# 論文 減振機能を有する鉄筋コンクリート造梁の実用化に向けた研究開発

大塚 悠里\*1・小池 浩香\*2・平石 久廣\*3

要旨:本論文では,通常の配筋法の梁より部材を早期に降伏させることにより良好な減衰能力を発揮しうる 減振構造の更なる実用化及びその構造性能の評価法確立のため減振梁の研究開発実験を行った。具体的には, 建物の一部に用いることを想定した短スパン梁の付着余裕度を向上させた減振梁と梁端部における下端筋の 一部を非定着とした下端減振梁の減振比(減振として機能する鉄筋の全断面積/曲げ耐力に有効な鉄筋の全 断面積)を変えた構造実験を行った。実験結果より減振梁は梁端部にひび割れが集中し,短スパン減振梁は通 常の短スパン梁に比べやや良好な減衰能力を,下端減振梁は減振比が大きいほど良好な減衰能力を有した。 キーワード:鉄筋コンクリート造梁,構造実験,主筋非定着,短スパン梁,等価減衰定数

# 1. はじめに

近年,建築物には大地震に対しても一定の継続使用性 が要求されつつある。そのため,建築物の制振化や免震 化が普及しつつあるが,これらにはコスト面,意匠面及 びメンテナンス面など配慮すべき課題が多くある。

このため、上記の問題を解決しうる構造として減振構 造が挙げられる。減振構造とは、部材の危険断面におい て鉄筋量を減らすことで通常の鉄筋コンクリート造梁よ りも早期に降伏し、小さな変形段階から良好なエネルギ 一吸収能力を有する構造である。著者らはすでに、減振 構造の開発研究を進めており、減振構造の基本的性状を 把握するため、梁の主筋のうち内側に配した主筋を非定 着とした梁(図-1(a)参照)の構造実験から,その工法の妥 当性を示している 1)。また、実用化に向けた応用開発研 究にも取り組んでおり,減振構造のより有効的な活用法 と考えられる建物の一部に減振梁を用いることを想定し た短スパン梁(図-1(b)参照)及び一般的に梁の下端筋が 上端筋に比べ少ないことから下端筋の一部を非定着とし た減振梁の構造実験を行い、それらが通常の配筋法とし た部材に比べて早期に降伏し、それに伴い小さな変形段 階から良好な履歴減衰能力を有することを示している<sup>2)</sup>。

しかしながら,短スパン減振梁の場合では変形角 1/50(rad.)から付着割裂が生じ,短スパン特有の大変形角 での正確なデータが得られていない。また,下端のみを



減振としたモデルでは実用化に向けたモデル数が少ない などの検討課題が挙げられる。

そこで本研究では、これらの課題を解決するため、短 スパンとしたモデルではせん断補強筋間隔を文献<sup>2</sup>に比 べ、密にしたモデルでの検討を行う。また、下端のみを 減振としたモデルでは、より実用的なモデルの開発及び その評価法の確立のため、文献<sup>2</sup>とは異なる配筋での検 討を行い、これらのモデルの妥当性及び構造性能の検証 を行う。

#### 2. 実験概要

減振機能を有する鉄筋コンクリート造梁の実用化に向 けた開発研究にあたり、2.1節、2.2節に示す2つのモデ ルを研究対象とした。

# 2.1 付着余裕度を上げた短スパン(せん断スパン比 1.5) 梁減振モデル

大変形角での付着割裂を防ぐため、せん断補強筋間隔 を文献<sup>2)</sup>の 100(mm)から 50(mm)に変更したモデルであ る。また、大変形角でのデータを得るため、通常の梁で 想定される変形角の3倍にあたる変形角 1/33(rad.)まで実 験を行う。

