

減振機能を有する鉄筋コンクリート造梁の構造性能評価

富田 祐介* 前島 克朗*

要 旨

近年、建築物には大地震時においても一定の継続使用性や損傷の軽減が要求されるようになってきた。このような背景から筆者らは、小さな変形段階より良好なエネルギー吸収能力および減衰能力を発揮し、建物の応答低減を可能とする機能(減振機能)を有した鉄筋コンクリート造梁の開発を行っている。本報では、既報⁴⁾において示した短スパン減振モデルに対して付着余裕度を高める改良を施したモデル、減振として機能する主筋の全定着筋に対する断面積の比率(減振比)をパラメータとしたモデルを用いて構造実験を実施し、それぞれエネルギー吸収能力の再検証、減振比と等価減衰定数との関係の考察を行った。その結果、短スパン減振モデルにおける付着余裕度の向上は、付着ひび割れの抑制に若干の効果があったものの、等価減衰定数は増加しなかった。また、減振比の増加に伴いコンクリートの損傷が軽減され、等価減衰定数が増加する傾向が一部の結果を除きみられた。

1. はじめに

近年、大地震時においても建物の継続使用性や損傷の抑制が要求されつつある。このため、制震構造や免震構造がある程度普及しているが、これら構造による従来の耐震設計では、コスト面および意匠面などにおいて配慮すべき課題が多くある。例えば制震構造の場合は、制振部材を設置するスペースが必要となり、意匠上の制約が増える。また免震構造の場合は、免震層を設ける必要があるため、工事費が増大する。

上記の課題を解決するため、平石らは減振構造を提案している^{1)~3)}。減振構造は、部材端部の危険断面において主筋量を減らすことにより、通常の鉄筋コンクリート造の梁よりも早期に降伏が生じ、小さな変形段階から良好なエネルギー吸収能力および減衰能力を発揮する構造である。筆者らは既に、通常の梁配筋や実際の建物への適用方法を想定した上で、減振構造の梁の実用的な構造詳細を示し、その梁のエネルギー吸収能力、減衰能力を実験的に検証している^{3),4)}。

しかしながら、小さな変形段階からより良好なエネルギー吸収能力が発揮されることを期待した短スパン梁の減振モデル⁴⁾では、 $R=1/50\text{rad}$ 以降に付着ひび割れが伸展し、エネルギー吸収能力に関する正確なデータを得られていない。また、減振として機能する主筋の全定着筋に対する断面積の比率(減振比)と、部材のエネルギー吸収能力(等価減衰定数)との関係が、これまで明らかにされていない。

本研究では、短スパン減振モデル⁴⁾に対して付着破壊に対する余裕度(付着余裕度)を高める改良を施したモデル、および減振比をパラメータとしたモデルを用いて構造実験を実施し、それぞれエネルギー吸収能力の再検証、減振比と等価減衰定数との関係の考察を行う。また、梁端部にスリット

を設け、コンクリートの損傷軽減とエネルギー吸収能力の向上を期待したモデルについても実験的検討を行う。

2. エネルギー吸収能力を検証するためのモデル

2. 1節から2. 3節に示す3つのモデルを検討対象とする。

2. 1 付着余裕度を向上させた短スパン減振モデル

短スパン減振モデル⁴⁾では、文献⁵⁾に基づき付着余裕度を算定した。ここに、付着余裕度は、付着信頼強度に対する設計用付着応力度の余裕度であり、1を下回ると付着すべりが増大あるいは付着応力度が低下する。結果として、付着余裕度は $0.7 < 1$ となり、 $R=1/50\text{rad}$ 以降において付着ひび割れが伸展した。このため、 $R=1/50\text{rad}$ における短スパン減振モデルの等価減衰定数は、非定着減振モデル⁴⁾の等価減衰定数に対して $3/4$ 倍となり、想定したエネルギー吸収能力を得ることができなかった。ここでは、せん断補強筋を既報⁴⁾よりも密に配筋した(後述するUG0.5LG0.5-S2)。

2. 2 減振比をパラメータとした通常スパン下端減振モデル

減振比の算定方法を式(1)に、試験体名称の定義を図-1に示す。既報⁴⁾における下端減振モデルは、引張鉄筋比 pt が0.5%の減振として作用する鉄筋を梁下端に有しており、また合計 $pt=1.5\%$ の曲げ耐力に有効な鉄筋を梁上下端で有し

$$\text{減振比} = \frac{\text{減振として作用する鉄筋の全断面積}}{\text{曲げ耐力に有効な鉄筋の全断面積}} \quad (1)$$



図-1 試験体名称の定義

* 技術研究所 建築技術開発部

ているため、減振比は 1/3 となる。同様の算定方法により、1/2 下端減振モデル⁴⁾の減振比は 1/2 となる。ここでは、減振比と部材のエネルギー吸収能力との関係を検証するため、既報⁴⁾とは異なる減振比を設定し、減振比 1/4(後述する U1LG0.3)および減振比 2/5(後述する U0.7LG0.5)とした。

2.3 スリットによる損傷軽減を期待した短スパンモデル

本モデルは、梁端部にスリットを設けている。これにより、梁端部の梁断面積が相対的に小さくなり、本部分への曲げひび割れの集中、延いては、非定着筋を用いた減振モデルと同等のコンクリートの損傷軽減効果およびエネルギー吸収能力の向上を期待できる。ここでは、短スパン減振モデルとの比較を行う。

3. 実験概要

3.1 試験体概要

試験体概要を表-1に、各試験体の梁断面図・平面図を図-2に示す。表-1の赤枠部分は、減振として機能する鉄筋を示している。試験体は全4体であり、文献⁶⁾を参照の上、実大の 1/2 スケールで設計した。いずれも曲げ降伏が先行する。共通の実験パラメータは、コンクリート強度 24N/mm²、梁成 350mm、梁幅 250mm である。なお、短スパン減振モデルについては、既報⁴⁾と本報の試験体を区別するため、試験体名称をそれぞれ UG0.5LG0.5-S、UG0.5LG0.5-S2 と定義した。各試験体の特徴を以下に述べる。

(1) UG0.5LG0.5-S2 (短スパン減振モデル)

