

座屈抑制エレメントを用いた 鉄筋コンクリート橋脚の配筋技術の開発

松 林 卓 山 田 尚 義^{*1}

原 夏 生 三 島 徹 也

請 川 誠^{*2} 村 井 和 彦^{*2}

要 旨

近年、耐震基準の強化に伴い、鉄筋コンクリート構造においては、地震時における塑性変形性能の向上が不可欠となっている。塑性変形性能に優れた鉄筋コンクリート構造を実現するためには、帯鉄筋、中間帯鉄筋等を適切に配置し、せん断破壊を防止するとともに、軸方向鉄筋の座屈を防ぎ、コアコンクリートを適切に拘束することが必要となる。一方、このような耐震設計上の要求を満足させると、現場における鉄筋の施工作業が非常に煩雑になるとともに、コンクリートの確実な充填性についても注意が必要となるなど、所定の品質を確保するための課題が生じている。

このような現状を踏まえ、従来の中間帯鉄筋が受け持つ機能をせん断補強と軸方向鉄筋の座屈抑制に分離して考え、軸方向鉄筋の座屈抑制に関しては中間帯鉄筋を貫通させることなく、コアコンクリートに定着させる構造を考案し、さらに、現場施工の簡便性を考慮した座屈抑制方法を開発した。

実験の結果、従来の中間帯鉄筋を新しい座屈抑制構造に置き換えた構造について、従来と同等の耐震性能を有することが確認された。

キーワード 耐震性能 / 座屈抑制 / 中間帯鉄筋 / 施工性 / 定着 / 座屈抑制エレメント

目 次

- | | |
|----------------------------|---------------------|
| 1．はじめに | 3．座屈抑制エレメントの提案 |
| 2．座屈抑制が部材のじん性向上に寄与する効果について | 4．正負交番載荷試験による耐震性能実験 |
| | 5．まとめ |

DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGY OF HIGHLY DURABLE RC STRUCTURE USING ANTI BUCKLING ELEMENTS

Taku MATSUBAYASHI

Natsuo HARA

Makoto UKEGAWA

Takayoshi YAMADA

Tetsuya MISHIMA

Kazuhiko MURAI

Synopsis:

The improvement of the plasticity transformation performance is indispensability at the time of an earthquake in reinforced concrete structure, along with the strength of an earthquake resistance standard, in recent years. It becomes necessary to prevent shear destruction and buckling reinforcement bars and to restrain core concrete by reinforcement bars, to materialize excellent reinforced concrete structure to plasticity transformation performance. On the other hand, when such a demand is satisfied, reinforcement bars becoming difficult to assemble it and it becomes difficult to fill up concrete.

Such a present condition based on, we developed new buckling control structure without being penetrating a concrete section.

As a result of experiments the structure that replaced a conventional reinforcement bar to new buckling control structure was confirmed that it has the earthquake resistance performance equivalent to formerly.

* 1 中部支店 名古屋星崎作業所

* 2 戸田建設株式会社 土木本部

1. はじめに

近年、耐震基準の強化に伴い、鉄筋コンクリート構造においては、地震時における塑性変形性能の向上が不可欠となっている。塑性変形性能に優れた鉄筋コンクリート構造を実現するためには、帯鉄筋、中間帯鉄筋等を適切に配置し、せん断破壊を防止するとともに、軸方向鉄筋の座屈を防ぎ、コアコンクリートを適切に拘束することが必要となる。一方、このような耐震設計上の要求を満足させると、現場における鉄筋の施工作业が非常に煩雑になるとともに、コンクリートの充填性についても注意が必要となるなど、所定の品質を確保するための課題が生じている。

このような現状を踏まえ、従来の中間帯鉄筋が受け持つ機能をせん断補強と軸方向鉄筋の座屈抑制に分離して考え、軸方向鉄筋の座屈抑制に関しては中間帯鉄筋を貫通させることなく、コアコンクリートに定着させる構造を考案し¹⁾、さらに、現場施工の簡便性を考慮した座屈抑制部材を開発した。本報では、座屈抑制が部材のじん性向上に寄与する効果について考察を行い、座屈抑制エレメントの提案を行う。さらに正負交番載荷試験を行った実験結果に基づき、座屈抑制エレメントによるじん性向上効果について述べるものである。

2. 座屈抑制が部材のじん性向上に寄与する効果について

図 - 1 は、交番荷重下で曲げ破壊を生ずる鉄筋コンクリート部材の荷重 - 変位関係を模式的に示したものである²⁾。軸方向鉄筋の降伏後 (B 点)、最大耐力 C 点に至る。C 点では、かぶりコンクリートの剥落や軸方向鉄筋の座屈が生じる。軸方向鉄筋が座屈するとコアコンクリートの圧壊が進行し D 点に至る。C 点への到達を抑制することが、部材の塑性変形性能を向上させることにつながる。

