#### 低強度コンクリート RC 梁の耐力評価に関する実験的研究 論文

谷口 博亮<sup>\*1</sup>·八十島 章<sup>\*2</sup>·荒木 秀夫<sup>\*3</sup>

要旨:既存の低強度コンクリート建物の耐震限界性能を評価することを目的として,大野式の正負交番繰返 し載荷による梁部材の曲げせん断実験を行った。梁試験体のせん断スパン比は1.5とし、コンクリート強度、 引張鉄筋比およびせん断補強筋比を変動因子とした。実験の結果、せん断耐力はアーチ・トラス機構に基づ いた強度式および荒川式を、せん断補強筋比とせん断補強筋の降伏強度の積であるせん断補強筋量の値に応 じて下限値をとることで、安全側に評価できることを示した。

キーワード:低強度コンクリート,せん断補強筋比,梁部材,ひび割れ強度,せん断

#### 1. はじめに

既存の鉄筋コンクリート造建物には、コンクリート圧 縮強度が設計値を下回り、10MPa程度の低強度である場 合が存在する<sup>1)</sup>。耐震診断基準<sup>2)</sup>では適用限界値を 13.5MPa とし、それ以下の場合は耐震診断の適用範囲外 としている。しかしながら, 適用範囲外の場合において も、現行の評価式を準用し、診断・改修しているのが現 状である。低強度コンクリートの構造部材に、曲げ、せ ん断、付着の現行の評価式が適用できる確証はなく、ま た、低強度コンクリートを用いた構造性能に関する実験 的研究はあまり行われていない。そのため、低強度コン クリートを使用した構造部材の耐震性能を評価するた め、資料の蓄積および整備は急務であると考えられる。

本研究では、低強度コンクリート建物の耐震限界性能 を評価することを目的として、10MPaクラスの低強度コ ンクリート<sup>3)</sup>を用いた梁試験体を作製し,逆対称モーメ ントの曲げせん断実験を行い、現行の耐力評価式の適合 性について検証する。

## 2. 実験概要

#### 2.1 試験体

試験体一覧を表-1 に示す。梁試験体の形状および配 筋を図-1 に示す。試験体は断面 200×280mm, 内法ス パン 840mm でせん断スパン比は 1.5 である。試験体は計 9体で、N134 および L134 シリーズはせん断評価のため に主筋の配筋を高強度鉄筋 SD390 の二段配筋とし, L076 シリーズは既存建物に用いられている普通強度 SD295 の一段配筋とした。実験因子はコンクリート強度(目標 E縮強度 9MPa, 18MPa), 引張鉄筋比 (p=1.34%, 0.76%) およびせん断補強筋比(p<sub>w</sub>=0.00, 0.15, 0.30%)である。

## 2.2 使用材料

コンクリートの調合を表-2 に示す。粗骨材の最大寸 法を 20mm とし、目標圧縮強度 9MPa は水セメント比 110%,目標圧縮強度18MPaは水セメント比80%とした。 なお,打設時の材料分離を抑制するために,混和剤とし て高性能 AE 減水剤を使用した。コンクリートの材料試 験結果を表-3に,鉄筋の引張試験結果を表-4に示す。

|         | *57              | コンクリ          | 14.7 平5     | 主                                   | 筋      | せん断補強筋   |                                    |  |
|---------|------------------|---------------|-------------|-------------------------------------|--------|----------|------------------------------------|--|
| 試験体名    | $b \times D(mm)$ | ート強度<br>(MPa) | セル例<br>スパン比 | 配筋                                  | 規格     | 配筋       | せん断補強筋比<br><i>p<sub>w</sub>(%)</i> |  |
| N134-00 |                  |               |             |                                     |        | -        | 0.00                               |  |
| N134-15 |                  | 18            |             |                                     |        | 2-D6@212 | 0.15                               |  |
| N134-30 |                  |               |             | 5-D13                               | \$D300 | 2-D6@106 | 0.30                               |  |
| L134-00 |                  |               |             | <i>p</i> <sub><i>t</i></sub> =1.34% | 3D390  | -        | 0.00                               |  |
| L134-15 | $200 \times 280$ |               | 1.5         |                                     |        | 2-D6@212 | 0.15                               |  |
| L134-30 |                  | 0             |             |                                     |        | 2-D6@106 | 0.30                               |  |
| L076-00 |                  | 9             |             | 2 D12                               |        | -        | 0.00                               |  |
| L076-15 |                  |               |             | n = 0.76%                           | SD295  | 2-D6@212 | 0.15                               |  |
| L076-30 |                  |               |             | $p_t = 0.7070$                      |        | 2-D6@106 | 0.30                               |  |