# 2.2 減振比を変えた通常スパン(せん断スパン比 2.5)梁 下端減振モデル

式(1)に危険断面における減振比示す。式(1)より,文献 <sup>1)</sup>の UG0.5LG0.5(上下端端部の引張鉄筋比を 0.5%とし, 上端下端共に各 4本の主筋の内 2本を非定着とした減振 モデル)の減振比は1となる。また,文献<sup>2)</sup>の U0.5LG0.5(上 下端端部の引張鉄筋比を 0.5%とし,下端のみ各 4本の主 筋の内 2本を非定着とした減振モデル)の減振比は 1/2, U1LG0.5(上端端部の引張鉄筋比を 1.0%,下端端部の引張 鉄筋比を 0.5%とし,下端のみ各 4本の主筋の内 2本を非

\*1 明治大学大学院博士後期課程 理工学研究科 日本学術振興会特別研究員 DC1 修士(工学) (学生会員)

\*2 明治大学大学院博士前期課程 理工学研究科

\*3 明治大学教授 理工学部建築学科 工博 (国立研究開発法人建築研究所 客員研究員) (正会員)

定着とした減振モデル)の減振比は 1/3 となる。本研究では、文献<sup>1),2)</sup>とは異なる減振比の検討を行うため、減振 比を 1/4(後述, U1LG0.3), 2/5(後述, U0.7LG0.5)とした。

#### 2.3 試験体概要

表-1 に各試験体概要, 図-2 に各試験体の梁端部断 面及び平面の概要を示す。また,表-2,表-3 に各試験 体に使用したコンクリート及び鉄筋の材料試験結果を示 す。なお,コンクリートは柱状に型枠を組み,縦打ちと した。

文献<sup>3)</sup>の14階モデルを参照し,曲げ降伏が先行する梁 を想定した4体を実大の1/2スケールで設計した。共通 因子は,梁断面せい350(mm),梁断面幅250(mm),梁部 分のコンクリート強度24(N/mm<sup>2</sup>)とした。また, UG0.5LG0.5-S2 と U0.5L0.5-S-SL のスパン長さは 945(mm),U1LG0.3 と U0.7LG0.5 のスパン長さは 1600(mm)とした。なお,文献<sup>2)</sup>の UG0.5LG0.5-S と区別 するため,本試験体の名称をUG0.5LG0.5-S2 としている。 また,UG0.5LG0.5-S2,U0.5L0.5-S-SL 及び U1LG0.3 の梁 中央部のせん断補強筋は,梁中央部における変形を計測 するため,位置を若干ずらしているが,構造性能等に影 響は見られなかった。

以下に, 各試験体の特徴を記す。

# (1) UG0.5LG0.5-S2

梁中央部の上端下端筋共に 4-D16, 梁端部の上端下端 筋共に 2-D16 とし, 内側に配した主筋 2 本を非定着とし た。せん断補強筋は 4-D6@50 とした。

(2) U0.5L0.5-S-SL

上端下端筋共に 2-D16 とした。せん断補強筋は 2-D6@50 した。また、一方の梁端部の下端の中央にスリット(幅 54mm, せい 20mm)を設けた。これは、スリットが 危険断面のみに曲げひび割れを集中しうることから、減 振的な効果の可能性があると考えたことによる。



表-1 各試験体概要

=+ ₩~ /+	使用部分	*	圧縮強度	ヤング係数
記時(14)		養生力法	(N/mm <sup>2</sup> )	$(\times 10^4 \text{N/mm}^2)$
UG0.5LG0.5-S2	上スタブ 梁部材	気乾	28.2	2.82
U0.5L0.5-S-SL			29.2	3.10
U1LG0.3			30.9	2.96
U0.7LG0.5			31.1	2.94
UG0.5LG0.5-S2	JG0.5LG0.5-S2 U0.5L0.5-S-SL U1LG0.3 U0.7LG0.5		38.9	3.09
U0.5L0.5-S-SL			38.4	3.01
U1LG0.3			39.5	3.04
U0.7LG0.5			40.3	3.11