図 - 2 は、矩形断面橋脚モデル正負交番載荷試験体における柱基部の軸方向鉄筋の応力 - ひずみ関係の履歴の一例を示したものである³⁾。本試験体では、 $8\delta_y$ (δ_y : 軸方向鉄筋の降伏時変位) の載荷時に軸方向鉄筋の座屈が確認されている。軸方向鉄筋は圧縮時においては、降伏応力程度の軸圧縮力を負担しつつも、正のひずみを示している。つまり、軸方向鉄筋が座屈するまでは、断面における圧縮力のかなりの部分を軸方向鉄筋が負担しているのである。軸方向鉄筋の座屈後は、鉄筋により分担されていた圧縮力がコンクリートに作用し、コンクリートが圧壊することで耐力の低下が生じる。すなわち、軸方向鉄筋の座屈を抑制することが、図 - 1 における C 点への到達を抑制することになるものと考えられる。

3. 座屈抑制エレメントの提案

上述したような座屈の抑制による塑性変形の確保は、通常の鉄筋コンクリート構造においては、帯鉄筋および

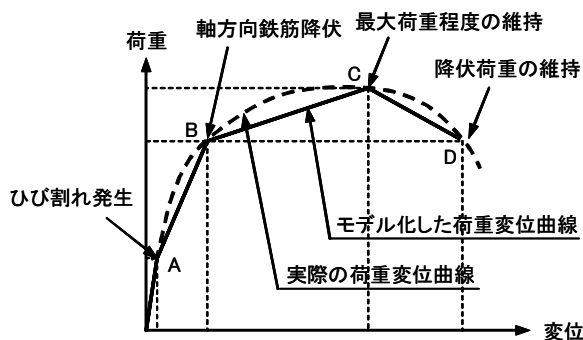


図 - 1 鉄筋コンクリート部材の荷重-変位関係の模式図²⁾

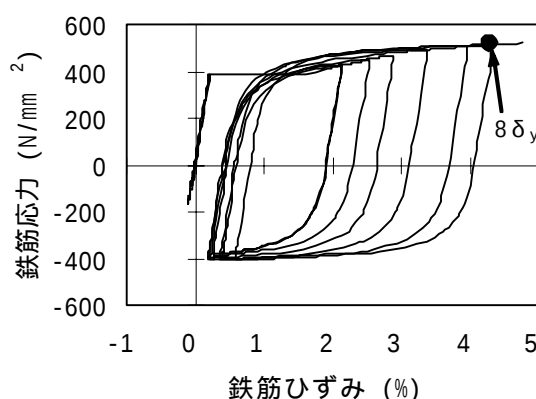


図 - 2 橋脚試験体柱基部の軸方向鉄筋の応力 - ひずみ履歴の例³⁾

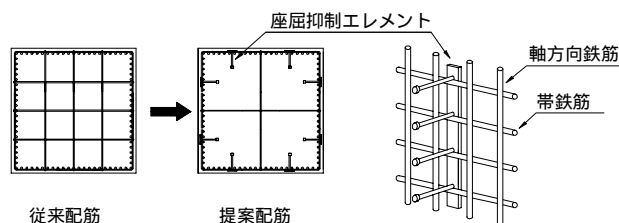


図 - 3 座屈抑制エレメントを用いた配筋の概念

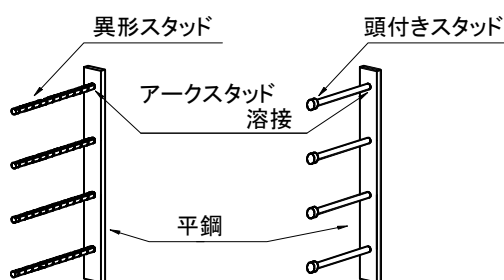


図 - 4 座屈抑制防止エレメント

中間帯鉄筋によって、軸方向鉄筋を拘束することでなされる。中間帯鉄筋の機能に関して、交番荷重下でせん断破壊を生じさせないためのせん断補強機能と軸方向鉄筋の座屈抑制機能に分けて考え、所定のせん断耐力が確保された状態では、座屈抑制機能については、必ずしも、中間帯鉄筋は貫通している必要はなく、コアコンクリートに確実に定着されていれば、座屈抑制機能は発揮されるものと考えることができる。このような考え方に基づく、鉄筋コンクリート部材の配筋のイメージを従来の配筋との比較と併せて図 - 3 に示す。中間帯鉄筋のコアコンクリートへの定着方法については、種々の方法が考えられるが、本研究においては、図 - 4 に示すような、異形スタッドあるいは、頭付きスタッドを帯鋼材にアークスタッド溶接にて接合したものをを用いた。以下、本研究では「座屈抑制エレメント」と称する。座屈抑制エレメントにおけるスタッド材の定着長は、異形スタッドに関しては、鉄筋の基本定着長を、頭付きスタッドについては、コンクリートのコーン破壊耐力がスタッド材の降伏耐力を上回るように設定すればよいと考えている。

4. 正負交番載荷試験による耐震性能実験

4.1 試験体の概要

座屈抑制エレメントによるじん性向上効果を検討するために、貫通中間帯鉄筋を用いた構造を基準として、図 - 5 に示すようなフローで座屈抑制エレメントへの置き換えを行った試験体を製作することとした。ここで、基準試験体とする貫通中間帯鉄筋を用いた試験体は、独立

行政法人土木研究所が実施したものである⁴⁾。代表して M - 3 試験体を図 - 6 に示す。

No.1 および No.2 試験体は、中間帯鉄筋がなくても計算上せん断破壊しない構造である M-3 試験体を基準とし、中間帯鉄筋のすべてを座屈抑制エレメントに置き換えたものである。