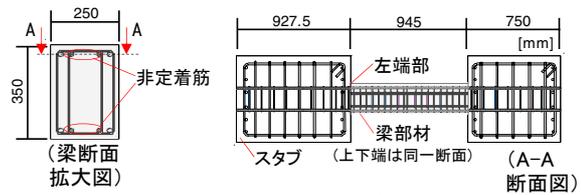
本試験体は、短スパン減振モデル⁴⁾に対し、せん断補強筋の間隔を 100mm から 50mm に変更したものである。

(2) U0.5L0.5-S-SL (短スパンスリットモデル)

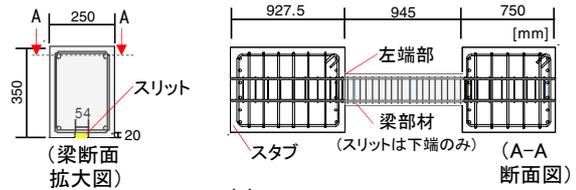
本試験体は、短スパン減振モデル⁴⁾に対し、非定着筋の代わりに梁左端部の下端にスリットを設けたものである。

(3) U1LG0.3(通常スパン下端減振 1/4 モデル)

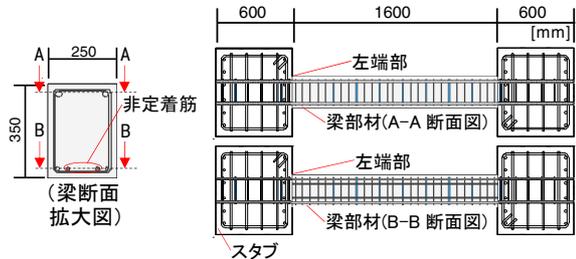
本試験体は、減振比が 1/4 に相当する配筋となっており、既報⁴⁾に示した下端減振モデル(減振比 1/3)よりも減振比が小さく、最小の減振比を与えるものである。



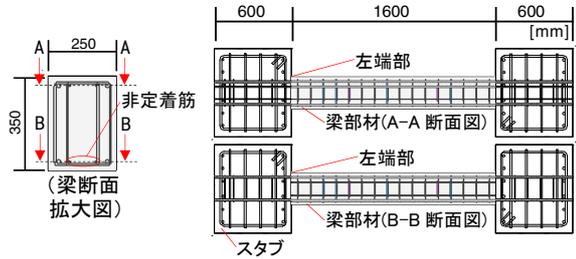
(a)UG0.5LG0.5-S2 (減振比 1)



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



(c)U1LG0.3 (減振比 1/4)



(d)U0.7LG0.5 (減振比 2/5)

図-2 各試験体の梁断面拡大図および水平断面図

表-1 試験体概要

試験体名称	短スパン減振モデル	短スパンスリットモデル	通常スパン下端減振モデル			
	UG0.5LG0.5-S2	U0.5L0.5-S-SL	U1LG0.3		U0.7LG0.5	
			上端	下端	上端	下端
コンクリート強度(N/mm ²)	24					
梁幅×梁成(mm)	250×350					
スパン(mm)	945		1600			
せん断スパン比	1.5		3.86 ^{*1}	1.25 ^{*2}	2.93 ^{*1}	2.15 ^{*2}
減振比	1	-	1/4		2/5	
曲げ耐力に 寄与する主筋	外側: 2-D16 (SD345) (上下端それぞれ)	2-D16 (SD345) (上下端それぞれ)	2-D22 (SD345)	外側: 2-D13 (SD345)	内側: 2-D10 (SD345) 外側: 2-D16 (SD345)	外側: 2-D16 (SD345)
非定着の主筋	内側: 2-D16 (SD345) (上下端それぞれ)	-	-	内側: 2-D13 (SD345)	-	内側: 2-D10 (SD345)
せん断補強筋	4-D6@50 (SD345)	2-D6@50 (SD345)	2-D6 (SD345)@60		4-D6 (SD345)@100	

*1: 上端筋降伏時

*2: 下端筋降伏時

赤枠: 減振として機能する鉄筋

(4)U0.7LG0.5(通常スパン下端減振 2/5 モデル)

本試験体は、減振比が 2/5 に相当する配筋となっており、
 下端減振モデル⁴⁾(減振比 1/3)、1/2 下端減振モデル⁴⁾(減
 振比 1/2)と比較した場合、両者の中間の減振比を与えるも
 のである。

3. 2 使用材料

試験体に使用した鉄筋およびコンクリートの材料試験結果
 をそれぞれ表-2、3に示す。

表-2 鉄筋引張試験結果

試験体	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (×10 ⁵ N/mm ²)	降伏ひずみ (%)
D6(SD345)	365.54	540.17	1.78	0.41*1
D10(SD345)	362.73	545.97	1.80	0.25
D13(SD345)	360.01	511.62	1.82	0.22
D16(SD345)	382.75	565.52	1.84	0.21
D22(SD345)	378.11	566.49	1.86	0.22

*1:0.2%オフセット法による

表-3 コンクリート圧縮試験結果

試験体	使用部分	養生方法	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (×10 ⁴ N/mm ²)
UG0.5LG0.5-S2	梁部材	気乾	28.17	2.82
U0.5L0.5-S-SL			29.18	3.10
U1LG0.3			30.86	2.96
U0.7LG0.5			31.13	2.94

3. 3 加力方法

試験体の加力は、建研式逆対称加力装置を用いて行った。
 本加力装置の詳細は、既報⁴⁾に示したものと同一である。加
 力方法は部材角制御による正負交番載荷とし、表-4に示
 す加力プログラムに基づき制御を行った。同表において、短
 スパンモデル(UG0.5LG0.5-S2、U0.5L0.5-S-SL)につい
 ては、大変形角でのデータを得るため、R=1/33rad まで加力
 を行う。また、いずれも梁の軸力が0になるよう制御している。

表-4 加力プログラム

(a) UG0.5LG0.5-S2、U0.5L0.5-S-SL

サイクル	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
変形角R (rad)	1/800	1/400	1/200	1/133	1/100	1/50	1/33						

(b) U1LG0.3、U0.7LG0.5

サイクル	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
変形角R (rad)	1/800	1/400	1/200	1/133	1/100	1/50					

