

論文 正負交番荷重下における軽量コンクリート柱部材の構造性能評価

岩波 光保^{*1}・伊藤 始^{*2}・加藤 絵万^{*3}・横田 弘^{*4}

要旨：橋梁等に軽量コンクリートを用いた場合、施工の合理化、地盤への影響軽減、地震時慣性力の低減などの面でメリットがあり、設計の合理化やコストの縮減が図られる。本研究では、軽量コンクリートを橋脚に適用することを想定し、軽量コンクリート柱部材が軸力下において正負交番水平荷重を受けた場合の構造性能を、耐荷性、じん性、塑性ヒンジ長、エネルギー吸収能などの観点から評価した。また、道路橋示方書に基づいた設計が可能であるかについても検討を行った。

キーワード：軽量コンクリート、柱、正負交番水平載荷試験、耐荷性、じん性

1. はじめに

軟弱地盤上に鉄筋コンクリート橋脚を建造する際に、地盤への負荷軽減や地震時慣性力の低減を目的として橋脚の軽量化を図ることで、経済性に優れた合理的な設計が実現される可能性がある。橋脚を軽量化する方法の1つとして、軽量コンクリートの適用が考えられるが、従来の軽量コンクリートは一般に強度や耐久性の面で、普通コンクリートと比較して著しく性能が劣っており、重要構造物である橋脚への適用は困難であった。しかしながら、近年になって、独立空隙型低吸水性の人工軽量骨材が開発され、耐久性やポンプ圧送性に優れた高性能軽量コンクリートの製造が可能となった¹⁾。これまでに、高性能軽量コンクリートを用いたはり部材の構造性能については、明らかにされつつあるが^{2), 3)}、橋脚のような柱部材に適用した場合の力学挙動については検討されていない。

そこで本研究では、高性能軽量コンクリートを橋脚躯体に適用することを目的として、その耐震設計上必要な正負交番荷重下における構造性能を、軸力作用下における柱試験体の正負交番水平載荷試験を行うことで評価した。実験では、単位容積質量の異なる2種類の軽量コンクリ

ート柱試験体および普通コンクリート柱試験体を製作し、正負交番水平載荷試験を実施した。得られた試験結果より、軽量コンクリート柱部材の耐荷性、じん性、塑性ヒンジ長、エネルギー吸収能などについて検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体

(1) 寸法・諸元

図-1に、正負交番水平載荷試験に用いた柱試験体の概要を示す。フーチング部の寸法は、1350×1350×500mmである。試験体の種類は、普通コンクリート(N)、JASS 5に規定される軽量コンクリートI種(L1)および同じく軽量コンクリートII種(L2)の3種類とした。N試験体は、道路橋示方書⁴⁾に基づいて曲げ破壊型で設計したものであり、L1試験体およびL2試験体は、N試験体のコンクリート種類のみを変えたものであり、寸法・形状や配筋条件は同一である。

(2) 使用材料・配合

コンクリートの製造に使用した材料の特性を表-1に示す。用いた人工軽量骨材は、黄河堆積物を主原料とし、これに発泡材と結合材を混合・造粒し、高温で焼成発泡させた独立空隙型

*1 独立行政法人 港湾空港技術研究所 主任研究官 工博 (正会員)

*2 独立行政法人 港湾空港技術研究所 依頼研修員(前田建設) 工修 (正会員)

*3 独立行政法人 港湾空港技術研究所 研究官 工博 (正会員)

*4 独立行政法人 港湾空港技術研究所 構造強度研究室長 工博 (正会員)

表－1 使用材料の特性

種類	名称	仕様
セメント	普通ポルトランドセメント	密度 3.16g/cm ³
	低熱ポルトランドセメント	密度 3.22g/cm ³
細骨材	山砂 S1	表乾密度 2.59g/cm ³ , 吸水率 2.43%
	砕砂 S2	表乾密度 2.67g/cm ³ , 吸水率 1.60%
	軽量細骨材 S3	絶乾密度 1.22g/cm ³ , 60分吸水率 0.34%
粗骨材	碎石 G1	表乾密度 2.72g/cm ³ , 吸水率 0.93%
	軽量粗骨材 G2	絶乾密度 1.18g/cm ³ , 60分吸水率 0.08%
混和剤	高性能AE減水剤	遅延型, ポリカルボン酸エーテル系