表-2 コンクリート圧縮試験結果

## 表-3 鉄筋引張試験結果

供試体	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (×10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup> )	降伏歪 (%)
SD345-D6	366	540	1.78	0.406 <sup>*</sup>
SD345-D10	363	546	1.80	0.252
SD345-D13	360	512	1.82	0.216
SD345-D16	383	566	1.84	0.212
SD345-D22	378	566	1.86	0.222

#### ※0.2%オフセット

# (3) U1LG0.3

梁中央部の上端筋は 2-D22, 下端筋は 4-D13 とした。 また,梁端部の上端筋は梁中央部と同じ配筋,下端筋は 2-D13 とし,下端内側に配した主筋2本を非定着とした。 せん断補強筋は 2-D6@60 とした。

# (4) U0.7LG0.5

梁中央部の上端下端筋共に外側は2-D16,内側は2-D13 とした。また,梁端部の上端筋は梁中央部と同じ配筋, 下端筋は2-D16とし,下端内側に配した主筋2本を非定 着とした。せん断補強筋は4-D6@100とした。

#### 2.4 載荷方法

建研式逆対称加力装置を用いた。載荷は変形角制御と し、水平アクチュエーターにより正負方向におけるせん 断力を与えた。表-4 に各試験体における加力サイクル の目標所定変形角とその水平変位を示す。なお、変形角 1/800(rad.)は正負繰り返し載荷を1回行い、それ以降は正 負繰り返し載荷を2回行った。また、いずれの試験体も 同様なサイクルで加力を行い軸力は0となるようにした。

# 3. 実験結果

# 3.1 破壊性状

図-3(a), (b)に変形角 1/33(rad.)経験後における UG0.5LG0.5-S2 と U0.5L0.5-S-SL, 図-3(c), (d)に変形角 1/50(rad.)経験後における U1LG0.3 と U0.7LG0.5 のひび 割れ状況を示す。なお, 図-3 の括弧内は残留ひび割れ 幅を示す。また, 写真-1 に最終破壊状況における UG0.5LG0.5-S2 と U0.5L0.5-S-SL の写真を示す。

#### (1) UG0.5LG0.5-S2, U0.5L0.5-S-SL

変形角 1/800(rad.)で梁端部に曲げひび割れが発生し, 変形角 1/400(rad.)で曲げせん断ひび割れと主筋に沿った ひび割れが発生した。変形角 1/33(rad.)の荷重 0 近傍でス タブとの境界面において試験体部分が横に滑る顕著なス リップ性状を示した。また,UG0.5LG0.5-S2 に比べ U0.5L0.5-S-SL の方が,梁端部にひび割れが集中せず,曲 げせん断ひび割れの幅も大きく発生した(図-3(a),(b), 写真-1参照)。

# (2) U1LG0.3, U0.7LG0.5

変形角 1/400(rad.)程度まで短スパン梁と同様な破壊性 状を示したが,降伏後から梁上端側と梁下端側の破壊性 状に差異が生じた。変形角 1/50(rad.)において減振とした 梁下端スタブ接合部におけるひび割れが最も大きくなっ た。特に,梁上端と梁下端の鉄筋比の差が大きいU1LG0.3 では,この差異が顕著に表れた(図-3(c),(d)参照)。

表-4 各試験体の目標所定変形角と水平変位

		試験	体名		
UG0.5LG0.5-S2 U0.5L0.5-S-SL			U1LG0.3 U0.7LG0.5		
	1/800	1.18	1/800	2.0	
	1/400	2.36	1/400	4.0	
	1/200	4.73	1/200	8.0	
1/133		7.11	1/133	12.0	
	1/100	9.45	1/100	16.0	
	1/50	18.90	1/50	32.0	
	1/33	28 64	/	/	



## 3.2 曲率分布

図-4に各試験体の曲率分布を示す。UG0.5LG0.5-S2は U0.5L0.5-S-SLに比べ,小さな変形レベルから梁端部に曲 率が集中した。また,U0.5L0.5-S-SLは梁の左右の測定区 間の平均曲率に差異がほとんど見られなかったことから, スリットによる影響は小さいと言える。U1LG0.3 と U0.7LG0.5 は小さな変形レベルから梁端部に曲率が集中 し,特に減振とした梁下端端部に曲率が集中する傾向を 示した。