No.3 試験体は、No.2 に対して、座屈抑制エレメント

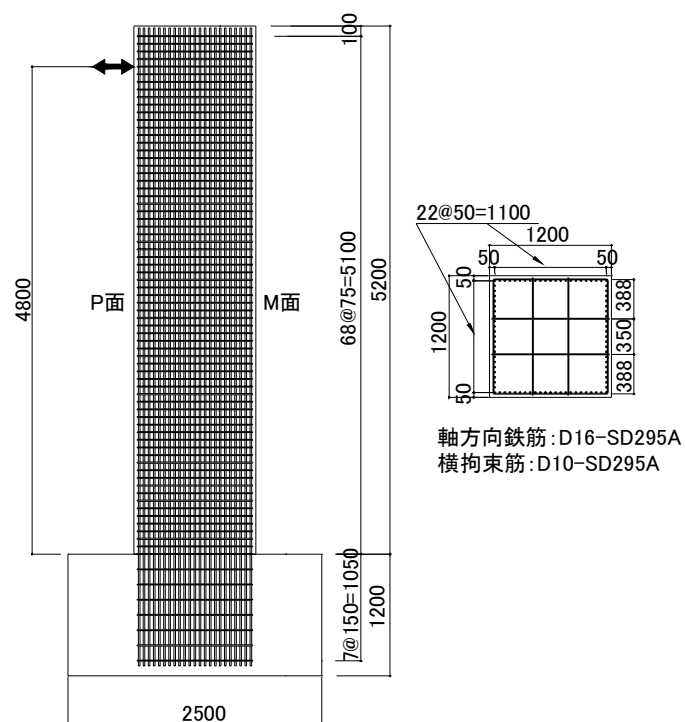


図 - 6 M - 3 試験体

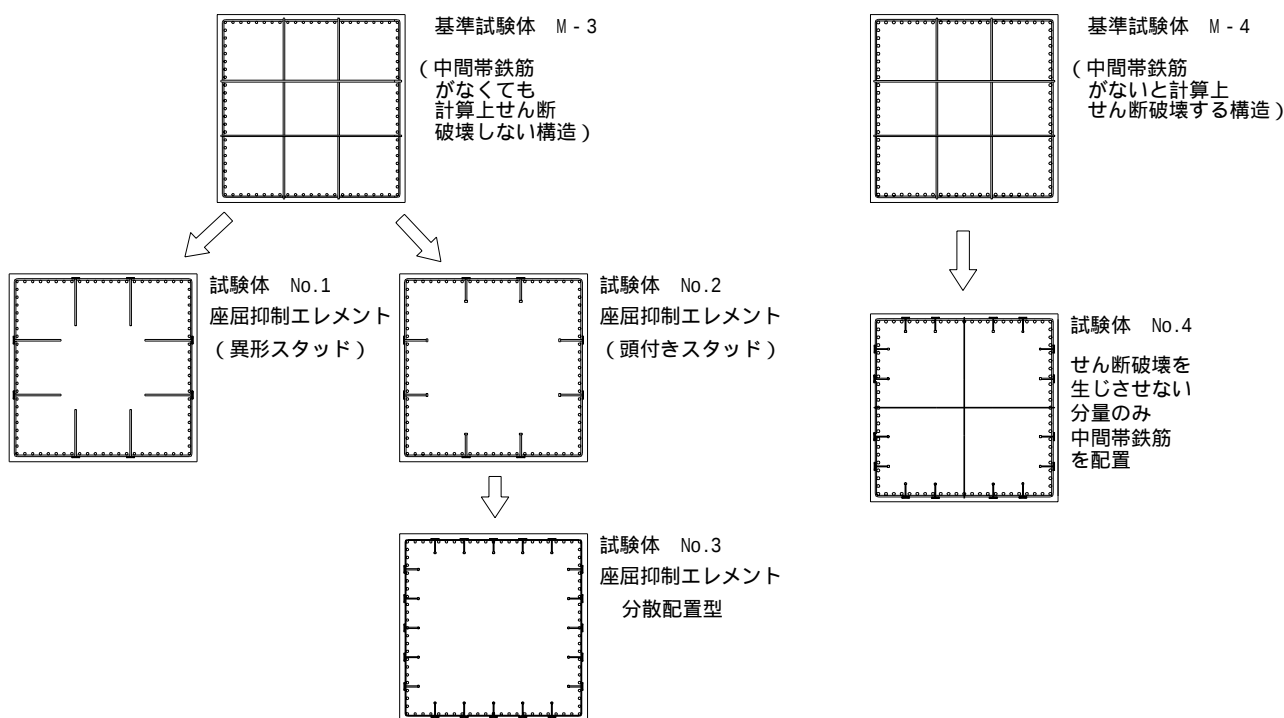


図 - 5 座屈抑制エレメントを用いた配筋

を分散配置したものである。従来の貫通中間帯鉄筋の施工では、作業者が断面内部で作業する必要があることから、1 m 程度の間隔で配筋されている。一方、座屈抑制エレメントを用いる場合においては、軸方向鉄筋および帯鉄筋を配筋したのち、外部よりエレメントを設置することができるので、任意の間隔で配置することが可能となる。No.3 試験体はこれを想定したものである。

