

支笏降下軽石を置換した軽量コンクリートの付着性状に関する基礎的研究

BASIC RESEARCH ON THE BOND STRENGTH OF LIGHT-WEIGHT CONCRETE USING THE SHIKOTU PUMICE FLOW

長森 正*

by Tadashi NAGAMORI

1. はじめに

北海道千歳市周辺に存在している火山礫は軽量な発泡軽石で、支笏降下軽石(Spfa-1)と分類されている。この周辺は約4万年前と推定される支笏カルデラ形成の火山活動により、大規模な火砕流堆積物及びそれに先行する降下軽石が長期にわたり噴出堆積し、支笏第1テフラを構成している¹⁾。これらの堆積した火山礫の処分並びに活用方法として、コンクリート製品への利用が考えられる。特に支笏降下軽石は多孔質及び低密度であり、軽量コンクリート用骨材としての有効活用が見込まれ、軽量コンクリート用骨材としての利用に着目した。

火山礫骨材の有効利用としては、高い吸水性から緑化時の排水改良材やポーラスコンクリート等の研究は行われているが²⁾、強度特性に関するものは比較的少ない。筆者等は基礎的な研究として支笏降下軽石の火山礫を使用した軽量コンクリートの強度性状を検討してきた。既報³⁾では具体的に火山礫の置換率、水セメント比及び単位セメント量の因子がコンクリートのフレッシュ性状と硬化性状に与える影響について検討した。具体的な火山礫コンクリートの用途として、鋼板にラチス状切片材の棒鋼を植設し互いに向き合わせ、内部にコンクリートを充填したサンドイッチ状合成鋼板パネルや、あるいは鋼管に充填したCFT柱の構造部材の充填材料について提案し、検討するものである。このなかで支笏降下軽石を置換したコンクリートの鋼板や棒鋼に関する付着の程度は不明瞭である。

本研究では支笏降下軽石を置換した場合の基礎的な付着性状を把握することを目的とし、鉄筋引抜試験とRC梁型付着試験を実施し、基準とする軽量コンクリートとの比較検討を行い、支笏降下軽石を置換した軽量コンクリートの適用性を検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1) 骨材

支笏降下軽石(Spfa-1)の火山礫は北海道中部から東部一帯に広く分布しており、本実験で使用したものは北海道早来町美々地区で採集した火山礫である。火山礫の物性は産地により異なるが、本火山礫はよく発泡した絹糸光沢を持つ白色及び桃色の降下軽石である⁴⁾。この支笏降下軽石は多孔質で内部に空隙が多数存在している。

表1に物理的性質の試験結果を示すが粒形は角ばり、実積率は50%程度と低い値を示す。絶乾密度は軽量粗骨材に比べ約0.6倍のおよそ0.78g/cm³、表乾密度は約0.7倍のおよそ1.17g/cm³を示す。また24時間吸水率は4倍を超える約46%、単位容積質量は約0.5倍を示し、低密度と高い吸水率の火山礫である。また絶乾状態から水中に浸水させた場合の吸水速度は多孔質のため速く、浸水後3時間で24時間吸水率の70%、9時間で約94%を示す。浸水24時間以降5日間までの吸水率の変化はおよそ5~7%程度の増加を示す。

図1に支笏降下軽石と軽量骨材の浸水後経過時間と吸水率の関係を示す。また化学組成は表2に示すとおりであり⁵⁾、人工軽量骨材よりもSiO₂がやや多い割合となっている。この支笏降下軽石を粗骨材として利用するため、ふるい分けを行い粒径5mm未満は除去し、5mmから15mmのものを粗骨材として粒度調整した。また本実験に使用した軽量コンクリートの人工軽量骨材は、膨張頁岩を原料とした非造粒型を使用した。

表3に骨材のふるい分け試験の通過率を示す。また写真1に粒度調整した支笏降下軽石を示す。

(2) 鉄筋

引抜試験の鉄筋はSD345のD16及びD19の2種類とした。またRC梁型付着試験には引張側にD16、圧縮側にD19を使用し、せん断補強筋としてSR235のΦ6を使用した。鉄筋の機械的性質を表4に示す。

*道都大学助教授 美術学部建築学科
(〒061-1196 北海道北広島市中の沢149番地)