表-1 試験体一覧

\*1 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム専攻 大学院生 (正会員)

\*3 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム専攻 准教授 工博 (正会員)

-265-

<sup>\*2</sup> 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム専攻 助教 博士(工学) (正会員)



図-1 試験体配筋例(pt=1.34%, pw=0.15%)および変位計測位置

| BT 7 N   | 水セメ        | 細骨        | スラ         | 中午日        | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |        |                 |         |                 |  |
|----------|------------|-----------|------------|------------|--------------------------|--------|-----------------|---------|-----------------|--|
| 呼び<br>強度 | ント比<br>(%) | 材率<br>(%) | ンプ<br>(cm) | 空気重<br>(%) | セメント<br>C                | 水<br>W | 細骨材<br><i>S</i> | 粗骨材 $G$ | 混和剤<br><i>A</i> |  |
| Fc9      | 110        | 55        | 18         | 3.5        | 195                      | 215    | 959             | 827     | 1.17            |  |
| Fc18     | 80         | 53        | 18         | 3.2        | 269                      | 215    | 892             | 835     | 1.61            |  |

#### 2.2 加力·計測方法

加力方法は大野式の逆対称曲げモーメントによる正 負交番繰返し載荷とした。加力サイクルは正負ともに 1/400radを1回,1/200,1/100,1/66,1/50,1/33radをそ れぞれ2回,1/25,1/20,1/15radをそれぞれ1回の計14 サイクル行うこととした。計測項目は、荷重値、図-1 に示す両スタブ間の相対変位、局所曲げ変形・せん断変 形、および配筋例に示す主筋ひずみ、肋筋ひずみである。 また、目視によりひび割れ発生時を観測して記録した。

#### 3. 実験結果

### 3.1 破壊性状および荷重変形関係

各試験体の 1/50rad まで加力した後の写真を図-2 に, せん断力-変形角関係を図-3 に示す。図中には曲げひ び割れ発生時,せん断ひび割れ発生時,付着ひび割れ発 生時,最大耐力時を示した。N シリーズは 1/20rad まで 加力し,Lシリーズは 1/15rad まで加力した。いずれの試 験体も 1/400rad までに曲げひび割れが発生した。N134-00 は,せん断ひび割れ発生とほぼ同時に最大荷重となった。 N134-15 は,1/100rad 付近で最大荷重となり,その後急 激に変形が進行し耐力が低下した。N134-30 は,1/100rad でせん断ひび割れが発生し,1/66rad で最大荷重となった。 L134-00 は,1/200rad までにせん断ひび割れ,付着ひび 割れが発生し,最大荷重時にはせん断ひび割れが拡大し て耐力低下となった。1/100rad 付近でひび割れが拡大し, 表-3 コンクリートの材料試験結果

| 呼び強度 | 圧縮<br>強度<br>(MPa) | 割裂<br>強度<br>(MPa) | 弾性<br>係数<br>(GPa) | 圧縮強<br>度時歪<br>(μ) |  |
|------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--|
| Fc9  | 10.3              | 1.3               | 16.4              | 1771              |  |
| Fc18 | 19.5              | 2.0               | 25.5              | 1574              |  |

表-4 鉄筋の引張試験結果

| 鉄筋種類            | 降伏<br>強度<br>(MPa) | 弾性<br>係数<br>(GPa) | 降伏歪<br>(µ) | 破断<br>伸び<br>(%) |
|-----------------|-------------------|-------------------|------------|-----------------|
| D6              | 425               | 181               | 2577       | 16.0            |
| D13<br>(SD295A) | 357               | 185               | 1960       | 26.7            |
| D13<br>(SD390)  | 496               | 172               | 3227       | 17.2            |