No.4 試験体は、作用せん断力が大きく、中間帯鉄筋がないと計算上せん断破壊する構造である M-4 試験体を基準とし、せん断破壊を防止するのに必要な分量だけの中間帯鉄筋を配置し、他は No.3 試験体の考えに基づき座屈抑制エレメントを分散配置したものである。

4.2 試験体諸元

試験体の形状寸法は M - 3 , M - 4 試験体と同様で、図 - 6 に示すように、柱断面が 1,200mm × 1,200mm , フーチング部から載荷点までの高さが 4,800mm である。各試験体の諸元を表 - 1 に示す。なお、交番荷重下の曲げ耐力、せん断耐力、変形性能等は道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編⁵⁾に基づき算出している。表 - 2 に各試験体の計算耐力、変位の一覧を示す。

ここで、定着長については、図 - 7 に示すように、定着体が異形スタッドの場合は軸方向鉄筋の中心から定着体の先端まで、頭付きスタッドの場合は同じく首下までと定義した。また、定着長は、異形スタッドについては式(1)に示すように、道路橋示方書・同解説 下部工編⁶⁾に規定されている基本定着長程度とした。

$$L_a = \frac{\sigma_{sa}}{4\tau_{0a}} \varphi \quad (1)$$

ここに、 L_a : 基本定着長(mm)

σ_{sa} : 鉄筋の許容引張応力度(N/mm²)

τ_{0a} : コンクリートの許容付着応力度 (N/mm²)

φ : 鉄筋の直径(mm)

一方、頭付きスタッドについてはコンクリートの支圧抵抗により定着を図る構造であることを考え、1 本当たりの引張降伏耐力がコン破壊耐力以下となるよう、式(2)の条件を満たす長さとした。

$$A_s \sigma_y \sqrt{2} \pi L^2 \tau_{pa} \quad (2)$$

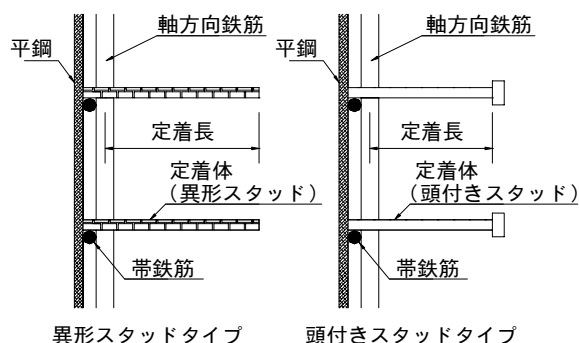


図 - 7 定着長の定義

表 - 1 試験体諸元

試験体	軸方向鉄筋(SD295A)				帯鉄筋(SD295A)			コンクリート 圧縮強度 (N/mm ²)	座屈抑制エレメント定着体(貫通中間帯鉄筋も含む)				
	径	引張鉄筋 本数	側方鉄筋 本数	降伏点 強度 (N/mm ²)	径	ピッチ (mm)	降伏点 強度 (N/mm ²)		種類	径	降伏点 強度 (N/mm ²)	列数	定着長
No.1	D16	23	21	387.5	D10	75	367.0	34.7	異形スタッド	D10	386.7	2	282
No.2	D16	23	21	387.5	D10	75	367.0	37.8	頭付きスタッド	φ9.5	452.1	2	125
No.3	D16	23	21	351.9	D10	75	385.0	28.7	頭付きスタッド	φ6.0	507.3	5	57
No.4	D19	23	21	356.9	D10	75	385.0	33.9	頭付きスタッド	φ6.0	507.3	4	56
M-3	D16	23	21	375.0	D10	75	336.0	39.5	貫通鉄筋	D10	336.0	2	—
M-4	D19	23	21	328.0	D10	75	336.0	33.5	貫通鉄筋	D10	336.0	2	—

表 - 2 計算耐力、変位一覧

	実験値				計算値(道路橋示方書Type II)				
	降伏時		最大荷重時	終局時	せん断耐力	初期降伏時		終局時	
	水平変位 mm	水平荷重 kN	水平荷重 kN	水平変位 mm	Ps kN	水平変位 mm	水平荷重 kN	水平変位 mm	水平荷重 kN
No.1	19.5	715.5	841.9	148.6	1241.5	15.1	686.8	143.7	848.4
No.2	19.9	748.4	846.8	136.7	1241.5	14.8	690.0	143.7	851.7
No.3	18.5	767.6	919.2	108.8	1221.6	15.8	654.7	154.8	813.4
No.4	22.1	902.3	1163.4	147.5	1677.4	17.0	888.3	127.7	1116.2
M3	19.0	716.5	929.4	167.3	1841.7	14.5	701.6	130.9	867.8
M4	20.6	825.9	1144.1	170.2	1878.2	14.2	825.0	115.8	1039.5

※実験値は正側の荷重および変位を用いた。

ここに、 A_s ：頭付きスタッドの断面積(mm²)

σ_y ：頭付きスタッドの降伏点強度(N/mm²)

L ：定着長(mm)

τ_{pa} ：コンクリートの許容押抜きせん断応力度
(N/mm²)