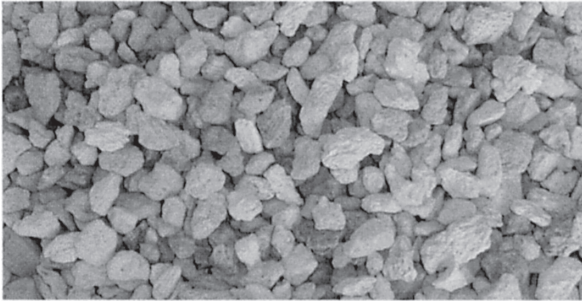


写真1 支笏降下軽石 (Spfa-1)

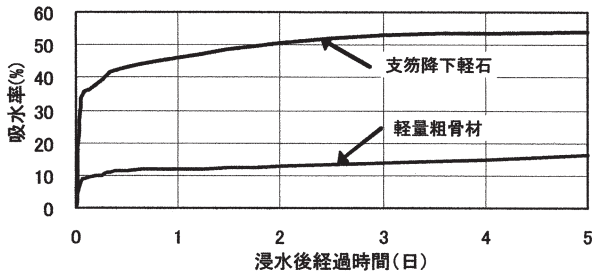


図1 吸水率と経過時間の関係

表1 骨材の物理的性質

種類	絶乾密度 (g/cm ³)	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率* (%)	単位容積質量 (kg/m ³)	実積率 (%)
支笏降下軽石	0.78	1.17	46	393	50.4
軽量粗骨材	1.25	1.61	9.7	794	63.5
軽量細骨材	1.68	2.01	9.8	1110	66.1

※24時間吸水率

表2 支笏降下軽石及び軽量骨材の化学組成

支笏降下軽石 [Spfa-1]	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO
	78.32	0.15	12.39	1.40	0.08
	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	分析
0.17	1.50	3.80	3.50	(WDS*)	
人工軽量骨材	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
	67.40	17.20	3.90	1.50	1.00

※WDS:波長分散型スペクトロメーター

表3 骨材のふるい分け試験結果 (通過率)

ふるい 寸法 (mm)	粗骨材		ふるい 寸法 (mm)	細骨材
	支笏降下軽石 (%)	軽量粗骨材 (%)		軽量細骨材 (%)
25	100		5	100
20	94	100	2.5	98
15	88	98	1.2	67
10	56	55	0.6	44
5	4	7	0.3	28
2.5	0	0	0.15	14
粗粒率	6.46	6.38	粗粒率	2.49

表4 鉄筋の機械的性質

種類	規格	降伏点 (N/mm ²)	降伏歪 (×10 ⁻⁶)	弾性係数 (kN/mm ²)
D16	SD345	374	2261	165
D19	SD345	382	2346	163
Φ6	SR235	248	1618	153

2.2 試験体の種類と調合

本実験では軽量コンクリート2種を基準として、この調合の粗骨材に対し、支笏降下軽石を容積比で50%と100%の2種類置換した。基準調合は非造粒型の人工軽量骨材を用いた軽量コンクリート2種の標準調合から、呼び強度24 N/mm²、水セメント比48%、スランプ18cm、目標空気量5%の組み合わせを使用した。したがって火山礫置換率の影響を知るため、水セメント比、細骨材率は同じ値とした。基準調合を含め3種類とし、調合に用いた記号は基準の軽量コンクリート2種をLAとした。また火山礫を50%置換した調合をLA50、100%置換した調合をLA100とした。なお、使用したセメントは普通ポルトランドセメント(密度3.15g/cm³)、混和剤はAE減水剤を単位セメント量の0.25%使用した。またコンクリート製造時の火山礫の含水状態は24時間以上十分に吸水させ、表面水を除去し表乾状態として使用した。

基準調合を表5に、試験体の種類と調合を表6に示す。

表5 基準調合表

種類	呼び強度 (N/mm ²)	W/C (%)	s/a (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
軽量2種	24	48	49	18	5.0
	単位量(kg/m ³)				
	W	C	S	G	AE減水剤
	180	375	641	535	0.94