表－2 鉄筋の機械的性質

種類	鋼種	降伏強度	引張強度	ヤング率	伸び
		N/mm ²	N/mm ²	kN/mm ²	%
主鉄筋	SD345-D10	388	587	200	25
帯鉄筋	SD295-D6	319	507	200	29

表－3 コンクリートの配合条件

コンクリートの種類	スランプ/スランプロー	空気量	粗骨材最大寸法	セメントの種類
	cmまたはmm	%	mm	
普通	15	4.5	20	普通ポルトランドセメント
軽量I種	350	5.5	15	低熱ポルトランドセメント
軽量II種	350	5.5	15	低熱ポルトランドセメント

表－5 コンクリートの硬化物性

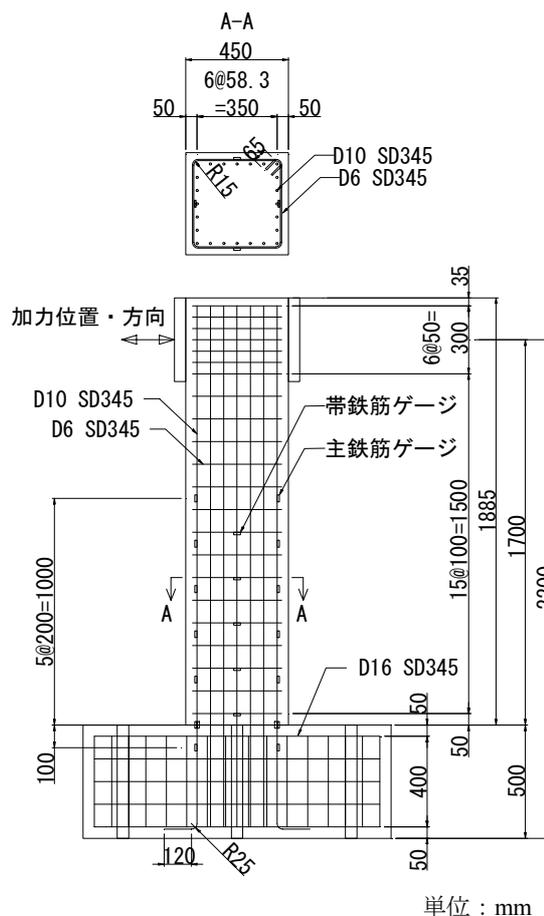
コンクリートの種類	圧縮強度	ヤング率
	N/mm ²	kN/mm ²
普通	42.0	31.7
軽量I種	35.5	19.7
軽量II種	33.7	18.5

表－4 コンクリートの示方配合

コンクリートの種類	水セメント比	細骨材率	単位容積質量	単位量							
				水	セメント	細骨材			粗骨材		混和剤
						S1	S2	S3	G1	G2	
普通	53.1	46.8	2322	165	311	509	340	-	994	-	3.27
軽量I種	45.0	47.0	1768	157	349	496	341	-	-	429	3.58
軽量II種	45.0	49.0	1641	157	349	604	-	120	-	412	3.05

の骨材⁵⁾である。従来の高性能人工軽量骨材の形状が球形だったのに対して、この骨材の形状は天然の普通骨材に近い。したがって、ひび割れ面におけるせん断伝達や骨材の噛合い効果がある程度期待できる。表－2に、用いた鉄筋の機械的性質を示す。

コンクリートの配合は、表－3に示す条件のもとで、異なるコンクリート種類間ではほぼ同程度の圧縮強度が得られるように決定した。得られた示方配合を表－4に示す。軽量コンクリートII種では、3mm以上のみを軽量細骨材とした。柱試験体と同一条件で養生した円柱供試体（直