急激に変形が進行した。L134-15 は、1/200rad までにせん断ひび割れが発生、1/100rad でせん断ひび割れが拡大して、最大荷重となった。L134-30 は、1/200rad までに せん断ひび割れが発生、1/100rad までに2段目主筋に沿った付着ひび割れが発生した。1/66rad 付近でせん断ひび 割れが拡大して最大荷重となり、その後は徐々に耐力低下した。L076-00 は、1/200rad までに発生したせん断ひび割れが拡大し、最大荷重となった。L076-15 は、1/200rad まで曲げせん断ひび割れが分散して発生し、1/100rad で 最大荷重となった。その後は、付着ひび割れが発生し、 徐々に耐力低下した。L076-30 は、1/100rad 付近で上端 引張側主筋が降伏ひずみに達して曲げ降伏した後,付着 割裂ひび割れが発生し最大荷重となった。最終破壊形式 は L076-30 が曲げ降伏後の付着割裂破壊,その他の試験 体はせん断破壊である。



#### 3.2 せん断補強筋のひずみ分布

せん断補強筋比 0.15%および 0.30%の各試験体のせん 断補強筋のひずみ分布を図-4 に示す。図中の破線は材 料試験より得たせん断補強筋の降伏ひずみ*Emy*である。せ ん断破壊をした N134-15, N134-30, L134-15, L134-30, L076-15 は,最大荷重までは均等な分布を示し,荷重を 負担しているが,最大耐力時においてはせん断ひび割れ 幅の大きい箇所でのみ歪が大きくなり,降伏ひずみに達 している。曲げ降伏が先行した L076-30 は,降伏ひずみ に達したものはなく,均等な分布を示している。

# 3.3 荷重-変形関係の包絡線

N134, L134 および L076 シリーズの包絡線を図-5 に 示す。実線はせん断補強筋比  $p_w$ が 0.30%の試験体,破線 は  $p_w$ =0.15%,一点鎖線が  $p_w$ =0.00%のものである。N134 シリーズは、せん断補強筋比の増大に伴い限界変形角が 大きくなるが、1/30rad 以降はほぼ同等となっている。また、低強度コンクリートの試験体は、せん断補強筋比の 増大による最大荷重の増加率が小さいが、最大荷重後の 下降勾配は緩やかになっている。

## 3.4 局所変形

N134-00, L134-15 および L076-30 において, 図-1右 下図に示す変位計より算出した,全体変形に対する曲げ 変形の割合を図-6に示す。図中には,1/33radまでの各 ピーク時をプロットしており,実線で示したものが正側, 破線が負側である。なお,抜け出しによる変形は曲げ変 形として算出し,変形角 0rad 時は弾性変形による割合を 示している。曲げ降伏後の付着割裂破壊となった L076-30 を除く,他のせん断破壊となった試験体では, 変形が進むにつれて曲げ変形の割合は減少し,せん断変 形の割合が支配的になっていることが確認できる。





図-6 全体変形に対する曲げ変形の割合

# 4. 実験結果の検討

## 4.1 ひび割れ強度

ひび割れ強度の実験値および計算値の一覧を表-5 に 示す。曲げひび割れ強度の計算値は、RC 規準式<sup>4)</sup>により 求め、せん断ひび割れ強度は、靭性保証型耐震設計指針 式<sup>5)</sup>および荒川 mean 式<sup>6)</sup>により算出した。曲げひび割れ 強度は、実験値と計算値の比が 1.0 から 1.7 の値とばら ついており、対応精度は悪いが、安全側に評価できてい る。しかし、せん断ひび割れ強度は、曲げひび割れ強度 よりばらつきの程度が大きく、ほとんどが危険側の評価 となっている。

# 4.2 最大耐力

最大荷重および耐力計算値の一覧を表-6 に示す。せん断強度計算値は、終局強度型耐震設計指針式A法<sup>7</sup>および逆対称モーメントを受ける梁のせん断強度推定式として精度がよいとされる荒川 mean 式<sup>60</sup>で求めた。付着割裂耐力の計算値は、付着強度に支配されるアーチ・トラス機構のせん断強度式<sup>80</sup>で求め、付着割裂強度算定式は前田・小谷式<sup>80</sup>を用いた。なお、材料強度はコンクリート材料試験結果および鉄筋引張試験結果を用いた。