W:水, C:セメント, S:軽量細骨材, G:軽量粗骨材, s/a:細骨材率

表6 調合表

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				Spfa-1
	W	C	S	G	Spfa-1		
LA	48	49	180	375	641	535	—
LA50			180	375	641	267	194
LA100			180	375	641	—	388

Spfa-1:支笏降下軽石

2.3 鉄筋引抜試験

鉄筋引抜試験は JSCE-G503「引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強度試験方法」⁶⁾を参考に実施した。試験体は鉄筋の径に関係なく一辺を150mmとした立方体供試体とし、鉄筋とコンクリートの付着区間は自由端側に設け、その長さは鉄筋径の4倍とした。また載荷板からの応力の均等化を図るために、載荷板側に鉄筋径の2倍の長さの非付着区間を設けた。自由端側の鉄筋突出長さは5mm程度とし、1/100mmダイヤルゲージを端面に垂直に取付けて荷重増加によるすべり量を測定した。またその時の鉄筋の歪変化をみるために歪ゲージを載荷板側に貼り付けて荷重毎の歪を測定した。試験は各調合、各鉄筋径につき3試験体を実施した。なお、引抜試験における付着応力度の算出は次式(1)で行った。

引抜試験の試験体設置図を図2に示す。

$$\tau_{\max} = P / 4 \pi D^2 \quad (1)$$

τ_{\max} : 付着応力度 (N/mm²) P : 最大荷重 (N)
D : 鉄筋径 (mm)

2.4 RC 梁型付着試験

試験体の形状及び加力図を図3に、試験体配筋を表7に示す。梁型付着試験はRILEM法に準拠した⁷⁾。

梁型試験体の形状・寸法及び配筋は、断面の幅250mm、高さ200mm、長さ780mmとし、鉄筋の配筋は主筋の引張側を2-D16、圧縮側を2-D19とし、せん断補強筋はΦ6を50mm間隔、かぶり厚25mmで配筋した。付着試験区間は両側自由端からノッチ部までとし15d_bの240mmとした。ノッチ部から外側のコンクリートと自由端鉄筋とのすべり量は試験体両端に取付けた1/500mmダイヤルゲージにより測定した。試験体は一方向の繰返し加力とし、原則として両端のダイヤルゲージのいずれか大きい値を示すすべり量を0.025mm毎に制御し、各制御すべりについて一方向5回の繰返し荷重を行った。またノッチ部に鉄筋歪ゲージを上下2枚貼付け、各制御における歪を記録した。なお、RC梁型付着試験における付着応力度の算出は次式(2)で行った。

$$\tau_{\max} = M / j \cdot \phi \cdot l_s \quad (2)$$

τ_{\max} : 付着応力度

M : 最大曲げモーメント (N・mm)

j : 7/8d φ : 鉄筋周長 (mm)

l_s : 付着長さ (=240mm)

d : 有効せい (=162 mm)

表7 RC梁型試験体の配筋

主筋		せん断補強筋	形状・付着長 (mm)
引張側	圧縮側		
2-D16	2-D19	2-6Φ @50 Pw=0.45%	200×250×780 付着長:15d