図－1 柱試験体の概要

径100mm, 高さ200mm)により求めた載荷試験時の圧縮強度およびヤング率を表－5に示す。

2.2 正負交番水平載荷試験

柱試験体のフーチング部をPC鋼棒で反力床に固定し、反力壁に設置したアクチュエータ（容量1000kN, ストローク400mm）により柱頂部に正負交番水平荷重を作用させた。作用位置は、柱基部から高さ1700mmとした。よって、本試験におけるせん断スパン比は、4.25となった。軸力は、柱部断面に一定の軸圧縮応力（1N/mm²）が生じるように、油圧ジャッキにより柱試験体に鉛直荷重を作用させた。この軸圧縮応力は、一

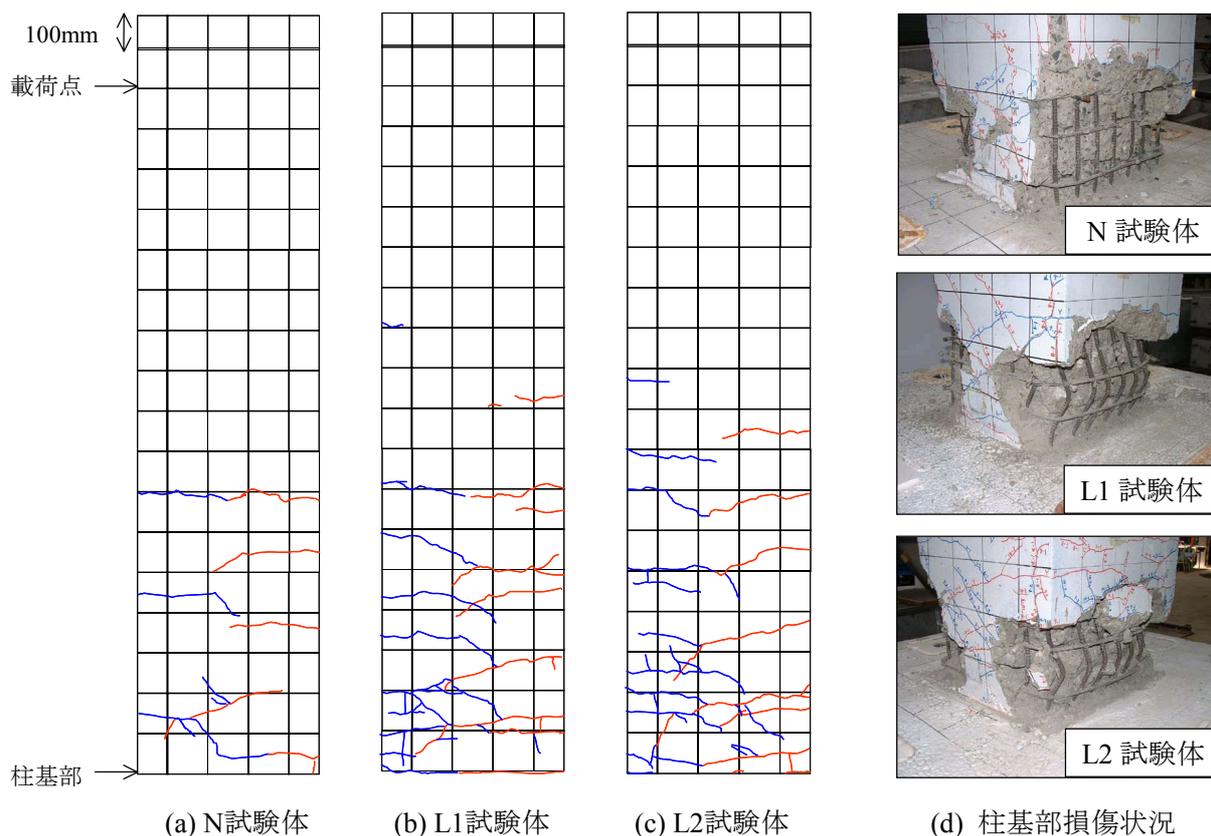


図-2 ひび割れ発生状況と柱基部における損傷状況

一般的な道路橋橋脚に作用する応力を考慮して決定した。

水平荷重は、後述する保有耐力計算値の75%までは荷重制御方式で与え、その後は変位制御方式により、降伏変位 δ_y の1倍、2倍、3倍…の水平変位を3サイクルずつ繰り返し作用させた。降伏変位は、保有耐力計算値の75%まで載荷した際の水平変位の正負平均値を、保有耐力計算値まで外挿することで求めた。

