

論文 高性能軽量コンクリートを用いた RC 梁のせん断耐力

舟橋政司*1・原 夏生*2・横田 弘*3・二羽淳一郎*4

要旨: 独立空隙型低吸水性の高性能軽量骨材を用いて製作したせん断補強筋をもたない RC 梁の曲げせん断試験を実施した。また、高性能軽量コンクリートの引張強度、付着強度、ヤング係数などの強度特性値および斜めひび割れ耐力を普通コンクリートと比較した結果、これらはコンクリートの単位容積質量により低減係数を変化させて評価するのが適当との結果が得られた。本報告では、高性能軽量コンクリートのせん断破壊性状、せん断耐力および各力学特性値に及ぼす単位容積質量の影響を示し、低減係数の算出方法について提案した。

キーワード: 高性能軽量コンクリート、せん断耐力、低減係数、単位容積質量

1. はじめに

近年、独立空隙型低吸水性の高性能軽量骨材が開発され、従来の軽量骨材コンクリートの欠点であった凍結融解抵抗性やポンプ圧送性を著しく改善した高性能軽量コンクリートの製造が可能となってきた。また、高性能軽量骨材は低密度にもかかわらず高強度を有するため、これを用いた高性能軽量コンクリートにおいても、同一単位容積質量の従来型人工軽量骨材コンクリートよりも高強度が得られる。

しかしながら、設計面では、圧縮強度の増加に比べて引張強度、せん断強度が増加する程度は小さい等の課題もあり、土木学会の規定では軽量コンクリートの単位容積質量にかかわらず、コンクリートが受け持つせん断耐力を一律 70% に低減している¹⁾。一方、ヨーロッパでは軽量コンクリートの引張強度、せん断強度のコンクリート分担分の低下はコンクリートの単位容積質量の関数である低減係数で表現する方法を現在検討している²⁾。

本研究では、高性能軽量コンクリートの単位

容積質量を変化させ、RC 梁の曲げせん断試験を実施して、高性能軽量コンクリートのせん断破壊性状および耐力に関して検討を行った。また、高性能軽量コンクリートの強度特性値を算出する方法についても提案するものである。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

高性能軽量コンクリートのせん断耐荷性能を RC 梁試験体の曲げせん断載荷試験により、通常骨材を使用した試験体の耐力と比較した。

試験体は、単位容積質量の影響を把握するためにコンクリートの単位容積質量を 2300, 1800, 1500 および 1200 kg/m³ (記号 V2.3, V1.8, V1.5 および V1.2) とし、200×400×3400mm のせん断補強鉄筋をもたない RC 梁 (以降、小型梁と称す) のせん断耐力に着目して試験を行った。また、寸法効果の影響を確認するために 500×1070×10000mm の RC 梁 (以降、大型梁と称す) (記号 V1.8d100 および V1.5d100) を用いて載荷試験を行った。

*1 前田建設工業 (株) 技術研究所 研究第一グループ 工修 (正会員)

*2 前田建設工業 (株) 技術研究所 研究第一グループ 工博 (正会員)

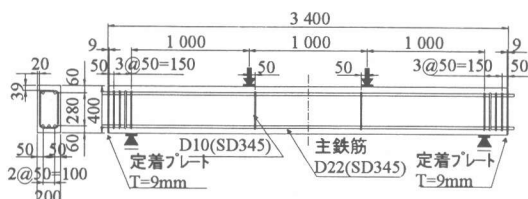
*3 国土交通省港湾技術研究所 構造部構造強度研究室長 工博 (正会員)

*4 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 教授 工博 (正会員)

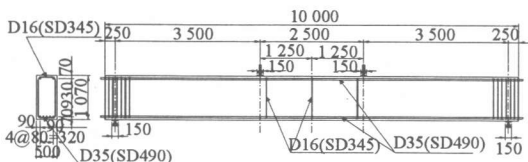
表－１に試験体の仕様一覧を、図－１に小型梁試験体の形状・寸法および配筋を示す。また、図－２および図－３に大型梁試験体の形状・寸法および配筋を示す。