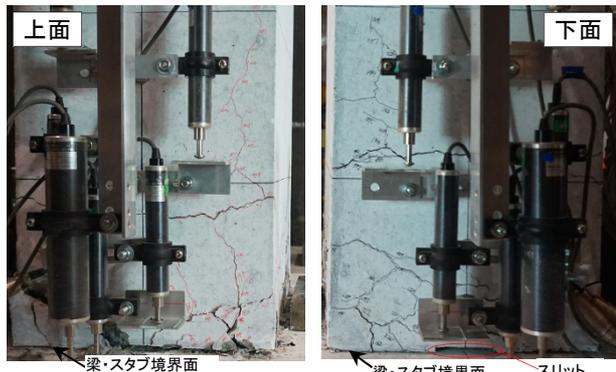
4. 実験結果および考察

4. 1 破壊性状

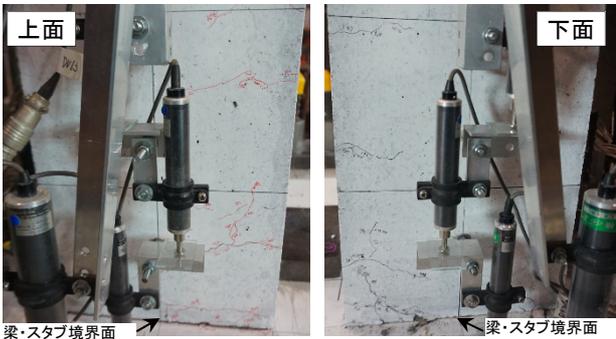
UG0.5LG0.5-S2 および U0.5L0.5-S-SL については、
 R=1/33 サイクル(13)を経験後の破壊状況を、U1LG0.3 およ
 び U0.7LG0.5 については、R=1/50 サイクル(11)を経験後の
 破壊状況を写真-1に示す。また、本写真に示した破壊状況



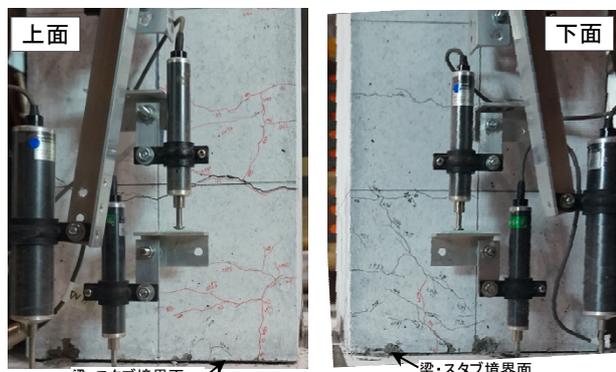
(a)UG0.5LG0.5-S2 (減振比 1、R=1/33 サイクル(13)経験後)



(b)U0.5L0.5-S-SL (R=1/33 サイクル(13)経験後)



(c)U1LG0.3 (減振比 1/4、R=1/50 サイクル(11)経験後)



(d)U0.7LG0.5 (減振比 2/5、R=1/50 サイクル(11)経験後)

写真-1 試験体の破壊状況(梁左端部近傍)

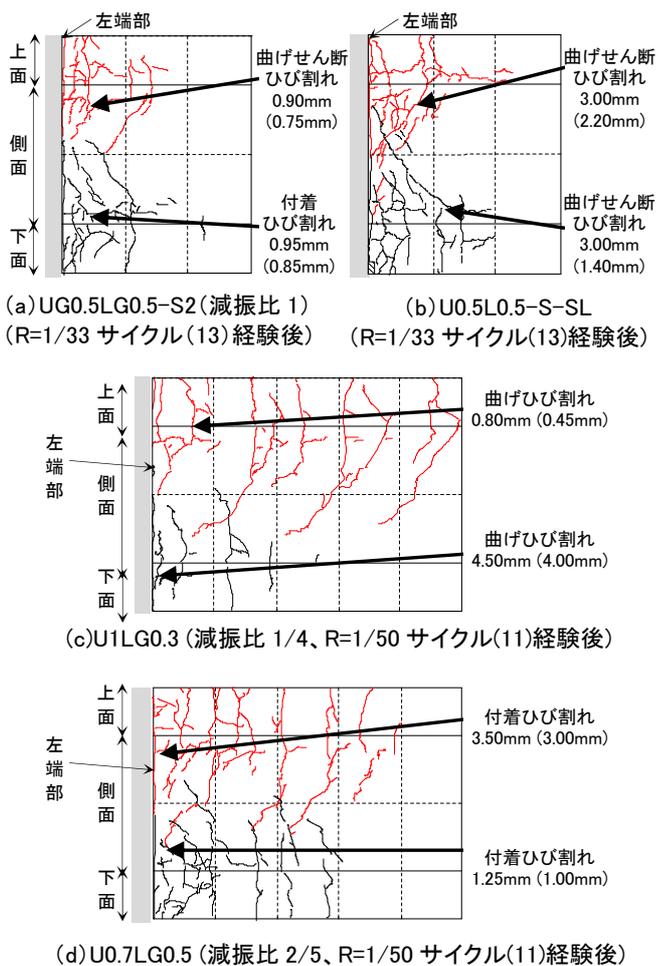


図-3 試験体のひび割れ状況(梁左端部近傍)

と対応するひび割れ状況を図-3に示す。なお、図-3の括弧内は残留ひび割れ幅を示す。また、上記はいずれも梁左端部の近傍における結果を示している。

(1)UG0.5LG0.5-S2(減振比 1)

R=1/800 サイクルにおいて梁端部に曲げひび割れが発生し、R=1/400 サイクルでは曲げせん断ひび割れと主筋に沿うひび割れが発生した。その後、曲げせん断ひび割れと主筋に沿うひび割れは伸展し、R=1/33 サイクルではひび割れ幅がそれぞれ最大となった。

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

U0.5L0.5-S-SLはR=1/133 サイクルまでUG0.5LG0.5-S2と同様の破壊性状を示したものの、R=1/100 サイクル以降は、前者の方が梁上下面に多くの曲げひび割れが発生した。その後、R=1/33 サイクルでは曲げせん断ひび割れの幅が最大となり、UG0.5LG0.5-S2と比べて大きなひび割れ幅となった。

(3)U1LG0.3(減振比 1/4)

R=1/800 サイクルにおいて梁端部に曲げひび割れが発生し、R=1/400 サイクルでは曲げせん断ひび割れと主筋に沿うひび割れが発生した。その後、これらひび割れは伸展したが、

梁上面の方が下面よりも広範囲にひび割れが発生した。これは、梁下端が減振構造であり、下端に引張応力が生じたとき梁端部に変形が集中し、結果として梁下面への損傷が低減されたためと考えられる。R=1/50 サイクルにおいて、梁端部の曲げひび割れの幅は梁下端(減振側)で最も大きくなった。