また、No.3 および No.4 試験体において座屈抑制エレメントを分散配置するにあたっては、式(3)に示す 1 面あたりの帯鉄筋拘束力が基準試験体と同等以上となるように、その数量を定めた。

$$P_{sum}=nA_s \sigma_{sy} \quad (3)$$

ここに、 P_{sum} ：定着体または中間帯鉄筋による 1 面あたりの帯鉄筋拘束力(N)

n ：定着体または中間帯鉄筋の 1 面あたりの本数

A_s ：定着体または中間帯鉄筋の断面積 (mm²)

σ_{sy} ：定着体または中間帯鉄筋の降伏点強度
(N/mm²)

4.3 載荷

実験は、独立行政法人土木研究所部材耐震強度実験施設において行った。実験の全景を写真 - 1 に示す。本実験では、柱断面を横にした形でフーチングを反力壁に PC 鋼棒 14 本を介して固定させている。水平力は、加振機(最大荷重 ±1250kN、最大変位 ±500mm、最大速度 ±100cm/s)により与えた。また、軸力として軸応力度で 0.98N/mm² に相当する 1412kN を作用させた。

載荷は、柱頂部水平変位の制御により行い、P 面側から M 面側への載荷を正載荷 (+)、その逆を負載荷 (-) とし、±2mm、±5mm、±10mm、±15mm、±20mm と交番載荷を行った。その後、データの確認により軸方向鉄筋降伏時変位(1δ)を決定し、±2δ、±3δ、±4δ……… ±nδ まで交番載荷を行った。なお、1δ 以降は各 δ について正負 3 回ずつ交番載荷を行った。

4.4 試験体損傷の進展

写真 - 2 に 5δy 載荷終了時の各試験体の損傷状況を、写真 - 3 に最終破壊状況を示す。

No.1 試験体は、5δy の第 1 サイクル負側載荷時において、圧縮側の面(図 - 6 における P 面)のかぶりコンクリートが浮き上がり、同じく第 3 サイクル正側載荷時には、反対側の面(図 - 6 における M 面)にも同様の浮き上がりが生じた。また、第 3 サイクル負側載荷時には、P 面側のかぶりコンクリートが剥落し、帯鉄筋のはらみだしや軸方向鉄筋の座屈が確認された。その後損傷は進展し、7δy において顕著な耐力低下が見られたため、8δy にて載荷を終了した。なお、この時点において、



写真 - 1 正負交番載荷試験状況

座屈抑制エレメント定着体の破断は確認されたが、引き抜けは認められなかった。

No.2 試験体は、P 面側は 5δy の第 1 サイクルにおいて、M 面側は 5δy の第 2 サイクルにおいて、かぶりコンクリートのうきあがりの確認でき、5δy 終了時には M 面側、P 面側ともにかぶりコンクリートが剥落し、帯鉄筋のはらみだしや軸方向鉄筋の座屈が確認された。その後 7δy において軸方向鉄筋が破断し、8δy にて載荷を終了した。

No.3 試験体は、4δy の第 1 サイクルで M 面、P 面それぞれのかぶりコンクリートが浮き上がり、5δy の第 1 サイクルにおいてかぶりコンクリートが剥落した。またこの時、帯鉄筋のはらみだしや軸方向鉄筋の座屈とともに座屈抑制エレメント定着体の引き抜けが確認された。その後損傷の進展に伴い、定着体の引き抜けは顕著となり、7δy 終了時には橋脚基部において定着体が完全に抜け出した。また、定着体の破断は、載荷完了とした 8δy 載荷完了後まで認められなかった。

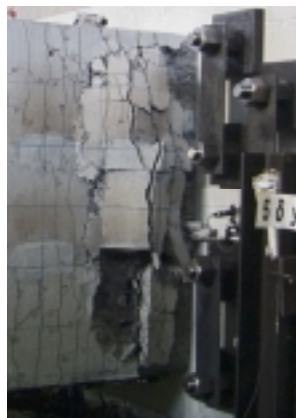
No.4 試験体は、4δy の第 3 サイクルで M 面、P 面それぞれのかぶりコンクリートが浮き上がり、5δy の第 2 サイクルにおいてかぶりコンクリートが剥落した。この時点で No.3 試験体と同様に、帯鉄筋のはらみだし、軸方向鉄筋の座屈および座屈抑制エレメント定着体の引き抜けが認められたが、貫通中間帯鉄筋を設置している部分における軸方向鉄筋のはらみだしは少なかった。その後、No.3 と比較して顕著ではないものの、損傷の進展に伴い定着体の引き抜けが進展し、7δy にて橋脚基部の座屈抑制エレメント定着体が完全に抜け出した。軸方向鉄筋が破断し載荷終了とした 8δy 載荷完了後においても、定着体や中間帯鉄筋の破断は認められなかった。

4.5 変形性能

図 - 8 は、実験により得られた各試験体の水平変位 - 水平荷重の履歴と計算値を重ねて示したものである。ここで計算値とは、道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編



No.1 試験体 (P 面)



No.2 試験体 (P 面)

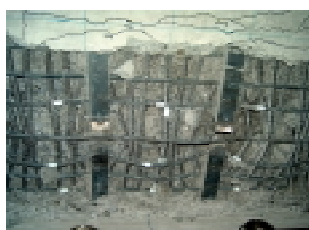


No.3 試験体 (P 面)