終局 A 法による計算値は,若干危険側評価しているも

のもあるが, せん断補強筋のある N134-15, N134-30, L134-15, L134-30 および L076-15 の実験値と概ね一致し ている。せん断補強筋のない 3 体については, 実験値が アーチ機構のみによる計算値より大きくなり, その傾向 は低強度コンクリートの試験体ほど顕著である。低強度 コンクリートの場合は, 図-2 のひび割れ性状も踏まえ ると, アーチ機構が形成しづらくなると考えられる。

荒川式による計算値は、Nシリーズでは比較的よく対応しているが、低強度であるLシリーズでは危険側評価となる。せん断補強筋のない3体において、荒川式が終局A法に比べて良い対応となった理由としては、式中のコンクリート寄与分がせん断補強筋のない数多くの実験値を回帰した経験式であり、コンクリート強度の対象範囲が11~79MPaであったためと考えられる。

また, せん断強度とせん断補強筋量の関係を図-7 に 示す。図中のプロットは実験値を示し, 実線は各試験体 の条件を代入した終局強度型 A 法による計算値を表し, 破線および一転鎖線は荒川式による計算値である。N134 シリーズでは終局 A 法と荒川 mean 式の両式で安全側評 価となったが, L134 シリーズおよび L076 シリーズにお いては荒川 min 式の計算値を下回る試験体も見られ, 両

| 試験体名    | 曲げ           | せん断          | せん断                    | ひび割れ発生荷重計算値 |      |      |                   |      |                      |  |
|---------|--------------|--------------|------------------------|-------------|------|------|-------------------|------|----------------------|--|
|         |              |              | ひび割れ                   | れ 曲げ        |      | せん断  |                   |      |                      |  |
|         | びい割れ         | びい割れ         | 発生時                    | 発生時 RC 規準元  |      | 靭性仍  | R証型 <sup>5)</sup> | 荒川 m | iean 式 <sup>6)</sup> |  |
|         | 光生何里<br>(kN) | 光生何里<br>(kN) | 部材角                    | 計算値         | 実験値  | 計算値  | 実験値               | 計算値  | 実験値                  |  |
|         | (KI)         | (111)        | $(\times 10^{-3} rad)$ | (kN)        | /計算値 | (kN) | /計算値              | (kN) | /計算値                 |  |
| N134-00 | 32.0         | 58.5         | 3.57                   | 18.7        | 1.71 | 54.4 | 1.08              | 60.1 | 0.97                 |  |
| N134-15 | 25.9         | 49.4         | 3.87                   | 18.7        | 1.39 | 54.4 | 0.91              | 60.1 | 0.82                 |  |
| N134-30 | 27.5         | 37.3         | 3.12                   | 18.7        | 1.47 | 54.4 | 0.69              | 60.1 | 0.62                 |  |
| L134-00 | 16.9         | 23.2         | 0.17                   | 13.6        | 1.24 | 39.5 | 0.59              | 52.0 | 0.45                 |  |
| L134-15 | 24.4         | 35.3         | 3.31                   | 13.6        | 1.80 | 39.5 | 0.89              | 52.0 | 0.68                 |  |
| L134-30 | 21.2         | 45.6         | 3.30                   | 13.6        | 1.56 | 39.5 | 1.15              | 52.0 | 0.88                 |  |
| L076-00 | 19.9         | 33.2         | 3.18                   | 13.2        | 1.50 | 39.5 | 0.84              | 58.3 | 0.57                 |  |
| L076-15 | 17.7         | 54.4         | 10.02                  | 13.2        | 1.34 | 39.5 | 1.38              | 58.3 | 0.93                 |  |
| L076-30 | 13.6         | 63.1         | 6.52                   | 13.2        | 1.03 | 39.5 | 1.60              | 58.3 | 0.92                 |  |