(4)U0.7LG0.5(減振比 2/5)

U0.7LG0.5はU1LG0.3と同様の破壊性状を示した。また、梁上面におけるひび割れの発生した範囲については、U0.7LG0.5の方がU1LG0.3よりも小さくなっている。R=1/50 サイクルにおいて、梁端部の曲げひび割れの幅は梁下端(減振側)で最も大きくなった。

4.2 曲率分布

正加力時(梁左端部の梁下端に引張応力が生じる場合)における各試験体の曲率分布を図-4に示す。同図において、梁下端に引張応力を生じさせる曲げモーメント(曲率)の向きを正としている。

UG0.5LG0.5-S2はU0.5L0.5-S-SLと比べ、小さな変形レベルから梁の両端部に変形が集中した。一方、U0.5L0.5-S-SLでは、スリットを設置した梁左端部において、変形の集中がみられなかった。

U1LG0.3およびU0.7LG0.5では、減振構造とした梁下端に引張応力が生じる場合、小さな変形レベルから梁端部に変形が集中した。一方、減振構造ではない梁上端に引張応力が生じる場合、梁端部に変形は集中しなかった。このことは、4.1節(3)において述べた考察を裏付けるものである。

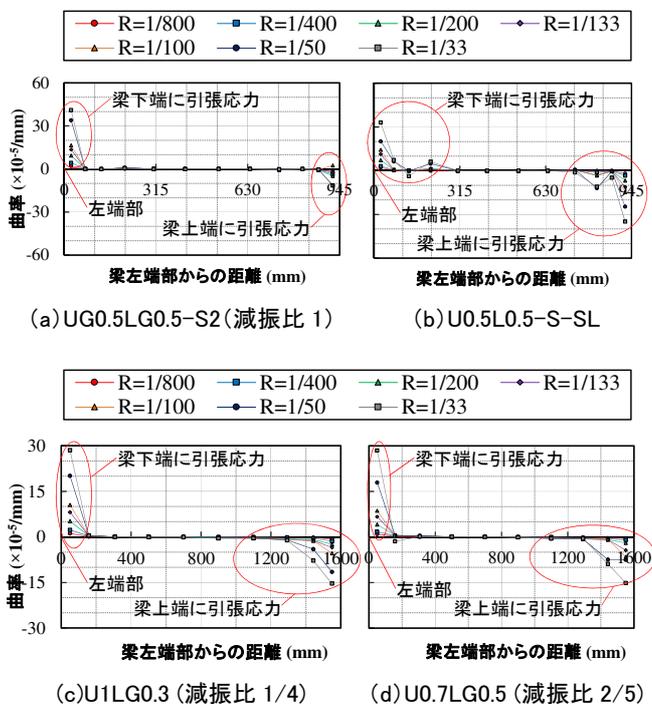


図-4 曲率分布

4.3 実験値と理論値

各試験体の実験値および理論値を表-5に示す。曲げ終局強度の理論値 Q_{mu} は学会略算式⁷⁾より、せん断終局強度の理論値 Q_{su} は荒川 mean 式⁷⁾より求めた。付着信頼強度 τ_{bu} および設計用付着応力度 τ_f は文献⁸⁾より算出し、付着余裕度が最も小さい場合について示した。同表において、いずれの試験体もせん断余裕度は 2 以上、付着余裕度は 1.5 以上である。また、UG0.5LG0.5-S2 (せん断補強筋間隔 50mm) は、UG0.5LG0.5-S⁴⁾ (せん断補強筋間隔 100mm) と比べて、付着余裕度が 0.7⁴⁾から 1.5 に増加している。

いずれの結果も、実験値の最大耐力 Q_{max} が曲げ終局強度の理論値 Q_{mu} を上回っている。

4.4 せん断力-変形角関係

UG0.5LG0.5-S2 および U0.5L0.5-S-SL のせん断力-変形角関係を図-5に、U1LG0.3 および U0.7LG0.5 のせん断力-変形角関係を図-6に示す。同図には、実験値の最大耐力および曲げ終局時せん断力の理論値⁷⁾を併せて示している。

図-5において、いずれの結果も $R=1/33\text{rad}$ のとき最大耐力がみられた。また、UG0.5LG0.5-S2 および U0.5L0.5-S-SL では、それぞれ $R=1/50\text{rad}$ の 2 サイクル目、 $R=1/33\text{rad}$ の 2 サイクル目において、履歴特性にスリップ性状がみられた。これは、4.5節で後述するように、梁端部とスタブとの境界面における滑り変位が卓越したためと考えられる。

表-5 実験値と理論値

試験体名称		曲げ終局時せん断力		せん断終局強度		実験値 (最大耐力)	付着余裕度
		理論値	実験値/理論値	理論値	せん断余裕度		
		Q_{mu} (kN)	Q_{max}/Q_{mu}	Q_{su} (kN)	Q_{su}/Q_{mu}		
UG0.5LG0.5-S2		91.2	1.3	198.6	2.2	120.0	1.5
U0.5L0.5-S-SL		91.2	1.3	201.2	2.2	120.5	1.5
U1LG0.3	上端	68.4	1.3	147.7	2.2	85.7	1.5 (梁上端)
	下端			208.1	3.0		
U0.7LG0.5	上端	63.5	1.3	128.6	2.0	82.2	1.8 (梁上端)
	下端			146.5	2.3		

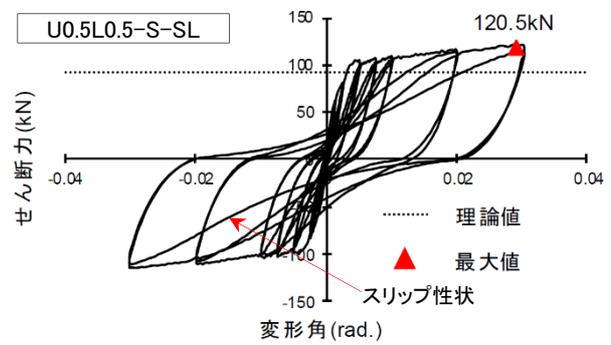
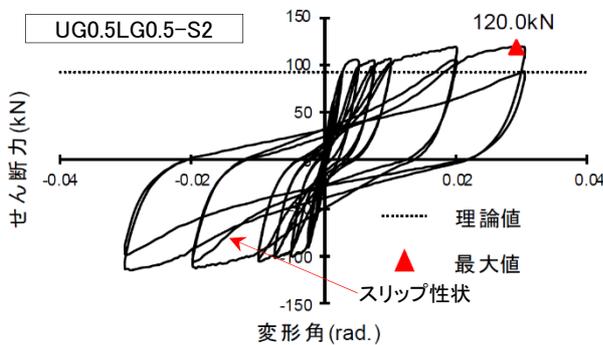