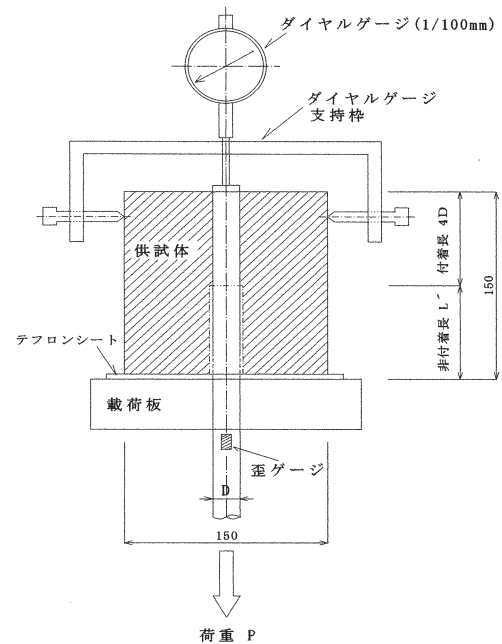


図2 鉄筋引抜試験の詳細図

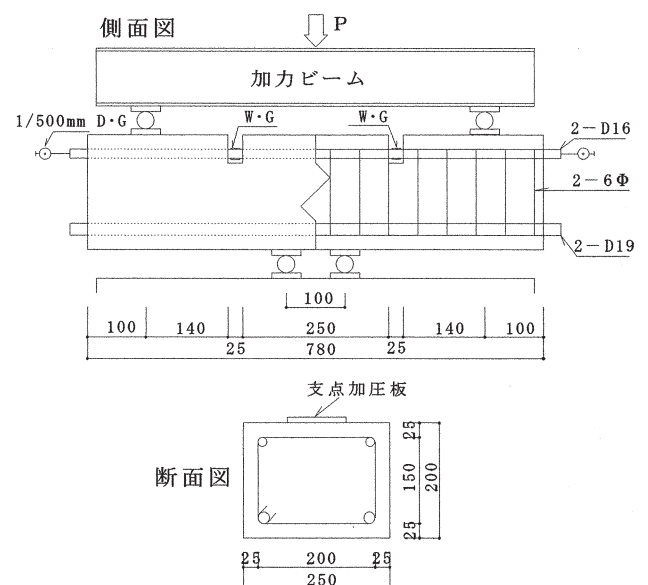


図3 RC梁型付着試験体の設置図

3. 実験結果

3.1 コンクリート強度

材齢28日のコンクリート強度試験結果を表8に示す。基準 LA の圧縮強度 35.2 N/mm² に対し支笏降下軽石を 50%置換した LA50 は約 70%, 100%置換した LA100 は約 45%を示した。引張強度は LA の 2.17 N/mm² に対し LA50 は約 80%, LA100 で約 52%を示し、火山礫置換率に対する圧縮応力の割合を確認した。

図4に圧縮応力と歪の関係を示す。置換率を高くすると圧縮応力は低下した。また同一強度では置換率が高い程圧縮歪は大きくなり、静弾性係数は 12.4 kN/mm² と 10.3 kN/mm² と低い値となった。また、図5に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。なお、図には日本建築学会の「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説—許容応力度設計法 1999」⁸⁾ によるコンクリートの静弾性係数に関する規準式(旧来式)による参考曲線を記入した。但し、実験値の単位体積重量は 1700~1545kg/m³ (16.6~15.1 kN/m³) と差があるため、規準式の単位体積重量は $\gamma=15$, 16 kN/m³ の2種類を記載した。図5に示すように、圧縮強度と静弾性係数の関係は概ね単位体積重量に対応した規準式の近くに分布しており、比較的良好な相関が認められた。

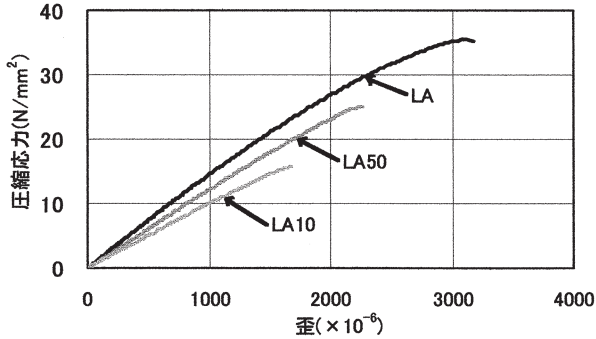


図4 圧縮強度と歪の関係

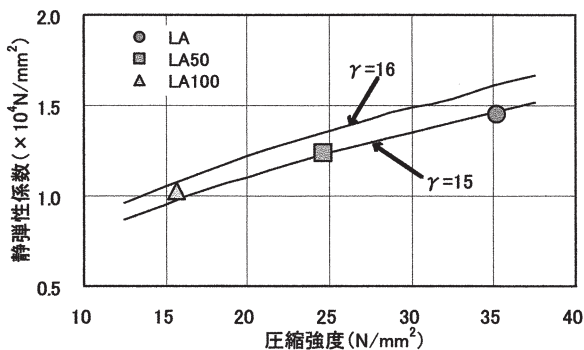


図5 圧縮強度と静弾性係数の関係

表8 コンクリート強度試験結果

種類	スランブ	空気量	単位体積重量	圧縮強度	引張強度	静弾性係数
	(cm)	(%)	(kg/m ³)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(kN/mm ²)
LA	18.0	5.5	1700	35.2	2.17	14.5
LA50	18.6	6.0	1675	24.6	1.72	12.4
LA100	19.4	6.3	1545	15.7	1.13	10.3

