12.1)  | 30.0 (38.5) |
| M-II-15-30-13    | 4.5 (3.6)   | 7.0 (4.9)   | 30.0 (34.5) |
| M-II-15-30-2.13  | 5.2 (4.7)   | 11.0 (9.5)  | 32.0 (38.8) |
| M-III-0-0-0      | 13.9 (20.3) | 12.0 (25.8) | 44.0 (41.5) |
| M-III-15-30-9    | 5.0 (3.9)   | 9.0 (18.6)  | 28.0 (32.3) |
| M-III-15-30-2.13 | 4.4 (3.9)   | 9.0 (15.1)  | 24.0 (34.1) |

( ) 内は実験値 単位: tf

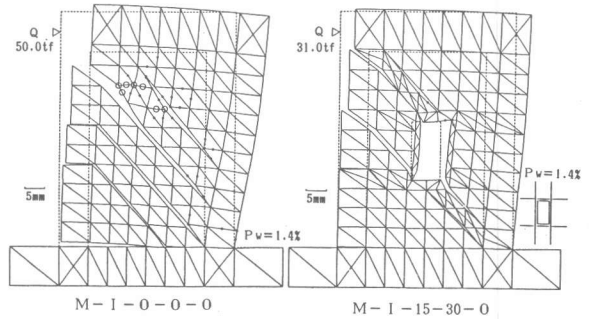


図-3 変形図

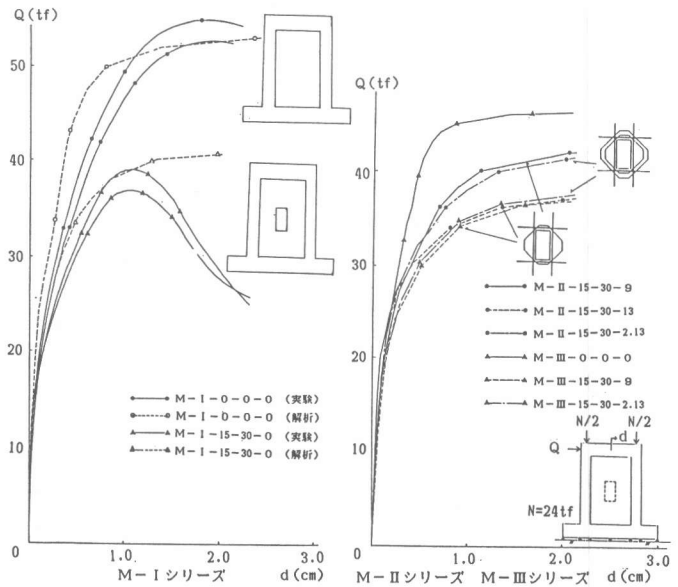


図-4 荷重-変形曲線

も全体の変形には表れてこないためであろう。

荷重-変形曲線の比較を行うと壁筋比が同じである試験体では開口の有無により、耐力は無開口壁の方が高く、斜め筋がない有開口試験体(M-I-15-30-0)の耐力は無開口試験体と比べ  $40\text{tf}/53\text{tf} = 0.755$  倍であり、開口低減率  $R = 0.776$  と一致しており、RC 規準との対応をみた。

## 6. 応力分布

### a. 主応力分布

図-5に無開口耐震壁、及び有開口耐震壁の主応力分布を示す。無開口耐震壁の場合、低荷重であれば主応力分布は壁面に一様な分布となり、主応力方向は水平方向に対し $45^\circ$ をなす角度である。せん断力の増加に伴い圧縮側柱頭とその対角線上にピークを持つ傾向にある。この領域に圧壊が集中して発生する。一方、有開口耐震壁では開口周囲で応力が乱れ、開口隅角部で引張応力及び圧縮応力が集中し、この部分での局所的な破壊を裏付けている。