# 3.3 諸強度

表-5 に各試験体の理論値,実験値及び付着余裕度を 示す。曲げ終局時のせん断力 Qmu は梁の曲げ終局強度学 会略算式 4を用いたメカニズム時の曲げモーメント,せ ん断終局強度 Qsu の理論値は荒川 mean 式 4より求めた。 また,終局強度比の理論値は Qmu と Qsu の小さいほうの 値となる Qmu を用いた。付着信頼強度 τbu 及び設計用付着 応力度 q は文献 5の方法により算出し,付着余裕度が最 も小さい場合について記した。全ての試験体において, 実験値の最大せん断力は理論値を上回った。

# ■1/800 ■ 1/400 ■1/200 ■1/133 ■1/100 ■1/50 ■1/33 60 r 60 r









(c) U1LG0.3

#### 3.4 荷重-変形角関係

図-5に各試験体の荷重-変形角関係, せん断力の最大 値及び理論値を示す。UG0.5LG0.5-S2, U0.5L0.5-S-SL に おいて最大せん断力は変形角 1/33(rad.)の 1 回目で, U1LG0.3, U0.7LG0.5 において最大せん断力は変形角 1/50(rad.)の1回目で見られた。U0.7LG0.5 は加力終了ま で極めて安定した履歴性状を示し, UG0.5LG0.5-S2 と U1LG0.3 は変形角 1/50(rad.)の2 サイクル目, U0.5L0.5-S-SL は変形角 1/33(rad.)の2 サイクル目にスタブとの境界 面で滑りが生じたことによるせん断力の低下がみられた。 また,減振比が大きい U0.7LG0.5(減振比 2/5)の方が, U1LG0.3(減振比 1/4)より,大きな履歴形状を有した。

表-5 各試験体の理論値、実験値及び付着余裕度

試験体		曲げ終局時 せん断力 理論値	せん断 <u>終局強度</u> 理論値	実験値	終局 強度比	付着 余裕度
		Q <sub>mu</sub> (kN)	Q <sub>su</sub> (kN)	Q <sub>max</sub> (kN)	Q <sub>max</sub> /Q <sub>mu</sub>	T <sub>bu</sub> /T <sub>f</sub>
UG0.5LG0	).5 <b>-</b> S2	91.2	198.6	120.0	1.3	1.5
U0.5L0.5	U0.5L0.5-S-SL	91.2	201.2	120.5	1.3	1.5
111 C0 3	上端	69.4	147.7	82.8	1.2	1.5
UILG0.5	下端	00.4	208.1	85.7	1.3	(梁上端)
		上端 63.5 下端	128.6	80.9	1.3	1.8
00.7260.5	下端		146.5	82.2	1.3	(梁上端)







## (b) U0.5L0.5-S-SL



(d) U0.7LG0.5

#### 図-5 各試験体の荷重-変形角関係

## 3.5 スリップ性状

図-6 に各試験体の梁の伸び及び滑り水平変位  $\delta_s$ (式 (2))を示す。式(2)における  $\delta_h$ は梁端部 100(mm)における 水平変位,  $\theta$ は短スパン梁の場合は梁端部 50(mm),通常 スパン梁の場合は梁端部 100(mm)における回転角である。

 $\delta_s = \delta_h - \theta \cdot h$  (2) 全ての試験体において梁の伸びはおおよそ同じ値を示 したが,滑り水平変位 &には差異が生じた。U1LG0.3 と U0.7LG0.5 の通常スパン梁は滑り変位が小さいことから, スリップ的挙動はさほど見られない(図-5(c), (d)参照)。 一方,短スパン梁は通常スパン梁に比べ梁の伸びに伴う 滑りの影響により,スリップ的挙動が変形角 1/50(rad.)あ たりから,特に減振とした UG0.5LG0.5-S2 で大きくなっ た(図-5(a), (b)参照)。