図-5 せん断力-変形角関係 (短スパン減振モデル、短スパンスリットモデル)

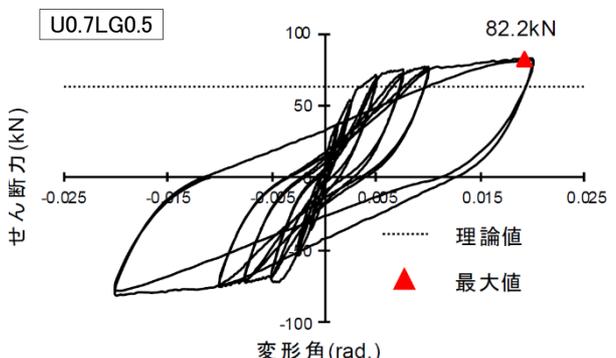
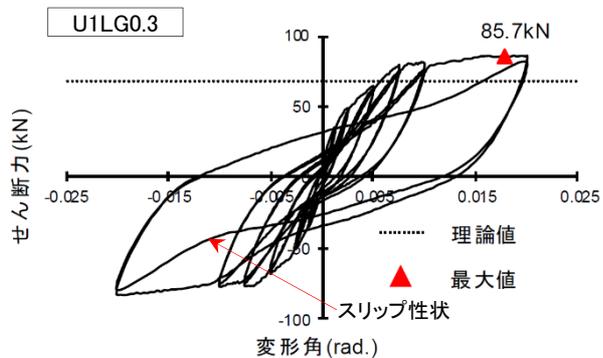


図-6 せん断力-変形角関係 (通常スパン下端減振 1/4 モデル、減振 2/5 モデル)

図-6において、いずれの結果も $R=1/50\text{rad}$ のとき最大耐力がみられた。また、U1LG0.3では、 $R=1/50\text{rad}$ の2サイクル目において履歴特性にスリップ性状がみられた。一方、U0.7LG0.5では、加力の終了まで安定した履歴性状がみられた。梁端部-スタブ境界面における滑り変位と減振比との間には相関関係があるものと推察されるが、今後更なる検証が必要である。

4.5 スリップ性状

各試験体における、梁の曲げ変形と変形角の関係および滑り変位と変形角の関係を図-7に示す。梁の曲げ変形は、梁左端部近傍で計測した梁断面の回転角 θ に対し、梁左端部から θ の計測点までの距離 h を乗じて算出し、 $\theta \cdot h$ と定義した。滑り変位は、梁端部-スタブ境界面における滑り量を表しており、 δ_s と定義した。また、 δ_s は式(2)より求めた。ここに、 δ_h は $h=100\text{mm}$ において計測した梁成方向の変位であり、梁の曲げ変形および境界面の滑り量を含んだ値である。なお、 θ は短スパンモデル、通常スパン下端減振モデルにおいて、それぞれ $h=50\text{mm}$ 、 100mm の位置での計測値を用いている。

$$\delta_s = \delta_h - \theta \cdot h \quad (2)$$

全ての試験体において、梁の曲げ変形は概ね同じ値を示したが、滑り変位 δ_s についてはモデル間で差が生じた。U1LG0.3とU0.7LG0.5の通常スパン下端減振モデルでは、曲げ変形に対して滑り変位がかなり小さい値を示している。

一方、UG0.5LG0.5-S2とU0.5L0.5-S-SLの短スパンモデルでは、通常スパン下端減振モデルと比べて滑り変位が大きくなっている。また、UG0.5LG0.5-S2では、 $R=1/50$ サイクルにおいて滑り変位が卓越している。これらの実験事実は、通常スパンモデルと比べて短スパンモデルの梁曲げ剛性が大きく、その結果、梁成方向の変位 δ_h において滑り変位 δ_s の占める割合が増加したことが一因と考えられる。

4.6 降伏変形角

各試験体におけるせん断力-変形角関係の包絡線を図-8に示す。同図には、既報⁴⁾に示した通常の配筋法による試験体U1L1(通常モデル)、UG0.5LG0.5(非定着減振モデル)、U0.5LG0.5(1/2 下端減振モデル)、U1LG0.5(下端減振モデル)の結果を併せて示している。

図-8(a)において、UG0.5LG0.5-S2とU0.5L0.5-S-SLの初期剛性はほぼ同じ値を示したものの、前者の方がやや早期に降伏した。また、UG0.5LG0.5-S2の降伏変形角は、U0.5L0.5-S-SLに対して約9/10、U1L1(通常モデル)に対しては約1/2となった。

図-8(b)において、U1LG0.3(減振比1/4)とU0.7LG0.5(減振比2/5)の初期剛性は、U1L1とほぼ同じ値を示した。梁下端筋の降伏変形角は、U1LG0.3、U1LG0.5(減振比