載荷試験中には、水平荷重、鉛直荷重、水平荷重作用位置での水平変位（以下、単に水平変位）、主鉄筋ひずみ、帯鉄筋ひずみ、フーチングからの柱部伸出し量、柱部曲率などを計測した。主鉄筋および帯鉄筋のひずみ計測位置を図-1に示す。フーチングからの柱部伸出し量は、柱基部から50mmの位置で計測し、柱部曲率は、試験体の引張側と圧縮側の軸方向変位から求めた。

3. 実験結果と考察

3.1 破壊性状

図-2に、各試験体のひび割れ発生状況およ

び柱基部における損傷状況を示す。ひび割れ発生状況は、 $5\delta_y$ 載荷終了時のもので、柱基部における損傷状況は、載荷試験終了時のものである。

各試験体の破壊過程の概要を表-6に示す。N試験体では、水平荷重が35kNで柱基部から高さ200mmの位置に曲げひび割れが発生し、その後ひび割れ本数および幅ともに増加し、主鉄筋の降伏に至った。2.2で定めた降伏変位 δ_y は4.93mmとなった。その後は、水平変位を増加させても耐力低下は認められず、 $-8\delta_y$ で柱基部圧縮側コンクリートが圧壊した。 $+9\delta_y$ で、柱基部においてかぶりコンクリートの剥落が生じ、主鉄筋が座屈した。 $+10\delta_y$ で、主鉄筋の1本が破断し、急激に耐力が低下した。水平荷重がピーク後に降伏荷重を初めて下回る時点を終局状態と定義すると、N試験体の場合、終局状態は $9\delta_y$ であった。

コンクリート種類の違いによらず、試験体の破壊性状および破壊過程はほぼ同様であったが、各イベントの発生段階に同表のような相違点が認められた。また、L1試験体およびL2試験体では、N試験体と比較して、ひび割れ本数が多かつ

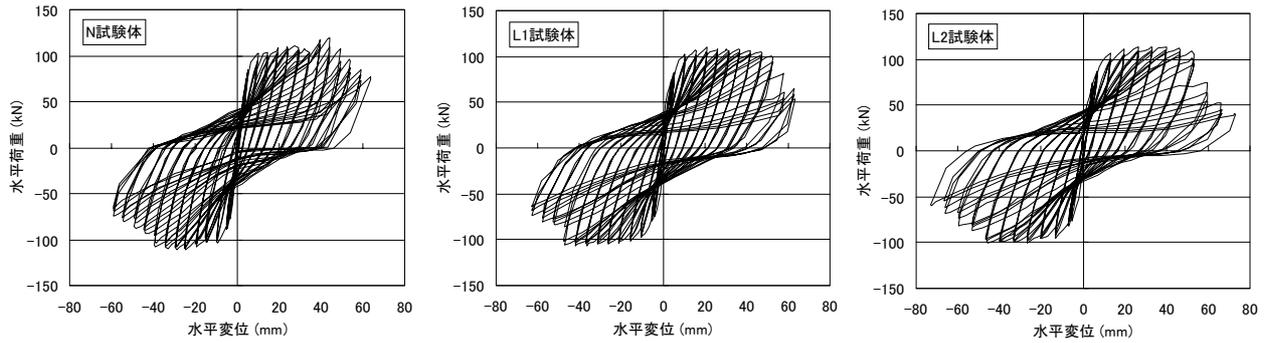


図-3 水平荷重-水平変位の履歴曲線

表-6 試験体の破壊過程

試験体	ひび割れ発生	降伏変位	圧壊開始	剥落開始	主鉄筋破断	終局状態
N	35kN	4.93mm	-8 δ_y	+9 δ_y	+10 δ_y	+9 δ_y
L1	34kN	5.25mm	-7 δ_y	+9 δ_y	+13 δ_y	+8 δ_y
L2	38kN	6.61mm	-7 δ_y	+8 δ_y	-10 δ_y	+7 δ_y