# 3.6 降伏変形角

図-7 に各試験体の包絡線を示す。なお、図中には文献<sup>1)</sup>の主筋をスタブ端まで通した通常の配筋法の試験体 U1L1(引張鉄筋比 1.0%)を黒線、UG0.5LG0.5 を灰色の線 で、文献<sup>2)</sup>の U0.5LG0.5 を橙色の線、U1LG0.5 を緑色の 線で示す。さらに、主筋に貼付した歪ゲージや荷重-変形 角関係などを基に、総合的な見地から定めた降伏変形角 をプロットで示す。

UG0.5LG0.5-S2, U0.5L0.5-S-SL の初期剛性はほぼ同じ 値を示した(図-7(a)参照)。また, U0.5L0.5-S-SL は U1L1 より早期に降伏し, その変形角の値は U1L1 の 1/2 であ った。UG0.5LG0.5-S2 はさらに早期に降伏し, その降伏



変形角は U0.5L0.5-S-SL の 9/10 であった。

U1LG0.3, U0.7LG0.5 の初期剛性は U1L1 とほぼ同じ値 を示した(図-7(b)参照)。減振比 1 未満の U1LG0.3(減振 比 1/4), U0.7LG0.5(減振比 2/5)及び文献 <sup>2)</sup>の U0.5LG0.5(減 振比 1/2), U1LG0.5 (減振比 1/3)の下端は文献 <sup>1)</sup>の上下端 共に減振とした UG0.5LG0.5(減振比 1)より早期に降伏し, 特に下端端部の引張鉄筋比が小さい U1LG0.3(減振比 1/4 が最も早期に降伏した。また, U1LG0.3 の上端は U1LG0.5 の上端とほぼ同じ値で降伏し, U1L1 より降伏が遅れる 傾向を示した。U0.7LG0.5 の上端は U0.5LG0.5 とほぼ同 じ値で降伏した。

# 3.7 等価減衰定数

図-8 に各試験体と文献<sup>1)</sup>の U1L1, UG0.5LG0.5 及び 文献<sup>2)</sup>の U0.5LG0.5, U1LG0.5 の各サイクルにおける等 価減衰定数を示す。なお,図-8(a)には滑りによる影響 を除去した場合の値も示す。

図-8(a)より,UG0.5LG0.5-S2 の等価減衰定数は変形 角 1/400(rad.)~1/50(rad.)までU0.5L0.5-S-SL に比べ,やや 良好ではあるが顕著な差異はないと言える。これは、短 スパンであることから梁端部に曲率が集中し、結果的に 減振の効果が薄らいだためと考えられる。ただし、変形 角 1/33(rad.)ではUG0.5LG0.5-S2 の等価減衰定数の方が 大きな値を示した。

滑りによる影響を除いた等価減衰定数は変形角 1/200(rad.)以降は 1~2 割ほど大きくなり,減振とした UG0.5LG0.5-S2 の方が U0.5L0.5-S-SL より大きな値を示 した。また,変形角 1/33(rad.)において,U0.5L0.5-S-SL は 等価減衰定数の減少が見られたが,これは端部の顕著な せん断ひび割れに起因すると考えられる。これらのこと から,短スパン梁を減振とする場合にはシアキーなどを 設け,梁端部の滑りを防止することが重要であろう。

図-8(b)より,減振比が最も小さい U1LG0.3(減振比 1/4)でも変形角1/200(rad.)~1/50(rad.)においてはU1L1よ りかなり大きい等価減衰定数の値を示したことがわかる。 また,U0.7LG0.5(減振比 2/5)は変形角 1/400(rad.)~ 1/50(rad.)においてU1LG0.5(減振比 1/3),UG0.5LG0.5(減