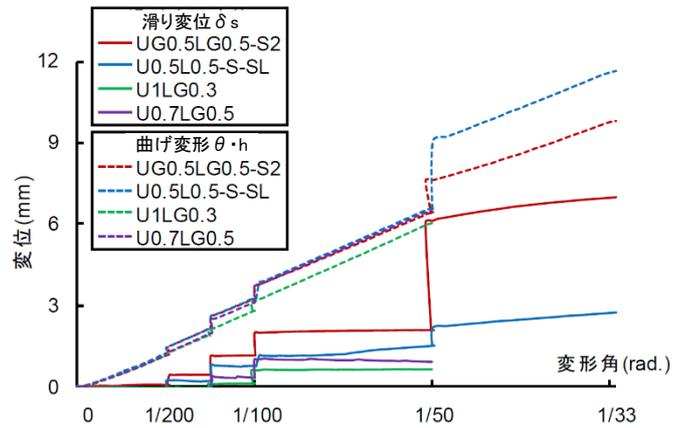
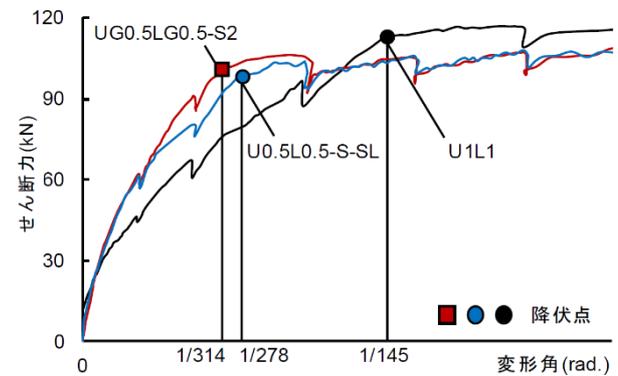
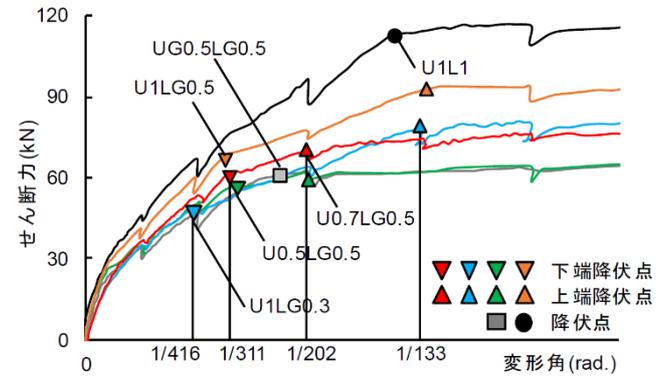


図-7 梁の曲げ変形・滑り変位と変形角の関係



(a)短スパン減振モデル、短スパンスリットモデル



(b)通常スパン下端減振1/4モデル、減振2/5モデル

図-8 せん断力-変形角関係の包絡線

1/3)、U0.7LG0.5、U0.5LG0.5(減振比1/2)、UG0.5LG0.5(減振比1)の順で大きくなっている。すなわち減振比の増加に伴い、梁下端筋の降伏変形角は大きくなるのがわかった。

一方、梁上端筋の降伏変形角については、U0.7LG0.5(減振比2/5)とU0.5LG0.5(減振比1/2)でほぼ同一の値、U1LG0.3(減振比1/4)とU1LG0.5(減振比1/3)でほぼ同一の値となり、前者(減振比=2/5~1/2)は後者(減振比=1/4~1/3)よりも降伏変形角が2/3倍程度小さくなっている。また、UG0.5LG0.5(減振比1)の降伏変形角は、U0.7LG0.5(減振

比 2/5) および U0.5LG0.5 (減振比 1/2) と比べて小さくなっている。以上のことから、梁上端筋については減振比の増加に伴い、降伏変形角は小さくなることがわかった。

4.7 等価減衰定数

各試験体における等価減衰定数を図-9に示す。同図(a)には、梁端部とスタブとの境界面における滑りの影響を考慮した場合の結果を併せて示している。また、同図(b)には、既報⁴⁾に示した U1L1 (通常モデル)、UG0.5LG0.5 (非定着減振モデル)、U0.5LG0.5 (1/2 下端減振モデル)、U1LG0.5 (下端減振モデル) の結果を併せて示している。

図-9(a)において、境界面における滑りの影響を考慮しない場合、 $R=1/50\text{rad}$ までは UG0.5LG0.5-S2 と U0.5L0.5-S-SL の等価減衰定数に有意な差はみられないが、 $R=1/50\text{rad}$ 以降は、前者の方が後者よりも等価減衰定数が大きくなっている。ここで、4.5節に示したように、短スパンモデルでは梁成方向の変位 δ_h において滑り変位 δ_s の占める割合が比較的大きい。したがって、UG0.5LG0.5-S2 と U0.5L0.5-S-SL については、等価減衰定数の詳細な検討を行うため、滑りの影響を考慮して比較検討を行う。

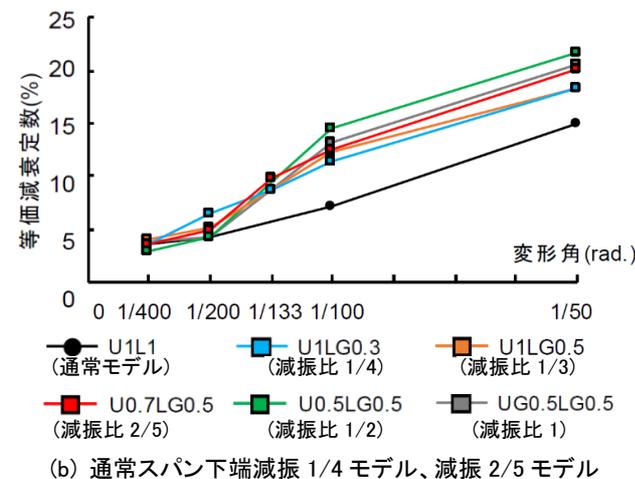
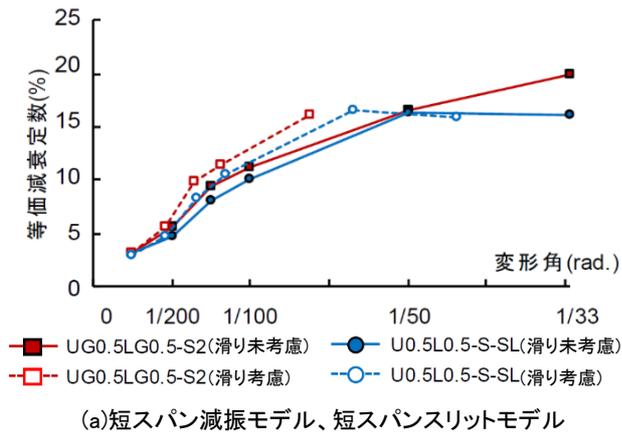


図-9 等価減衰定数と変形角の関係

境界面の滑りの影響を考慮した場合、 $R=1/200\text{rad}$ 以降において UG0.5LG0.5-S2の方が U0.5L0.5-S-SLよりも等価減衰定数が大きな値を示している。また、滑りの影響を考慮しない場合と比べ、UG0.5LG0.5-S2と U0.5L0.5-S-SLの等価減衰定数はそれぞれ1~2割大きくなっている。以上のことから、短スパン梁を減振構造とする場合は、境界面にシアキーなどを設け、梁端部の滑りを防止することがエネルギー吸収能力を向上させる上で重要であると考えられる。