表-5 ひび割れ強度の実験値および計算値の一覧

| 最<br>試験体名 荷<br>(k) | 最大<br>荷重<br>(kN) | 破壊<br>形式* | 曲げ強度        |             |                         | せん圏         | 一 付着強度 <sup>8)</sup> |             |                         |             |
|--------------------|------------------|-----------|-------------|-------------|-------------------------|-------------|----------------------|-------------|-------------------------|-------------|
|                    |                  |           |             |             | 終局強度型 A 法 <sup>7)</sup> |             |                      |             | 荒川 mean 式 <sup>6)</sup> |             |
|                    |                  |           | 計算値<br>(kN) | 実験値<br>/計算値 | 計算値<br>(kN)             | 実験値<br>/計算値 | 計算値<br>(kN)          | 実験値<br>/計算値 | 計算値<br>(kN)             | 実験値<br>/計算値 |
| N134-00            | 86.1             | S         | 156.1       | 0.55        | 53.4                    | 1.61        | 82.2                 | 1.05        | 110.8                   | 0.78        |
| N134-15            | 108.7            | S         | 156.1       | 0.70        | 88.3                    | 1.23        | 110.2                | 0.99        | 127.0                   | 0.86        |
| N134-30            | 124.3            | S         | 156.1       | 0.80        | 123.1                   | 1.01        | 121.8                | 1.02        | 141.1                   | 0.88        |
| L134-00            | 57.5             | S         | 150.0       | 0.38        | 30.4                    | 1.90        | 61.8                 | 0.93        | 72.1                    | 0.80        |
| L134-15            | 69.4             | S         | 150.0       | 0.46        | 65.2                    | 1.06        | 89.9                 | 0.77        | 86.0                    | 0.81        |
| L134-30            | 89.2             | S         | 150.0       | 0.59        | 100.1                   | 0.89        | 101.5                | 0.88        | 97.0                    | 0.92        |
| L076-00            | 57.3             | S         | 73.1        | 0.78        | 30.4                    | 1.89        | 56.1                 | 1.02        | 59.3                    | 0.97        |
| L076-15            | 67.2             | S         | 73.1        | 0.92        | 72.5                    | 0.93        | 85.8                 | 0.78        | 67.9                    | 0.99        |
| L076-30            | 73.0             | FB        | 73.1        | 1.00        | 114.6                   | 0.64        | 98.2                 | 0.74        | 74.8                    | 0.98        |

表-6 実験結果一覧

\*: S=せん断破壊, FB=曲げ降伏後の付着割裂破壊





シリーズにおける実験値と荒川 min 式による計算値の比 の平均値は 1.01 である。同図より終局 A 法と荒川 min 式の両式の下限値をとることで概ね安全側に評価でき ると思われる。

## 5. まとめ

既存の低強度コンクリート建物の耐震限界性能を評価することを目的として、梁試験体の曲げせん断実験を行った。低強度コンクリート RC 梁において、せん断耐力はアーチ・トラス機構に基づいた強度式および荒川式をせん断補強筋量の値に応じて下限値をとることで、概ね安全側に評価できることを示した。

# 謝辞

本実験において,本学大学院工学研究科耐震工学研究 室学生に協力を得た。ここに感謝の意を示す。

# 参考文献

 坂巻、広沢ほか:既存鉄筋コンクリート造建築物の コンクリート強度に関する研究、日本建築学会大会 学術講演梗概集, C-2 構造IV, pp.801-804, 2001.9

- 2) 日本建築防災協会:2001 年改訂版 既存鉄筋コンク リート造建築物の耐震診断基準,耐震改修設計指 針・同解説,2001
- 3) 八十島章ほか:低強度コンクリートを用いた RC 部 材の耐震性能,コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.931-936, 2007
- 4) 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算規準・同 解説 一許容応力度設計法-,1999.11
- 5) 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,1997.7
- 売川卓:鉄筋コンクリートばりの許容せん断応力度 とせん断補強について、コンクリート・ジャーナル、 Vol.8, No.7, pp.11-20, 1970.7
- 7) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の終局強度 型耐震設計指針・同解説,1990.11
- 小谷俊介,前田匡樹:異形鉄筋とコンクリートの付着応力伝達機構に基づいた付着割裂強度式,日本建築学会大会学術講演梗概集,C,構造 II, pp.655-658, 1994.9