た。これは、軽量コンクリートの引張強度が小さいため、ひび割れが発生しやすかったためと考えられる。また、柱基部における損傷領域高さは、N試験体では200~225mmであったが、L1試験体およびL2試験体では175~200mmであった。軽量コンクリートの場合に損傷領域が局所化したのは、軽量骨材の強度が普通骨材と比較して小さいために、塑性変形の繰返し作用に対する抵抗性が低いためと考えられる。なお、いずれの試験体でも帯鉄筋は破断しなかった。

3.2 荷重-変位関係

図-3に、各試験体の水平荷重-水平変位の履歴曲線を示す。これによれば、コンクリート種類の違いによらず、ほぼ同様の履歴曲線が得られたことがわかる。また、各試験体間で降伏変位は若干異なったものの、降伏荷重、最大荷重および終局変位はほぼ等しかった。降伏変位に違いが見られたのは、上述のひび割れ本数の違いに加えて、コンクリートのヤング率の違いにより試験体の曲げ剛性が若干異なったためと考えられる。

図-4に、水平荷重-水平変位の履歴曲線の包絡線を、道路橋示方書⁴⁾に基づく計算値(N試験体)とあわせて示す。実測の水平変位は、フ

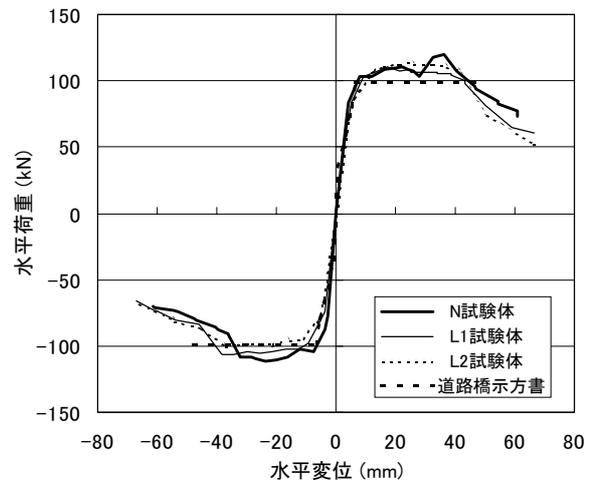


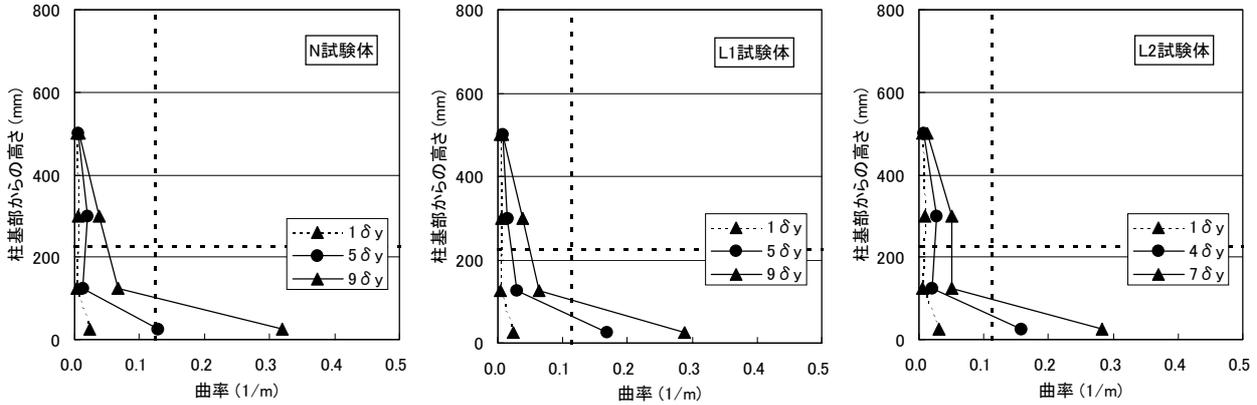
図-4 水平荷重-水平変位関係

ーチングからの柱部の伸出しにともなう回転変位を差し引いたものである。なお、フーチングからの柱部の伸出し量は、既往の研究³⁾と同様に、コンクリート種類による違いがほとんどなかった。なお、道路橋示方書に基づく計算において、材料特性は、実際に用いた材料の実測値を用いた。表-5に示したように、各試験体間でコンクリート強度に違いが見られるが、それぞれの物性値を用いて道路橋示方書に基づく計算を行った場合でも、水平荷重-水平変位関係に顕著な違いは認められなかった。よって、これ以降ではコンクリートの圧縮強度の違いについては、考慮しないこととした。

これによれば、いずれの試験体においても、水平荷重-水平変位の包絡線は、道路橋示方書の計算値と概ね一致しており、軽量コンクリートを用いた場合でも、道路橋示方書に基づく設計が可能であることを示している。

表－7 各試験体の構造性能

試験体	降伏変位 (mm)		最大荷重 (kN)	保有耐力 (kN)	終局変位 (mm)		塑性率		許容 塑性率 計算値
	実測値	計算値			実測値	計算値	実測値	計算値	