図-9(b)において、減振比が1/4と最も小さい U1LG0.3でも、 $R=1/200\sim 1/50\text{rad}$ の等価減衰定数は、U1L1 (通常モデル) と比べてかなり大きい値を示した。また、 $R=1/100\sim 1/50\text{rad}$ において、U1LG0.3 (減振比 1/4)、U1LG0.5 (減振比 1/3)、U0.7LG0.5 (減振比 2/5)、U0.5LG0.5 (減振比 1/2)、UG0.5LG0.5 (減振比 1) では、U0.5LG0.5を除き、減振比の増加に伴い等価減衰定数が増加している。なお、減振比が1/2である U0.5LG0.5では、 $R=1/100\sim 1/50\text{rad}$ において最も大きい等価減衰定数の値を示した。

4.8 短スパンモデルのエネルギー吸収能力

4.8.1 短スパン減振モデル

既報⁴⁾に示した UG0.5LG0.5-S (付着余裕度 0.7) および UG0.5LG0.5-S2 (付着余裕度 1.5) における等価減衰定数の比較を図-10に示す。同様に、最終サイクル経過後におけるひび割れ状況の比較を図-11に示す。

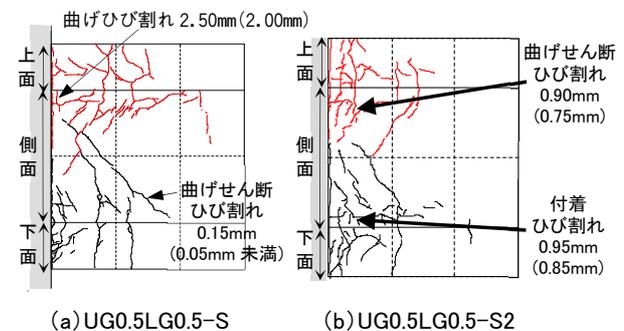
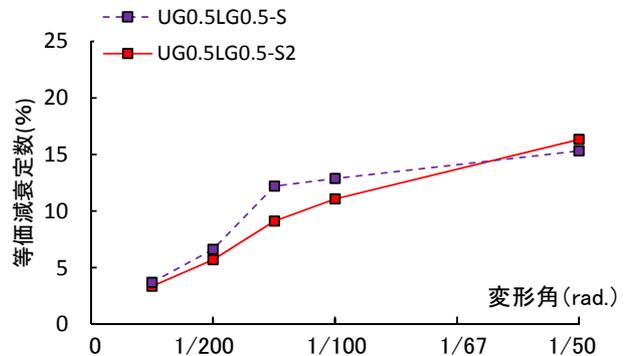


図-11 ひび割れ状況の比較 (最終サイクル終了時)

図-10において、 $R=1/67$ radまでは、UG0.5LG0.5-Sの等価減衰定数の方がUG0.5LG0.5-S2よりも大きくなっているが、 $R=1/67\sim 1/50$ radでは、後者の方が前者よりも等価減衰定数が大きくなっている。図-11において、UG0.5LG0.5-Sの方がUG0.5LG0.5-S2と比べ、梁側面上端における付着ひび割れが広範囲に発生している。

以上のことから、短スパン減振モデルにおける付着余裕度の向上は、付着ひび割れの抑制に対して若干の効果がみられたものの、等価減衰定数の増加には至らない結果となった。

4.8.2 短スパンスリットモデル

U0.5L0.5-S-SLとUG0.5LG0.5-S2のひび割れ状況および曲率分布の比較においては、4.1節、4.2節で述べたように、前者の方が後者よりも梁上下面に多くの曲げひび割れが発生した。また、4.7節に示した、梁端部とスタブとの境界面における滑りの影響を考慮した等価減衰定数は、 $R=1/200$ rad以降においてU0.5L0.5-S-SLの方がUG0.5LG0.5-S2よりも小さい値を示した。

以上のことから、梁端部におけるスリットの設置が、コンクリートの損傷軽減および部材のエネルギー吸収能力の向上に寄与する効果は、減振モデルよりも小さいと考えられる。

4.9 減振比と等価減衰定数との関係

既報⁴⁾より、U1LG0.5(下端減振モデル)、U0.5LG0.5(1/2 下端減振モデル)、UG0.5LG0.5(非定着減振モデル)における、 $R=1/50$ サイクル終了時のひび割れ状況を図-12に示す。同図にはU1LG0.3、U0.7LG0.5の $R=1/50$ サイクル終了時におけるひび割れ状況を併せて示している。

図-12において、減振比の増加に伴い、梁上面におけるひび割れの発生範囲が小さくなっている。したがって、通常スパン減振モデルについては、減振比の増加に伴い、コンクリートの損傷軽減効果は向上することがわかった。

また、4.7節で述べたように、U0.5LG0.5(減振比 1/2)を除き、減振比の増加に伴い等価減衰定数が増加した。これは、減振比の増加により梁上面におけるコンクリートの損傷が軽減され、結果として部材のエネルギー吸収能力が向上したためと考えられる。

5. まとめ

本研究では、非定着筋の代わりに梁下端にスリットを設けたモデル(U0.5L0.5-S-SL)、既報⁴⁾に示した短スパン梁の減振モデル(UG0.5LG0.5-S)に対して、付着余裕度を高める改良を施したモデル(UG0.5LG0.5-S2)、および減振比をパラメータとし、梁下端のみを減振構造としたモデル(U1LG0.3、U0.7LG0.5)を用いて構造実験を実施し、エネルギー吸収能力の検証、減振比と等価減衰定数との関係の考察を行った。結果を以下に示す。