表－１ 試験体の仕様

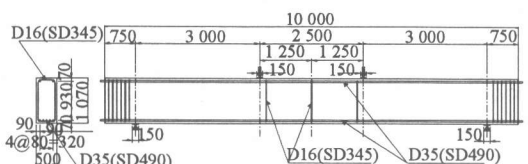
試験体	コンクリート 圧縮強度 (N/mm ²)	幅 (mm)	高さ (mm)	有効 高さ (mm)	せん断 スパン 比	主鉄筋 種類	径-本数	鉄筋比 (%)
V2.3	35	200	400	340	2.94	SD345	D22×3	1.71
V1.8								
V1.5								
V1.2								
V1.8d100	35	500	1070	1000	3.50	SD490	D35×5	0.96
V1.5d100								
					3.00			



図－１ 小型梁試験体の形状・寸法および配筋



図－２ V1.8d100 の形状・寸法および配筋



図－３ V1.5d100 の形状・寸法および配筋

2.2 使用材料

表－２に、梁試験体製作に用いたコンクリートの使用材料を示し、表－３に示方配合を示す。

表－２ 使用材料

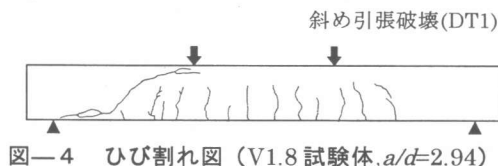
種類	材料名	記号	仕 様
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度:3.16g/cm ³
細骨材	高性能軽量骨材	ASL	絶乾密度:0.92g/cm ³ , 24h吸水率:6.2%
	人工軽量骨材	KP-1	絶乾密度:1.20g/cm ³ , 24h吸水率:9.0%
	山砂	S1	表乾密度:2.60g/cm ³ , 吸水率:2.54, FM:2.98
	砕砂	S2	表乾密度:2.63g/cm ³ , 吸水率:1.78, FM:2.78
粗骨材	高性能軽量骨材 (0.85品*)	ASL	絶乾密度:0.88g/cm ³ , 24h吸水率:3.6%
	高性能軽量骨材 (1.2品*)		絶乾密度:1.17g/cm ³ , 24h吸水率:2.8%
	砕石	G	表乾密度:2.68g/cm ³ , 吸水率:0.86%
混和材	石灰石微粉末	LS	密度:2.70g/cm ³ , 比表面積4260cm ² /g
混和剤	高性能減水剤	SP	特殊分離低減型減水成分配合* リカボン酸塩系
	AE減水剤	AE	リグニンスルホン酸化合物* リオム複合体

*) 15mm～10mm: 10mm～5mmを容積比率3:7で使用。

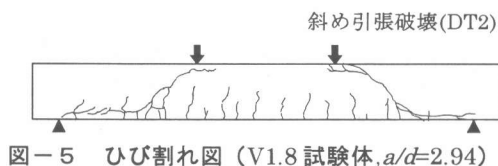
表－３ 示方配合

目標 単位容 積質量 (kg/m ³)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)										AE 減水 剤 (C ×%)	高性 能減 水剤 (C ×%)			
			水	セメント	石灰 石微 粉末	細骨材					粗骨材						
						ASL	KP-1	S1	S2	0.85	ASL 1.2	G					
2300	57.5	47.1	166	289	—	—	—	431	431	—	—	982	1.0	—	—		
1800	40.0	51.9	165	413	—	—	—	435	440	—	363	—	—	—	0.6		
1500	40.0	51.9	165	413	68	154	—	370	—	—	363	—	—	—	0.6		
1200	37.5	51.2	165	440	—	165	176	—	—	273	—	—	—	—	0.6		

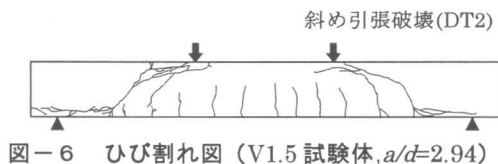
注) 軽量骨材は絶乾表示



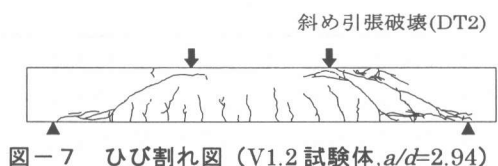
図－４ ひび割れ図 (V1.8 試験体, a/d=2.94)



図－５ ひび割れ図 (V1.8 試験体, a/d=2.94)



図－６ ひび割れ図 (V1.5 試験体, a/d=2.94)



図－７ ひび割れ図 (V1.2 試験体, a/d=2.94)