N	4.75	6.72	115.3	99.5	37.93	48.03	7.95	7.15	5.10
L1	6.03	7.52	108.1	98.7	40.60	44.97	6.73	5.98	4.32
L2	6.89	7.63	106.9	98.8	40.77	44.68	5.95	5.85	4.24



図－5 曲率分布

各試験体の構造性能に関する諸値の実測値と計算値の比較を表－7に示す。ここで、実測値は正負平均値である。L1試験体およびL2試験体とN試験体を比較すると、耐荷性については、軽量コンクリートを用いても普通コンクリートと同程度の性能を発揮した。いずれの試験体においても、実験で得られた塑性率は、道路橋示方書に基づく許容塑性率を上回っており、十分な塑性変形性能を有しているものと言える。しかしながら、軽量コンクリートを用いた場合の塑性率は普通コンクリートと比較して小さくなったが、軽量コンクリートI種であれば、その差は1.0以下であり、普通コンクリートと同等の変形性を有していると見なすことができる。

次に、実測値と計算値を比較すると、試験体の最大荷重は、保有耐力の計算値を若干上回っており、軽量コンクリート柱部材の耐荷性は道路橋示方書により評価できることがわかった。また、終局変位および塑性率の実測値は計算値と概ね一致しており、軽量コンクリート柱部材のじん性についても同様に評価可能であった。

3.3 曲率分布

図－5に、柱基部より高さ500mmの範囲で計

測した曲率の鉛直方向分布を示す。ここでの曲率は、正負平均値である。図中には、道路橋示方書に基づいて計算した塑性ヒンジ長および終局曲率(タイプII地震動に対応)をあわせて示す。これによれば、曲率が大きい領域は柱基部より高さ200mmの範囲に収まっており、3.1で述べた損傷領域高さとはほぼ一致した。また、柱基部における曲率は、普通コンクリートよりも軽量コンクリートの方が大きかった。この傾向は、軽量コンクリートII種の方が顕著であった。これは、3.1でも述べたように、塑性変形の繰返し作用に対する抵抗性が、軽量コンクリート、特に細骨材にも軽量骨材が用いられた軽量コンクリートII種では小さいために、躯体変形が柱基部に局所化したためと考えられる。しかしながら、これらの差は比較的小さかったため、3.2で述べたように、軽量コンクリート柱部材の構造性能は、道路橋示方書に基づいて普通コンクリートの場合と同様に評価できた。