# (b) U1LG0.3, U0.7LG0.5

図-7 各試験体の包絡線



(a) UG0.5LG0.5-S2, U0.5L0.5-S-SL

図-8 各試験体の等価減衰定数

振比1)とほぼ同じ等価減衰定数の値を示した。なお、変 形角 1/100(rad.)~1/50(rad.)において, U0.5LG0.5(減振比 1/2)が最も大きな等価減衰定数の値を示した。

# 4. まとめ

以下に得られた知見を記す。

- (1) 減振としたしたモデル(UG0.5LG0.5-S2, U1LG0.3, U0.7LG0.5)は通常の配筋法としたモデルに比べ,梁端 部にひび割れが集中した。また,通常スパン梁の下端 のみを減振としたモデル(U1LG0.3, U0.7LG0.5)では, 上下端端部の引張鉄筋比の差が大きいほど、下端端 部にひび割れが集中した。
- (2) せん断スパン比を 1.5 とした短スパン梁を減振とし たモデル(UG0.5LG0.5-S2)の降伏変形角は、通常の配 筋法とした短スパン梁のモデル(U0.5L0.5-S-SL)より, 9/10 程度早期に降伏した。
- (3) 短スパン梁には梁の伸びに伴う梁端部の滑りによる スリップ性状が見られた。
- (4) 滑り変形を除いた等価減衰定数では、短スパン梁を 減振としたモデル(UG0.5LG0.5-S2)が極めて良い等価 減衰定数の値を示した。
- (5) 短スパン梁の一方の梁端部の下端の中央に設けたス リットは、部材のひび割れの抑制に若干の効果があ ったが、部材としての変形性状にはほとんど影響は 与えなかった。
- (6) 下端のみを減振としたモデルの下端は上下端共に減 振としたモデルよりさらに早期に降伏し、特に下端 端部の引張鉄筋比が小さい U1LG0.3 が最も早期に降 伏した。また、上端は下端が早期降伏することによっ て、通常の配筋法としたモデルと同じ配筋量でも降 伏が遅れる傾向を示す。
- (7) 通常スパン梁は短スパン梁と同様な梁の伸びを示し たが、短スパン梁に比べて滑り変形は小さい。
- (8) 変形角 1/100(rad.), 1/50(rad.)において、減振比の値が 大きいと等価減衰定数の値も大きくなる傾向を示し

た。なお、減振比が小さく(U1LG0.3)ても通常の配筋 法としたモデル(U1L1)よりかなり大きな等価減衰定 数の値を示す。

なお、短スパン梁にはせん断スパン比が小さいことに よる荷重0付近のスリップ挙動が見られた。このため、 せん断スパン比が小さい梁を減振構造とする場合にはシ アキーなどを設け、このスリップ挙動を防止することが 望まれる。ただし、実際の架構では梁の伸びは柱や耐震 壁によって抑制されるため、本実験のスリップ変形より は小さくなると考えられる。

#### 謝辞

実験の実施にあたり五洋建設(株)の関係者の皆様,明 治大学学部4年の小川稜平氏,西田規朗氏には多大なご 協力を賜りました。ここに記して深く感謝の意を表しま す。なお、本研究の一部は平成30年度特別研究員奨励費 (課題番号:17J02633,研究代表者:大塚悠里)により行った。

# 参考文献

- 1) 加賀朱音,大塚悠里,小池浩香,平石久廣:減振機 能を有する鉄筋コンクリート造梁の開発研究、コン クリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.145-150, 2018.7
- 2) 大塚悠里,小池浩香,加賀朱音,平石久廣:減振機 能を有する鉄筋コンクリート造梁の応用開発研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.151-156, 2018.7
- 3) 財団法人日本建築防災協会:構造設計·部材断面事 例集, 財団法人日本建築防災協会, 2007
- 4) 建築物の構造関係技術基準解説書編集委員会:2015 年版建築物の構造関係技術基準解説書,全国官報販 売協同組合,2015
- 5) 社団法人日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の 靭性保証型耐震設計指針·同解説,社団法人日本建 築学会,1999