3.2 鉄筋引抜試験結果

鉄筋引抜試験結果を表9に、0.1mmまでの自由端すべり量における平均付着応力度を表10に、付着応力度と鉄筋歪の関係を図6に、付着応力度と鉄筋すべり量(0~0.4mm)の関係を図7に、0.1mmまでの詳細を図8に示す。

表9 鉄筋引抜試験結果

鉄筋種類	種類	P _{max}	τ _{max}	S	ε	τ _{max} /F _c	τ _{max} /LA
		(kN)	(N/mm ²)	(mm)	(× 10 ⁻⁶)	(N/mm ²)	
D16	LA	48.3	15.1	0.29	1580	0.43	1.00
	LA50	52.3	16.4	0.29	1580	0.67	1.08
	LA100	39.1	13.2	0.13	1170	0.78	0.80
D19	LA	66.6	14.5	0.38	1350	0.41	1.00
	LA50	62.6	13.7	0.27	1425	0.56	0.94
	LA100	55.6	12.1	0.19	1280	0.77	0.83

P_{max}: 荷重, τ_{max}: 付着応力度, S: すべり量, ε: 鉄筋歪, F_c: コンクリート強度

表10 自由端すべり量における平均付着応力度(0~0.1mm)

鉄筋種類	試験体	平均付着応力度 τ (N/mm ²)					
		すべり量(mm)	0.01	0.02	0.04	0.06	0.08
D16	LA	3.8	5.5	8.7	11.5	12.8	13.3
	LA50	2.7	4.6	6.9	11.0	11.9	13.6
	LA100	3.7	5.3	8.5	10.8	11.5	13.2
D19	LA	4.2	6.1	9.2	10.6	11.5	12.2
	LA50	3.9	5.9	8.6	10.5	11.5	12.4
	LA100	2.1	4.4	7.3	9.3	10.6	11.2

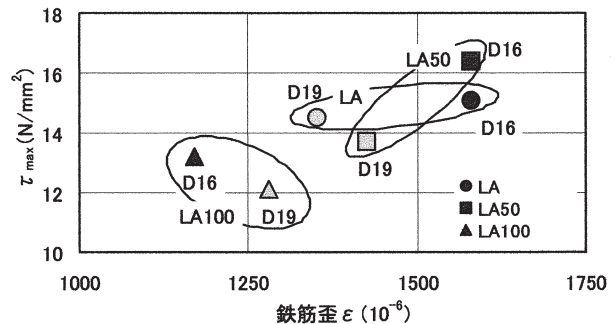


図6 付着応力度と鉄筋歪の関係

図6は自由端すべり量が最大時の付着応力度と鉄筋歪度の関係である。両鉄筋とも付着応力度が高い程、高い鉄筋歪度を示した。火山礫置換の有無ではLA100が両鉄筋とも付着応力度、鉄筋歪ともに低く、低い圧縮強度が要因と考えられる。LAとLA50ではD19よりD16タイプの方が付着応力度、鉄筋歪ともに高くなり、鉄筋径の影響があるように思われるが、本実験結果からだけでは明確ではない。

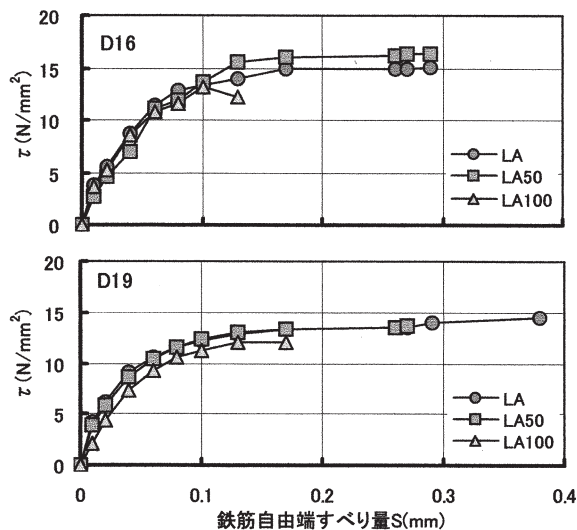


図7 付着応力度と鉄筋すべり量の関係 (0~0.4mm)