No.4 試験体 (P 面)

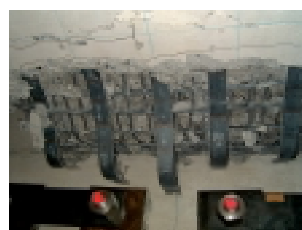
写真 - 2 5δy 荷重終了時における各試験体の損傷状況



No.1 試験体



No.2 試験体



No.3 試験体



No.4 試験体

写真 - 3 橋脚基部における各試験体の最終損傷状況

地震時保有水平耐力 (Type)⁶⁾ に準拠して算定したものである。また、図 - 9 は各荷重ステップ第 1 サイクルの水平変位 - 水平荷重の包絡線をそれぞれの基準試験体と比較して示したものである。

これらより、No.1 および No.2 試験体は、基準試験体である M - 3 試験体に対し、耐力および変形性能はともに同程度であった。

一方、No.3 試験体の耐力および変形性能は、5δy までは M - 3 と同程度であったが、その後の耐力低下は M - 3 試験体よりも顕著であった。損傷状況の観察より、耐力低下が始まる時点と、エレメント定着体の引き抜けが始まる時点は一致していたため、耐力低下の原因は、エレメント定着体の定着長不足によるものと考えられる。

また、No.4 試験体は、基準試験体である M - 4 試験体に対し、耐力および変形性能はともに同程度であった。

以上の結果より、座屈抑制エレメントは、定着体の破断や引抜けが生じない範囲では、貫通しているか否かに関わらず十分な軸方向鉄筋座屈抑制効果があり、基準試験体と同等の変形性能を有することが確認できた。

4.6 エネルギー吸収性能

各試験体のエネルギー吸収性能を比較するため、試験体が吸収した履歴吸収エネルギーを求めた。ここで履歴吸収エネルギーは水平力 - 水平変位の関係において、履歴曲線に囲まれた面積により算定した。また、等価粘性減衰定数は図 - 10 に示す方法により算定した。履歴吸

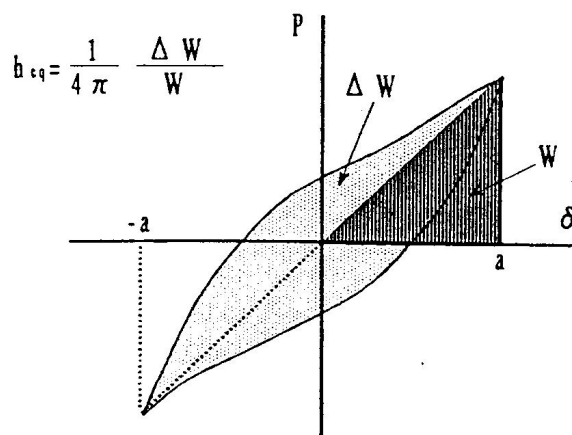
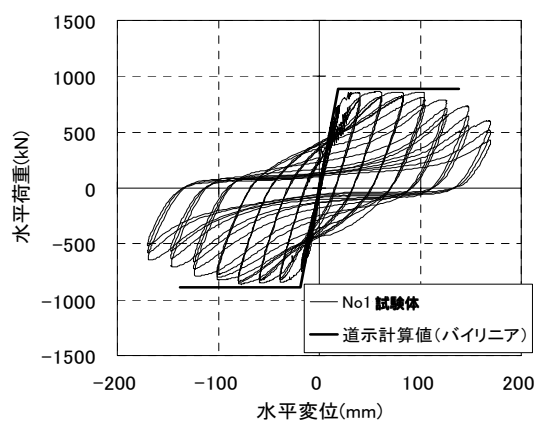


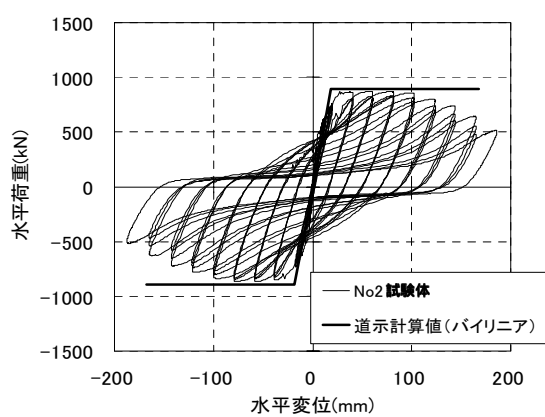
図 - 10 等価粘性減衰定数の定義

収エネルギーは、1 サイクルあたりの荷重 - 変位のループが囲む面積であり、この値が小さい、すなわち履歴ループが細いと、構造物が塑性化しても、入力地震のエネルギーが、弾性振動と同様、運動エネルギーや復元力エネルギーに変換されるため、変位や加速度が減衰しにくいことになる。一方、この値が大きいと、塑性化領域に達する部材でのエネルギー吸収が期待でき、振動時において変位や加速度の減衰が期待できる。