3. 実験結果および考察

3.1 ひび割れの形成状況と破壊性状

図－４～９に各試験体の最終的なひび割れ発生状況を示す。せん断スパン比(a/d)が2.94である小型梁のV1.2, V1.5およびV1.8では、約37～43kN

のせん断力が作用した時点で片側のせん断スパンに斜めひび割れが発生した。しかしながら、その時点では終局に至らず荷重が再度上昇して、反対側のせん断スパンにも斜めひび割れが発生し、最終的に一方のせん断スパンの斜めひび割れが圧縮縁まで達して破壊に至った（破壊形式 DT2）。これに対して普通コンクリートを用いた V2.3 では、作用せん断力 80kN で片側のせん断スパンに斜めひび割れが発生し、直ちに破壊に至った（破壊形式 DT1）。本研究では、最初の斜めひび割れが発生した時点を斜めひび割れ発生耐力としている。

a/d が 3.0 である大型梁の V1.5d100 では、両側のせん断スパンに斜めひび割れが発生した後、タイドアーチ的な機構が形成され、最終的に圧縮縁が圧壊するせん断圧縮破壊に至った（破壊形式 SC）。一方、 a/d が 3.5 である V1.8d100 では、片側のせん断スパンに斜めひび割れが発生すると同時に破壊に至った。

3.2 せん断耐力

表-4 に RC 梁載荷試験時のコンクリートの硬化物性を示す。なお、コンクリート圧縮強度試験用のテストピースは、試験体と同条件で養生したものを用いた。また、表-5 には試験体に用いた鉄筋の力学特性を示す。

表-6 に各試験体の斜めひび割れ発生時と最大荷重時の作用せん断力および斜め引張破壊のせん断耐力の計算値を示す。その際、せん断耐力算定式には、二羽ら³⁾による式(1)を用いた。

$$V_c = 0.20(0.75 + 1.4d/a)f'_c w^{1/3} (1000/d)^{1/4} p_w^{1/3} b_w d \quad (1)$$

ここに、 V_c ：コンクリートの負担するせん断耐力(N)、 a ：はりのせん断スパン長(mm)、 d ：はりの有効高さ(mm)、 f'_c ：コンクリート圧縮強度(N/mm²)、 p_w ：主鉄筋比(%)、 b_w ：はりの幅(mm)

3.3 a/d がせん断耐力に及ぼす影響

普通コンクリートを用いた RC 梁のせん断耐力は、図-10 に示すように斜めひび割れ耐力（破線）とせん断圧縮破壊となるアーチ耐力（一

斜め引張破壊(DT1)

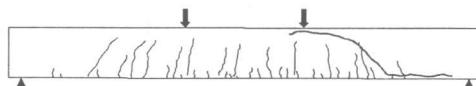


図-8 ひび割れ図 (V1.8d100 試験体, $a/d=3.5$)

せん断圧縮破壊(SC)



図-9 ひび割れ図 (V1.5d100 試験体, $a/d=3.0$)

表-4 試験体の硬化物性

試験体	単位容積 質量 (kg/m ³)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
V2.3	2260	22.9	23.4	2.17
V1.8	1720	33.7	17.9	2.87
V1.5	1620	45.0	18.5	2.01
V1.2	1310	33.3	12.6	1.70
V1.8d100	1810	37.6	21.2	2.51
V1.5d100	1560	34.1	17.1	2.21

表-5 鉄筋の力学特性

試験体	鉄筋径	規格	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
V2.3, V1.5, V1.2	D22	SD345	398	554	181.1
	D10		362	535	183.2
V1.8	D22	SD345	381	575	193.1
	D10		387	522	181.3
V1.8d100, V1.5d100	D35	SD490	536	688	196.0
	D16		380	562	183.3

表-6 試験結果一覧

試験体	破壊形式*)	作用せん断力 (実験値)		計算値 $V_{c,cal}$ (kN)	実験値/ 計算値 $V_{c,exp}/V_{c,cal}$	実験値/ 計算値 $V_{u,exp}/V_{c,cal}$
		斜めひび割れ発生時 $V_{c,exp}$ (kN)	最大荷重時 $V_{u,exp}$ (kN)			
		①	②	③	①/③	②/③
V2.3	DT1	79.7	79.7	74.1	1.08	1.08
V1.8	DT2	42.9	88.2	84.3	0.51	1.05
V1.5	DT2	41.8	61.4	92.8	0.45	0.66
V1.2	DT2	36.9	59.2	83.9	0.44	0.71
V1.8d100	DT1	222.2	222.2	379.5	0.59	0.59
V1.5d100	SC	174.6	598.2	388.7	0.45	1.54