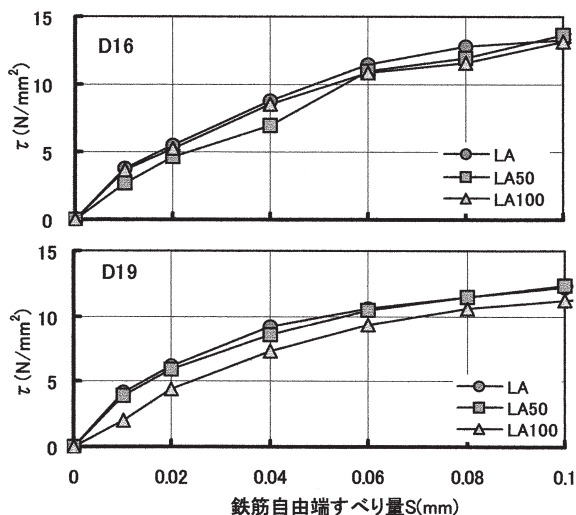


図8 付着応力度と鉄筋すべり量の関係 (0~0.1mm)

付着応力度と鉄筋すべり量の関係を見ると、D16はLA50の一部(0.04mm)に付着応力度が低い部分があるが、0~0.1mm間ではほぼ同様な挙動を示した。

その後すべりながら徐々に付着応力度は増加し、LAとLA50ではともに0.29mmのすべり量を記録し、それぞれ15.1 N/mm²、と16.4 N/mm²を示し、火山礫

50%置換のLA50の方が高い値を示した。LA100は0.1mmのすべりで付着応力度はピークを示し、その後すべりとともに付着応力度が低下していった。

D19の0~0.1mm間では初期すべりの段階からLA100が低い付着応力度を示し、LA50は基準のLAと同様な挙動を示した。その後はD16と同様に0.1mm以降すべりが大きく進行し、LAは0.38mmで14.5 N/mm²、LA50は0.27mmで13.7 N/mm²となり、LA50の挙動はLAにほぼ一致した。LA100は0.19mmのすべりで最も低い12.1 N/mm²を記録した。

したがって火山礫を置換した場合の影響としては、軽量コンクリート2種のLAと火山礫50%置換のLA50とは比較的近似的な関係を示し、火山礫100%置換のLA100は両鉄筋とも0.1mm~0.12mm程度の早期で最大付着応力度に達し、最も低い付着応力度を示した。圧縮強度が低いほど最大付着応力度は低くなり、特に火山礫による影響が強いと考えられる。

試験後の供試体を破壊し、鉄筋とコンクリートの付着断面を目視すると、LA50とLA100の断面では火山礫の割れが多く確認され、鉄筋周面の火山礫骨材が破壊することにより強度が低く、すべり量が多くなったと思われる。またD16とD19の鉄筋径の違いによる付着応力度は、火山礫置換の有無による影響は少なく、D16鉄筋の方が最大付着応力度は高い傾向を示した。

3.3 RC梁型付着試験結果

(1) 破壊状況

試験体のひび割れ図を図9に、LA100の破壊状況を写真2に示す。初期ひび割れが確認された荷重はLA、LA50は40kN、50kNを示し、LA100は10kNと早期荷重からランダムにひび割れが多数発生した。その後の荷重増加に伴いLAはせん断ひび割れが進行し、最終的に中央支持点の圧縮部座屈による曲げ破壊に至った。火山礫を置換したLA50、LA100は引張側鉄筋の一部に鉄筋に沿ったひび割れが進行し最終的に付着割裂破壊に至り、特にLA100は鉄筋降伏荷重前に破壊した。

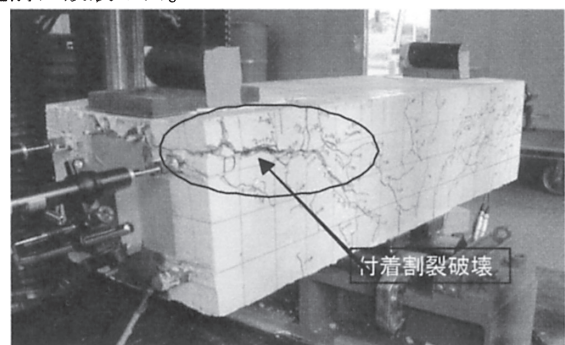


写真2 破壊状況 (LA100)