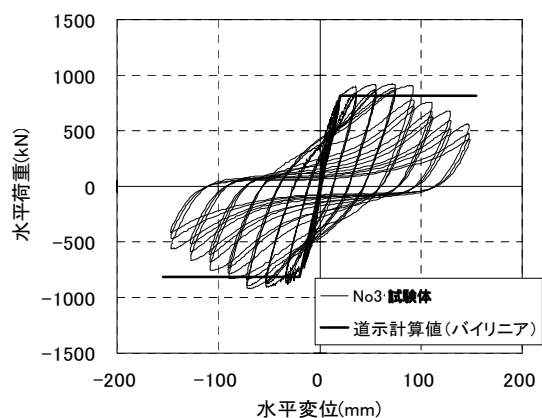
図 - 11 は、各試験体の履歴吸収エネルギーの累積値を、また、図 - 12 は、等価粘性減衰定数を、それぞれの基準試験体と比較して示したものである。これらにより、定着体の引き抜けが生じた No.3 以外は、ほぼ基準試験体と同等の復元力特性を有していることが確認され



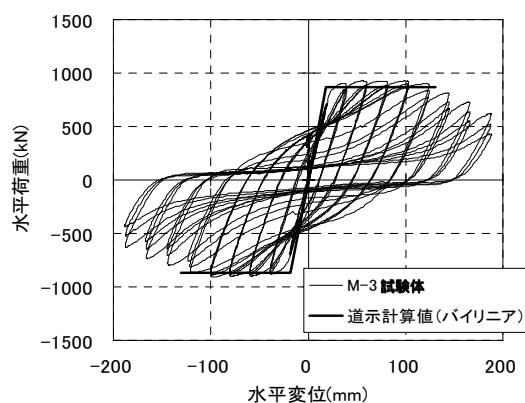
No.1 試験体



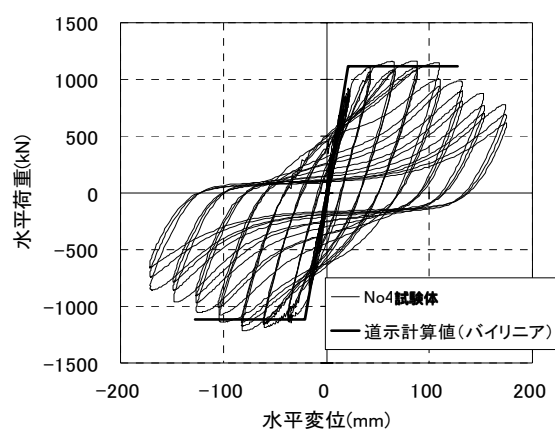
No.2 試験体



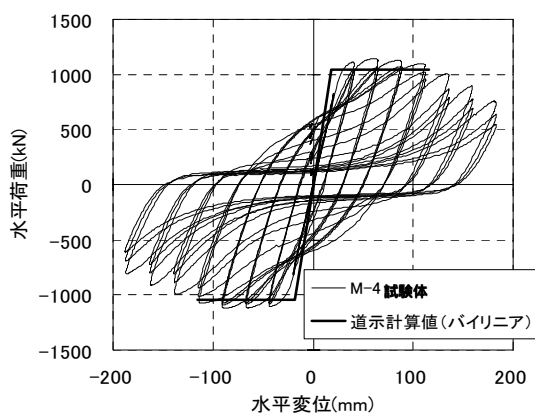
No.3 試験体



M - 3 試験体

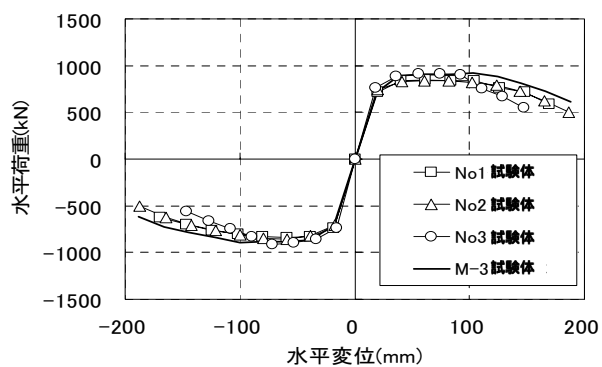


No.4 試験体

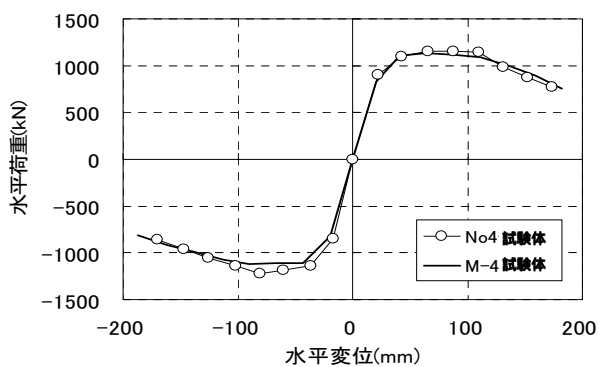


M - 4 試験体

図 - 8 水平変位 - 水平荷重関係の履歴

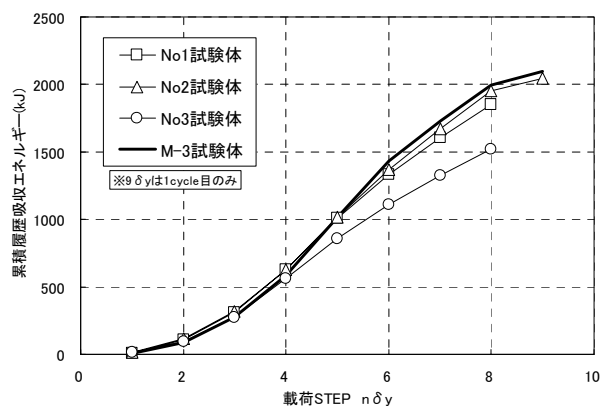


No.1 ~ No.3 試験体, M - 3 試験体

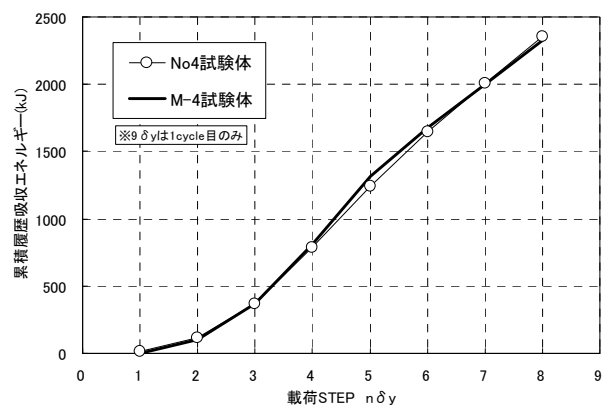


No.4 試験体, M - 4 試験体

図 - 9 水平変位 - 水平荷重関係の包絡線

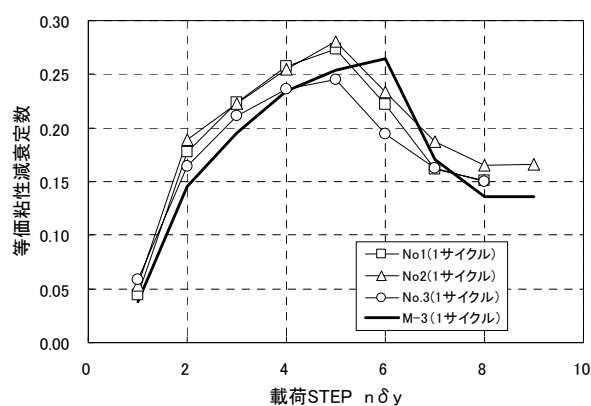


No.1～No.3 試験体，M-3 試験体

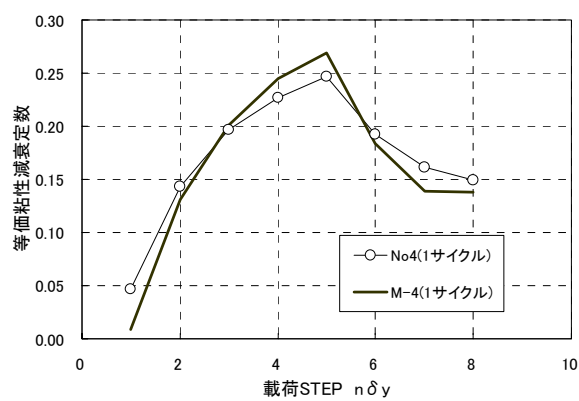


No.4 試験体，M-4 試験体

図 - 11 累積履歴吸収エネルギー



No.1～No.3 試験体，M-3 試験体



No.4 試験体，M-4 試験体