*)DT1, DT2：斜め引張破壊，SC：せん断圧縮破壊

点鎖線)の大きい方で決定される⁴⁾。一般的には、 $a/d=2.0\sim 2.5$ 付近がその境界となる。一方、高性能軽量コンクリートを用いた RC 梁では、実験結果に見られるように、斜めひび割れ耐力

が普通コンクリートと比較して低下している。アーチ耐力は、圧縮強度に依存するため変わらないとすると、図-10に示すように斜めひび割れ耐力（実線）とアーチ耐力の交点は a/d が大きい方にシフトすることになる。

a/d が 2.94 の普通コンクリートを用いた V2.3 は、典型的な斜め引張破壊形式であるが、高性能軽量コンクリートの試験体は、斜めひび割れが発生しても直ちに破壊せず、両側せん断スパンに斜めひび割れが形成されてアーチ機構へ移行する傾向が認められた。しかしながら、最終的にせん断圧縮破壊に至った試験体は、V1.5d100 だけであり、他はアーチ機構への移行過程で斜めひび割れが卓越して破壊している。これらの現象を総合的に判断すると、高性能軽量コンクリートが斜め引張破壊 (DT1) を引き起こすのは、 a/d が 3.5 以上であり、3.0 付近はアーチ機構形成へ移行する遷移領域と考えられる。

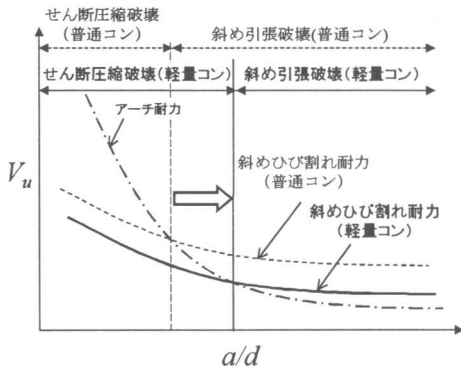


図-10 せん断スパン比と耐力・破壊モード

3.4 単位容積質量がせん断耐力に及ぼす影響

図-11に斜めひび割れ発生時および最大荷重時における作用せん断力と式(1)による計算値の比をコンクリートの単位容積質量との関係で示す。同図および表-6からわかるように、高性能軽量コンクリートの斜めひび割れ発生時の作用せん断力は、斜め引張破壊のせん断耐力算定式による計算値の 44~59%程度と低くなっている。一方、終局時のせん断耐力は、V1.8では普通コンクリートと同様に、実験値と式(1)

のせん断耐力算定式による計算値の比はほぼ 1.0 であり、普通コンクリートのせん断耐力算定式が適用できる。しかしながら、V1.5およびV1.2では、実験値が計算値より大幅に低下しておりコンクリートの単位容積質量が小さい場合には、普通コンクリートのせん断耐力算定式をそのまま適用するのは適当ではないと思われる。

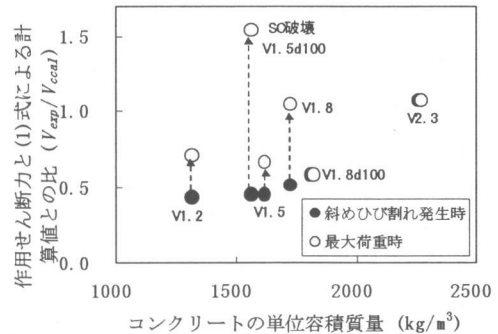


図-11 作用せん断力と式(1)による計算値の比とコンクリートの単位容積質量の関係

4. 高性能軽量コンクリートの強度特性およびせん断耐力評価方法の提案

4.1 強度特性

ここでは、せん断耐力に影響を及ぼす高性能軽量コンクリートの強度特性について考察した。図-12~14に高性能軽量コンクリートと普通コンクリートの引張強度比、ヤング係数比および付着強度比とコンクリートの単位容積質量の関係を示す。高性能軽量コンクリートの各物性値は、水中標準養生した供試体の実験値である。付着強度以外の普通コンクリートの各物性値は、高性能軽量コンクリートの各圧縮強度に対して図中に示すそれぞれの物性値を求める計算式⁵⁾で算出した計算値である。