表 11 梁型付着試験結果

試験体	初期ひび割れ時			最大荷重時					破壊状況
	荷重 P(kN)	付着応力度 τ (N/mm ²)	$\tau/\sqrt{F_c}$ ※	荷重 P(kN)	付着応力度 τ (N/mm ²)	$\tau/\sqrt{F_c}$ ※	最大すべり S _{max} (mm)	平均すべり S _A (mm)	
LA	40	1.41	0.24	217.5	7.67	1.29	0.212	0.149	曲げ破壊(圧縮部座屈)
LA50	50	1.76	0.35	190.0	6.70	1.35	0.574	0.306	鉄筋付着割裂破壊
LA100	10	0.35	0.09	170.0	6.00	1.51	0.506	0.428	鉄筋付着割裂破壊

※ F_c:試験体コンクリートの圧縮強度

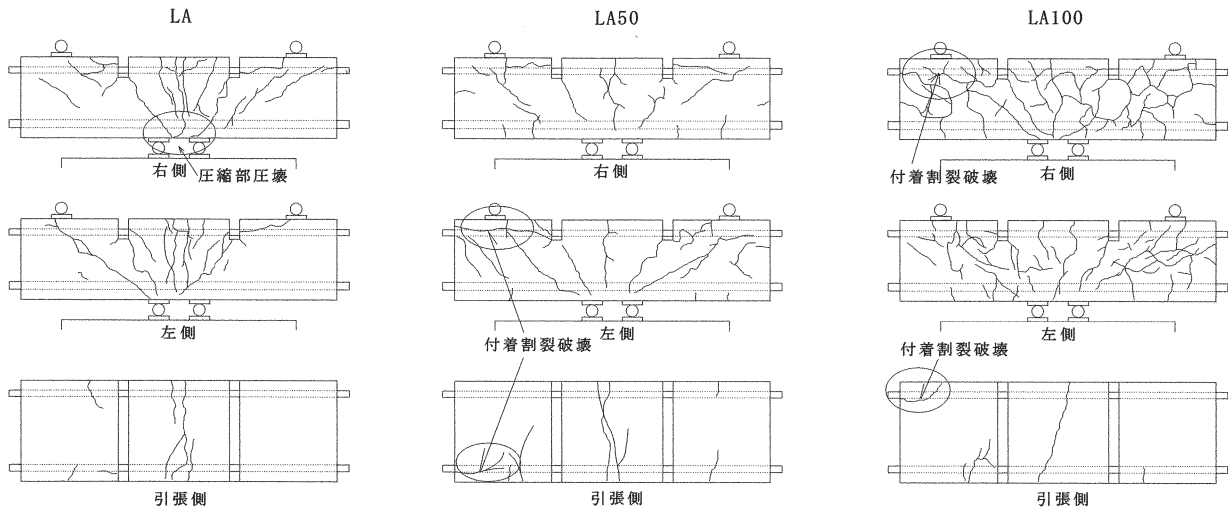


図 9 ひび割れ状況図

(2) 荷重と鉄筋すべり

梁型付着試験の結果を表 11 に、各試験体の繰返し荷重と鉄筋すべり量の関係を図 10 に示す。表 11 の S_{max} は試験体両端の最大値、S_A は両端の平均とした。

LA は繰返し荷重における鉄筋すべり量の進展が最も少なく、鉄筋降伏荷重までのすべりは僅かで、以降繰返し荷重によりすべりが僅かずつ進行し、最終的に最大荷重時の 218kN で 0.21mm のすべり量を示した。LA50 は 150 kN 程度までは僅かなすべり量であったが、以降鉄筋降伏荷重前の 165kN 付近ですべりが大きく進行し、その後降伏荷重を僅かに上回る最大荷重 190kN で 0.57mm と大きなすべり量を示した。