道路橋示方書に示されている橋脚の終局変位算定式を変形すると、塑性ヒンジ長 L_p は次式で求められる。

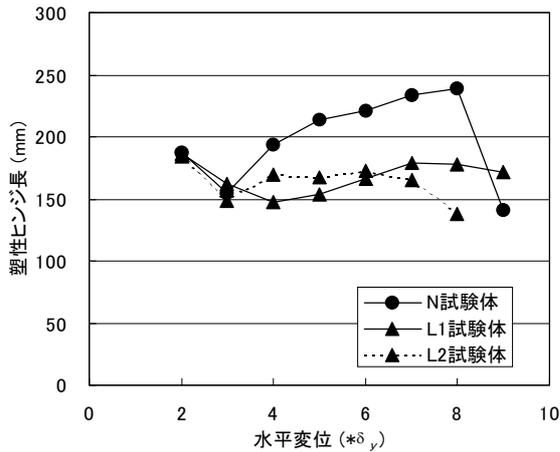


図-6 塑性ヒンジ長

$$L_p = h - \sqrt{h^2 - 2(\mu - 1) \frac{\delta_y}{\phi - \phi_y}} \quad (1)$$

ここに、 h ：橋脚高さ、 ϕ 、 ϕ_y ：橋脚基部における曲率および降伏曲率、 $\mu = \delta / \delta_y$ 、 δ ：橋脚頂部での水平変位である。試験体の柱基部から高さ0～200mmで計測された曲率が、塑性ヒンジ領域の曲率を代表するものと仮定し、式(1)によって算定した塑性ヒンジ長を図-6に示す。荷重初期では、いずれの試験体でも塑性ヒンジ長は150～200mmであったが、N試験体では水平変位の増加とともに塑性ヒンジ長は大きくなった。一方、L1試験体およびL2試験体では、終局状態まで塑性ヒンジ長にほとんど変化がみられなかった。これは、軽量コンクリートの場合、柱基部に損傷が局所化したため、塑性ヒンジ領域があまり拡大しなかったためと考えられる。

3.4 エネルギー吸収能

水平荷重-水平変位の履歴曲線から等価粘性減衰定数を求めた。その結果を図-7に示す。これによれば、各試験体の等価粘性減衰定数に大きな差は認められず、水平変位の増加とともに、等価粘性減衰定数は0.10から0.25に徐々に増加した。以上より、コンクリート種類の違いが柱部材のエネルギー吸収能に及ぼす影響は小さいことがわかった。

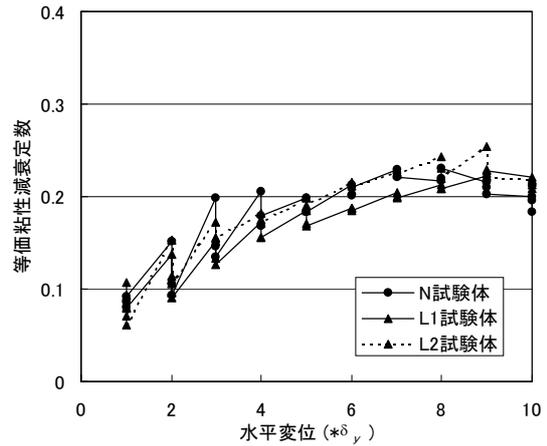


図-7 等価粘性減衰定数

4. まとめ

本研究では、軽量コンクリート柱試験体の正負交番水平荷重試験を行い、普通コンクリートの場合と比較することで、その構造性能を評価した。その結果、ひび割れ発生状況や柱基部の損傷範囲などに若干の違いが見られたものの、粗骨材のみに軽量骨材を用いた軽量コンクリートI種であれば、概ね普通コンクリートと同程度の構造性能（耐荷性、じん性およびエネルギー吸収能）を発揮することがわかった。また、軽量コンクリート柱の構造性能は、道路橋示方書に基づいた計算により評価できることを示した。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：軽量コンクリートの性能の多様化と利用の拡大に関するシンポジウム論文集，JCI-C49，2000
- 2) 舟橋政司ほか：高性能軽量コンクリートを用いたRC梁のせん断耐力，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.919-924，2001
- 3) 舟橋政司ほか：繰返し荷重を受ける高性能軽量コンクリートはりの曲げ耐力，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.1477-1482，2002
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V 耐震設計編，2002
- 5) 九々正武ほか：中国産人工軽量骨材を使用したコンクリートの物性，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.43-48，2001