図 - 12 等価粘性減衰定数

た．躯体の損傷を考慮した定着長の設定が今後の課題である．

5. まとめ

座屈抑制エレメントを用いた試験体を製作して正負交番載荷試験を行い，その耐震性能について従来の中間帯鉄筋の構造と比較した結果，従来構造と同等の変形性能が確認され，正負交番荷重下においてせん断破壊しない範囲においては中間帯鉄筋が貫通していなくても所定の変形性能が確保されることが証明された．また，本座屈抑制エレメントの構造は，定着体の破断や引き抜けが生じない範囲では，十分な軸方向鉄筋座屈抑制効果があることが確認された．

謝辞：本研究は，（独）土木研究所，（財）土木研究センター，民間5社が参加した「高じん性鉄筋コンクリート構造の配筋合理化技術に関する共同研究」の1課題として実施したものである．貴重なご意見を賜った共同研究担当者各位に感謝致します．

参考文献

- 1)（独）土木研究所：共同研究報告書，第 283 号，高じん性鉄筋コンクリート構造の配筋合理化技術に関する共同研究報告書（その1），平成 14 年 9 月
- 2)2002 年制定土木学会コンクリート標準示方書耐震性能照査編
- 3)原夏生他：突起付H形鋼とプレキャスト型枠を用いた鉄骨コンクリート複合構造橋脚の構造性能に関する研究，土木学会論文集，No.662 / -40,pp.149-168，2000.11
- 4)建設省土木研究所：鉄筋コンクリート橋脚の塑性変形性能に関する実験的研究（その1）大型模型による塑性変形性能の検討，土木研究所資料第 3739 号，平成 12 年 8 月
- 5)（社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，平成 14 年 3 月
- 6)（社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説 下部構造編，平成 14 年 3 月