図-12に実線で示す $\eta_{\tau} = (\rho/2300)^{1/2}$ は本研究で提案する高性能軽量コンクリートの引張強度に対する低減係数である。ユーロコードでは、コンクリートの単位容積質量 ρ を用いて、普通コンクリートに対する軽量コンクリートの引張強度およびせん断耐力の低減係数としては $\eta_1 = 0.4 + 0.6(\rho/2400)$ を、ヤング係数に対しては

$\eta_E = (\rho/2400)^2$ をそれぞれ提案している。ただし、日本では一般的に普通コンクリートの単位容積質量としては 2300kg/m^3 が使われているため、 $\eta_1 = 0.4 + 0.6(\rho/2300)$ 、 $\eta_E = (\rho/2300)^2$ として図に破線で示す。 ρ が $1000 \sim 2300\text{kg/m}^3$ の範囲においては、 η_T はユーロコードの η_1 とほぼ同等の値を与えることがわかる。

η_T の提案にあたっては、 $\rho=0$ の時に原点を通ること、また後述する η_{EM} および η_s と同じ形で表せることから $\eta_T = (\rho/2300)^{1/2}$ とした。

図-13に示すヤング係数の低減係数には、ユーロコードの η_E では高性能軽量コンクリートのヤング係数を過小評価するため、 $\eta_{EM} = (\rho/2300)^{3/2}$ を提案する。

図-14に土木学会規準(JSCE-G503)に示される付着強度試験方法(案)に準じて行った引抜き試験結果を、高性能軽量コンクリートと普通コンクリートの付着強度比と単位容積質量の関係で示す。この図より、普通コンクリートに比べて単位容積質量が小さくなるに従い、付着強度が小さくなっていることがわかる。これは、コンクリートの単位容積質量が小さいほど、コンクリートの引張強度が小さくなり、割れひび割れが生じやすいことによるものと考えられる。

4.2 セン断耐力

4.1 で述べたように、コンクリートの基本物性が $\eta = (\rho/2300)^n$ の形式で表現できることがわかった。そこで、せん断耐力の低減についても、現行の一律 70%に低下させるのではなく、これと同様の形で表せるかどうかを検討した。

図-15は、高性能軽量コンクリートを用いた RC 梁の斜めひび割れ発生時および最大荷重時の作用せん断力と式(1)で算出した斜め引張破壊耐力の計算値を比較したものである。実験値としては、本研究のデータ(●)と川口ら⁶⁾(▲)、前堀ら⁷⁾(■)のデータを用いた。

図中の実線は、実験値の傾向を表す低減係数として $\eta_s = (\rho/2300)^{3/2}$ を乗じる方法を用いた場合の計算値に対する比を示している。