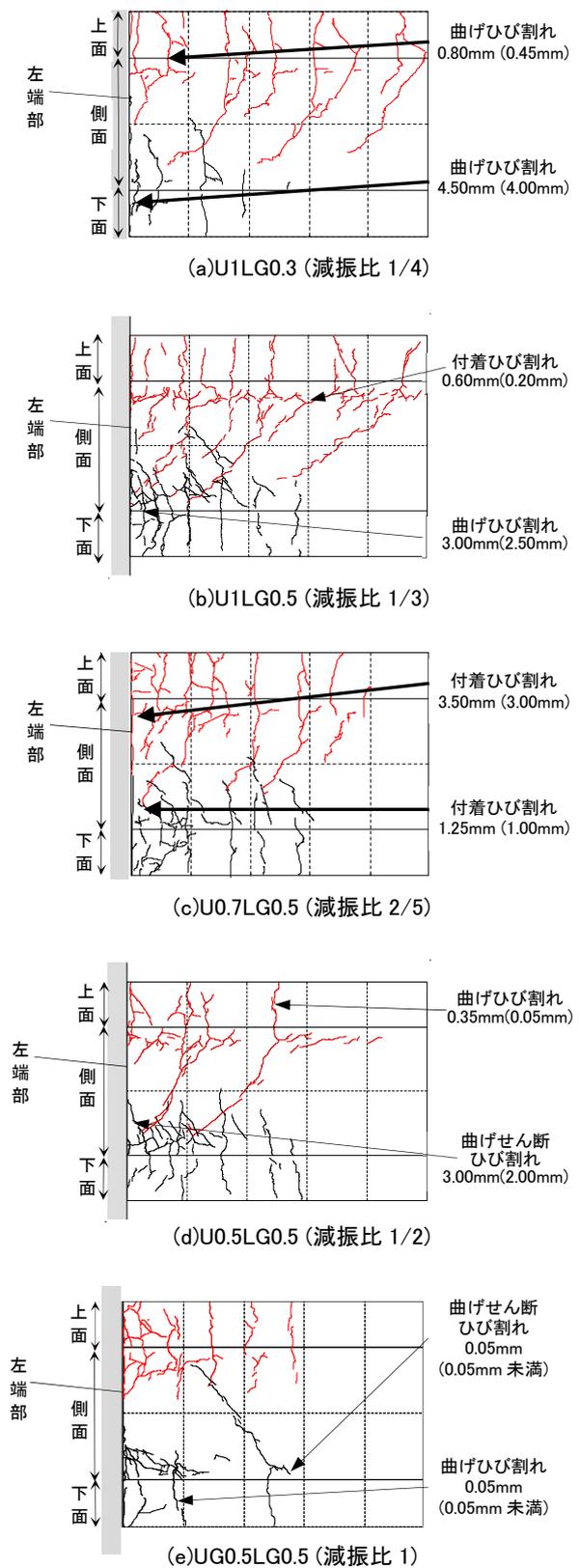


図-12 通常スパン減振モデルにおけるひび割れ状況比較($R=1/50$ サイクル(11)経験後)

- (1) UG0.5LG0.5-S2 および U0.5L0.5-S-SL では、それぞれ $R=1/50\text{rad}$ の 2 サイクル目、 $R=1/33\text{rad}$ の 2 サイクル目において、履歴特性にスリップ性状がみられた。これは、梁端部とスタブとの境界面における滑り変位が卓越したためと考えられる。
- (2) 梁端部とスタブとの境界面における滑りを考慮した、UG0.5LG0.5-S2 と U0.5L0.5-S-SL における等価減衰定数は、境界面の滑りを考慮しない場合と比べてそれぞれ、1~2 割大きくなった。また、 $R=1/200\text{rad}$ 以降における等価減衰定数は、U0.5L0.5-S-S2の方がU0.5L0.5-S-SLと比べて大きい値を示した。以上より、短スパン梁を減振構造とする場合は、境界面にシアキーなどを設け、梁端部の滑りを防止することがエネルギー吸収能力を向上させる上で重要であると考えられる。
- (3) U0.5L0.5-S-SLの方がUG0.5LG0.5-S2よりも、梁上下面に多くの曲げひび割れが発生し、等価減衰定数も小さくなった。このことから、スリットの設置がコンクリートの損傷軽減およびエネルギー吸収能力の向上に寄与する効果は、減振モデルよりも小さいと考えられる。
- (4) UG0.5LG0.5-S⁴⁾(付着余裕度 0.7)とUG0.5LG0.5-S2(付着余裕度 1.5)の比較において、付着余裕度の向上は、付着ひび割れの抑制に対して若干の効果がみられたものの、等価減衰定数の増加には至らない結果となった。
- (5) U1LG0.3、U0.7LG0.5 では減振構造とした梁下端に引張応力が生じる場合、梁端部に曲げひび割れ・変形が集中した。
- (6) U1LG0.3 では、 $R=1/50\text{rad}$ の 2 サイクル目において履歴特性にスリップ性状がみられた。一方、U0.7LG0.5 では、加力の終了まで安定した履歴性状がみられた。
- (7) 既報⁴⁾に示した、通常スパン梁の下端のみを減振としたモデルU1LG0.5(減振比 1/3)、U0.5LG0.5(減振比 1/2)のひび割れ状況と、U1LG0.3(減振比 1/4)、U0.7LG0.5(減振比 2/5)のひび割れ状況との比較により、減振比の増加に伴って損傷軽減効果は向上することがわかった。
- (8) 同様に、U0.5LG0.5を除き、減振比の増加に伴い等価減衰定数が増加した。これは、減振比の増加により梁上面におけるコンクリートの損傷が軽減され、結果として部材のエネルギー吸収能力が向上したためと考えられる。

【謝辞】

本実験は、明治大学理工学部建築学科 平石久廣教授との共同研究により実施したものである。平石久廣教授および建築構造第1研究室の大塚悠里氏、小池浩香氏、小川稜平氏、西田規朗氏、伊藤美瑛氏に深く謝意を表する。

【参考文献】

- 1) 加賀朱音, 寶部諒, 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実用化に関する研究(その 4 減振フレームモデルの解析概要), pp279-280, 2018年8月
- 2) 寶部諒, 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実用化に関する研究(その 5 減振フレームモデルの解析結果), pp279-280, 2018年8月
- 3) 小池浩香, 沢柳佑奈, 木村裕太, 加賀朱音, 大塚悠里, 前島克朗, 富田祐介, 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的開発研究(その 3 降伏変形角、定常ループ、等価減衰定数), pp11-12, 2018年8月
- 4) 富田祐介, 前島克朗:減振機能を有する鉄筋コンクリート造梁の応用開発, 五洋建設株式会社技術年報 vol.48, 2018年
- 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, 1999年
- 6) 日本建築防災協会:構造設計・部材断面事例集, 2007年
- 7) 建築物の構造関係技術基準解説書編集委員会:建築物の構造関係技術基準解説書, 2015年