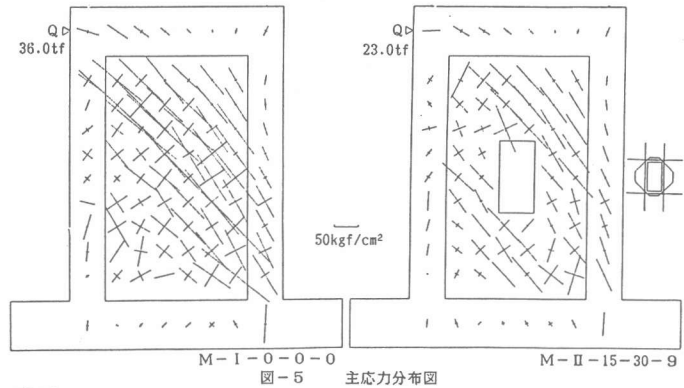


図-5 主応力分布図

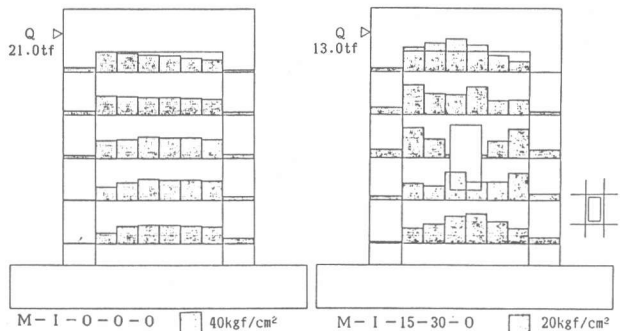


図-6 せん断応力分布図

### b. せん断応力分布

図-6に無開口耐震壁、及び有開口耐震壁のせん断ひびわれ発生直後、せん断ひびわれが進展した時の水平断面でのせん断応力分布を示す。無開口耐震壁では、低荷重時において壁板の上部の領域で圧縮柱に近い位置でのせん断応力が大きく、引張柱側では小さい。壁板の中央部より下の領域になると、ほぼ一様な分布をなす。しかし、せん断力が増すと、加力側柱上部とその対角線上でのせん断応力が顕著となってくる。有開口耐震壁では、開口隅角部でせん断応力が増大することが確認できた。一方開口の横の領域での分布状況は、開口に近い領域では小さく、開口から離れた領域で増大していることがわかる。

## 7. 開口隅角部の応力状態とRC 規準との対応

図-7は開口隅角部のコンクリートの応力状態を有開口壁(M-II-15-30-13)について示したものである。また、同位置、同荷重における無開口壁の応力も示した。

無開口壁の斜め引張応力度は、RC 規準式による計算値では約  $11.7\text{kgf/cm}^2$  となるが、軸力の影響で解析値は  $5\sim 8\text{kgf/cm}^2$  と低い値であった。有開口壁の応力は開口に近い部分で応力集中が著しく、開口隅角部では無開口壁の応力の約 5.5倍に至る。図-7に示す開口を設けたことにより失われる斜め引張力の計算値  $710\text{kgf}$  は、開口隅角部に生じる付加斜張力約  $860\text{kgf}$  とほぼ対応し、ともに RC 規準式による計算値  $1480\text{kgf}$  の半分程度であった。

図-8はせん断力と開口隅角部斜め筋の荷重-ひずみ曲線に RC 規準で斜め筋が負担する力を、2種類の鉄筋の断面積 ( $9\phi$ 、 $13\phi$ ) についてひずみで表し併せて示した。 $9\phi$ 、 $13\phi$  とともにせん

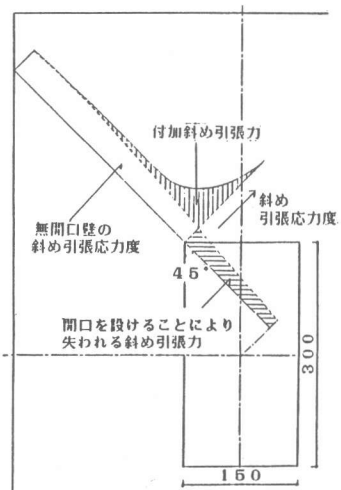


図-7 開口隅角部の斜め引張力

断ひびわれ発生以前は、コンクリートも斜張力を負担しているためひずみは規準値以下である。せん断ひびわれ発生後の解析値はRC規準値の傾きにほぼ一致しているが、解析値は軸力の影響でRC規準値より小さい。せん断力をさらに増すと両者の値は近づいてくる。

#### 8. 開口隅角部斜め補強筋の効果について

図-9は、壁筋比 $P_w=1.4\%$  (M-I, M-IIシリーズ) 及び $P_w=0.7\%$  (M-IIIシリーズ) の開口を有する試験体について、開口隅角部斜め補強筋量とせん断ひびわれ荷重の関係を示したものである。 $P_w=1.4\%$ ,  $P_w=0.7\%$ とも開口補強によらず $\tau_{cr}/F_c$ の値はほぼ一定であり、開口隅角部の斜め補強筋はせん断ひびわれ発生荷重に影響を与えないことが分かる。このことは既往の研究(例えば参考文献3))で指摘されている。また $\tau_{cr}/F_c$ は壁筋量によらないことも分かる。

図-10は、図-9と同様なことを最大耐力について示したものである。この関係からせん断ひびわれ発生荷重同様に、耐力は開口隅角部の斜め筋の量に関係しないことがわかる。既往の研究では、開口補強による差が最大耐力に影響することを指摘しているが、この試験体では開口周囲の補強のディテールが同じようであったため、ほとんど開口周囲の補強による差が出なかったと思われる。