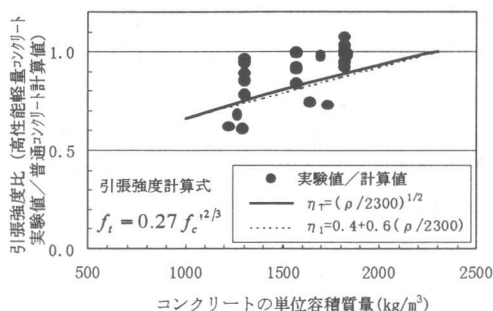


図-12 引張強度比と単位容積質量の関係

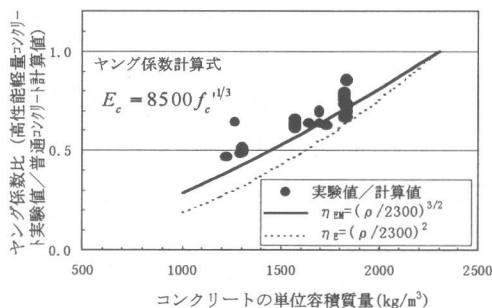


図-13 ヤング係数比と単位容積質量の関係

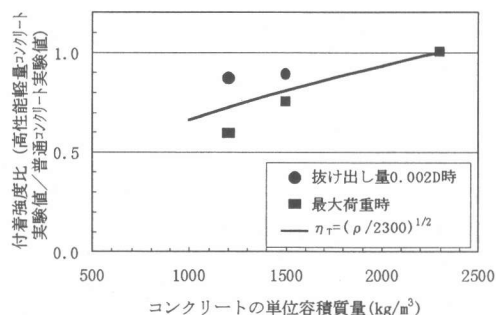


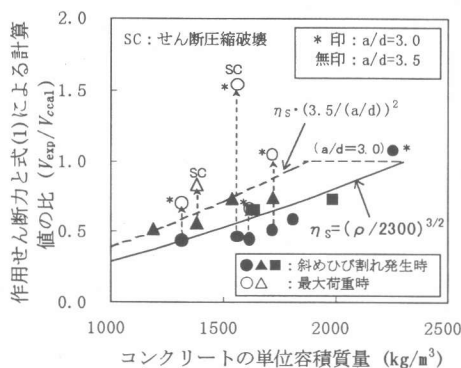
図-14 付着強度比と単位容積質量の関係

3.3 でも述べたように、図中の*印で示す a/d が 3.0 付近のものは、普通コンクリートを除いて全試験体がタイドアーチ的機構へ移行している。一方、 a/d が 3.5 の場合はほとんどが斜め引張破壊している。しかしながら、 a/d が 3.5 であってもタイドアーチ的機構へ移行しているもの ($\rho=1380\text{kg/m}^3$) もある。

タイドアーチ的機構へ移行しないで斜め引張破壊する a/d が 3.5 以上の場合、斜め引張破壊

耐力算定式に η_s の低減係数を乗じることで、斜めひび割れに基づくせん断耐力を十分に評価できると思われる。

しかしながら、 a/d が 3.0 の場合では、せん断耐力の評価には斜めひび割れ発生後のタイドアーチ的機構の効果を考慮する必要がある。ただし、 $a/d=3.0$ でも完全にタイドアーチが形成されてせん断圧縮破壊となるわけではないことから、斜め引張破壊からタイドアーチへの移行過程として、図中の破線で示すように耐力の増加を a/d の関数として表すことも一法である。



図一 15 斜めひび割れ耐力と単位容積質量の関係

5. まとめ

高性能軽量コンクリートを用いて、単位容積質量を変化させた RC 梁の曲げせん断載荷試験を行った結果、以下のような結論が得られた。

- (1) 高性能軽量コンクリートの単位容積質量が小さくなるに従い、RC 梁の斜めひび割れ発生耐力は小さくなる。
- (2) 高性能軽量コンクリートを用いた場合、普通コンクリートに比べて、より大きい a/d でせん断圧縮破壊モードへ移行する。
- (3) 高性能軽量コンクリートの強度特性値を算出するには、引張強度および付着強度はコンクリートの単位容積質量の低下に対して、 $\eta_1=(\rho/2300)^{1/2}$ の低減係数を乗じ、ヤング係数は $\eta_{EM}=(\rho/2300)^{3/2}$ の低減係数を乗じるのが適当と考えられる。

- (4) 高性能軽量コンクリートを用いた RC 梁の斜めひび割れ発生耐力は、単位容積質量の低下に対して、 $\eta_s=(\rho/2300)^{3/2}$ の低減係数を乗じて算出するのが適当と考えられる。
- (5) a/d が 3.0~3.5 付近で、斜めひび割れ発生後にタイドアーチ的機構を形成するモードに移行しており、せん断耐力算定には破壊モードの変化を考慮する必要がある。

謝辞

本研究を実施するにあたり、国土交通省港湾技術研究所構造部の山田昌郎氏、太平洋セメント(株)中央研究所の岡本享久氏、榎木隆氏、石田聡氏ならびに前田建設工業(株)技術研究所の横沢和夫氏に多大なるご協力を頂きました。ここに、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1)(社)土木学会、「平成 8 年制定 コンクリート標準示方書 設計編」、1996
- 2)J. Walraven : Design of structures with lightweight concrete: Present status of revision of EC-2, pp.57-70, 2000.6
- 3)二羽淳一郎, 山田一字, 横沢和夫, 岡村甫 : せん断補強鉄筋を用いない RC 梁のせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, 第 372 号/V-5, pp.167-176, 1986.8
- 4)田辺忠顕, 檜貝勇, 梅原秀哲, 二羽淳一郎著 : コンクリート構造, 朝倉書店, 1992.6
- 5)岡村甫著 : コンクリート構造の限界状態設計法(第 2 版), 共立出版, 1984.5
- 6)川口哲生, 二羽淳一郎, 文載欽, 前堀伸平 : 超軽量骨材を使用した普通強度 RC はりのせん断耐力, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.595-600, 2000
- 7)前堀伸平, 田村聖, 岡本享久, 二羽淳一郎 : 高性能軽量骨材を用いた大型 PC はりのせん断耐荷性状, 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, pp.95~100, 2000.8