図-11は、開口隅角部でのひびわれ幅を壁筋比別に比較している。壁筋比 $P_w=1.4\%$ では、同荷重でのひびわれ幅の大きさは大きい順に開口隅角部の斜め補強筋の少ない方からの順と一致している。 $P_w=0.7\%$ でも同様なことが言える。以上から、開口隅角部の斜め補強筋は、開口隅角部に発生したひびわれの進展を防止する効果をもつことがわかり、開口形状維持という重要な役割を果たしている。

#### 9. まとめ

開口隅角部斜め引張力は今回の荷重方法では軸力の影響で解析値がRC規準値より低めになった。また有開口耐震壁で開口周囲のみに限定して鉄筋補強を行ってもせん断ひびわれ強度及び最大耐力の上昇は期待できないこと、開口隅角部の斜め補強筋は、ひびわれの進展防止の役割を果たしていることがわかった。

##### 参考文献

- 1) 橋本、藤本、小池、渡辺 「有開口鉄筋コンクリート耐震壁の変形と耐力について」 学会論報 293号 昭和55年
- 2) 瀬谷、松井 「開口のある耐震壁の応力と変形に関する研究(その2)」 学会論報 301号 昭和56年
- 3) 青山、細川 「鉄筋コンクリート造有開口耐震壁の開口補強に関する実験的研究(その2～その11)」 学会大会 昭和54年～57年
- 4) 野口、長沼 「鉄筋コンクリート柱・はり接合部の非線形解析(第1報～第4報)」 学会大会 昭和55年～57年
- 5) 野口、鶴田 「RC耐震壁の開口補強に関する非線形解析(第2報)」 学会大会 昭和59年

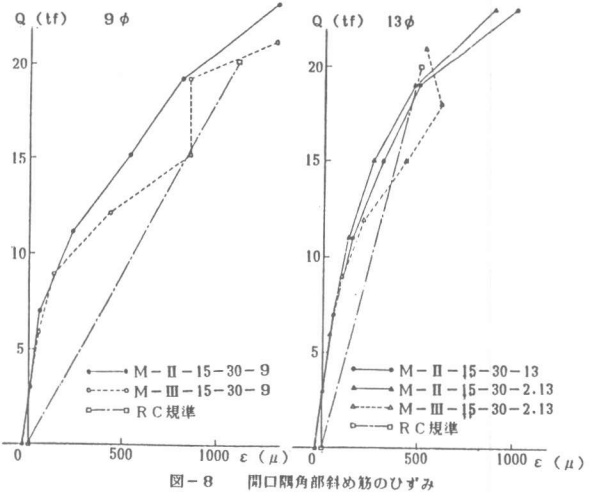


図-8 開口隅角部斜め筋のひずみ

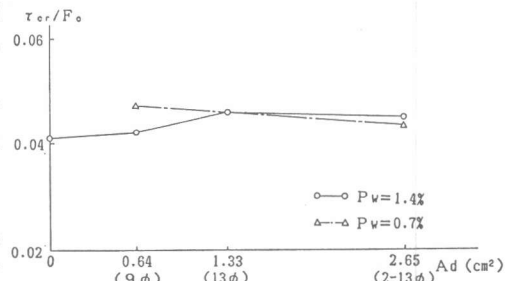


図-9 開口隅角部斜め補強筋量とせん断ひびわれ荷重の関係

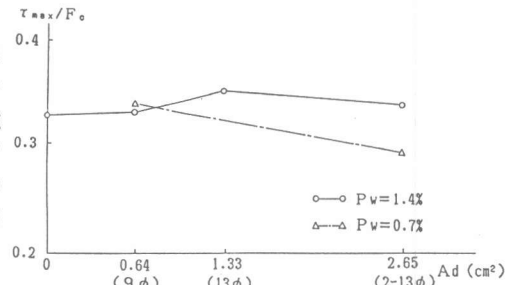


図-10 開口隅角部斜め補強筋量と最大耐力の関係

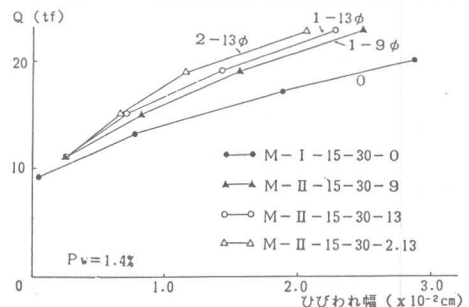


図-11 せん断力と開口隅角部のひびわれ幅の関係