LA100 は 120 kN まではすべり量は僅かであったが、その後 LA50 より低い 150kN 付近ですべりが進行していき、以降 LA50 と同様に繰返し荷重ですべりが大きく進行し、鉄筋降伏荷重前の 170 kN で最大荷重に達し鉄筋付着割裂破壊に至った。したがって火山礫を置換した LA50、LA100 では鉄筋降伏荷重前から鉄筋の抜出しが始まり、繰返し荷重によりすべり量の進展が基準の LA に比べ大きくなり、LA100 ではいっそうの荷重の低下がみられた。これは前述した鉄筋引張試験と同様に、強度的に脆い火山礫骨材を多く置換するほど、鉄筋周面の火山礫が割裂破壊し荷重も低く経過し、すべり量が多くなったと考えられる。

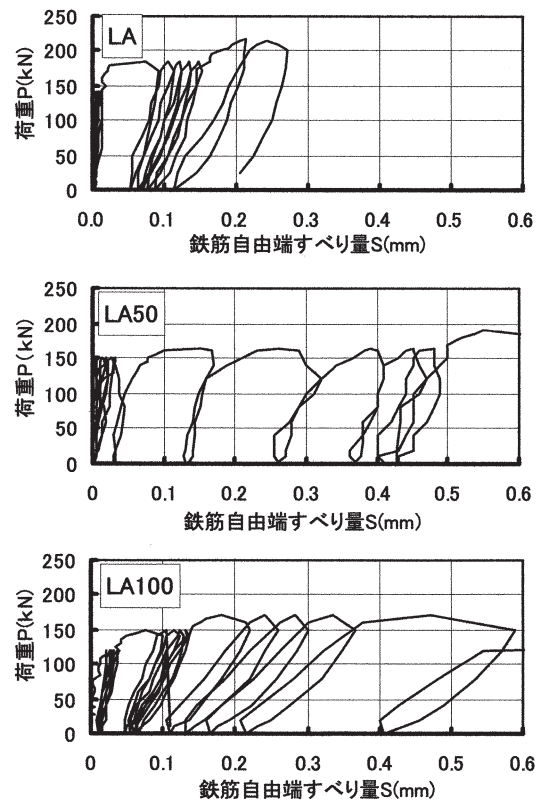


図 10 荷重と鉄筋すべり量の関係

(3) 荷重と鉄筋歪

荷重と鉄筋歪の関係を図 11 に示す。各タイプとも荷重の進行とノッチ部 4ヶ所の鉄筋歪との関係は、ほぼ同様の挙動を示した。荷重と鉄筋歪の関係はほぼ直線的に歪が進行し、火山礫置換の有無による大きな違いは確認できなかった。鉄筋降伏荷重の値は、LA では 201kN、LA50 では 185 kN を示したが、LA100 では鉄筋降伏前に付着割裂破壊に至った。

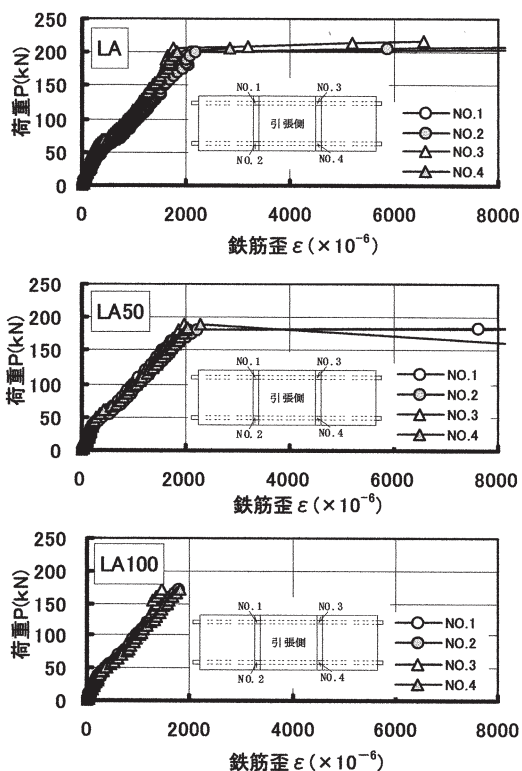


図 11 荷重と鉄筋歪の関係

(4) 付着応力度

各調査の付着応力度とすべり量の比較を図 12 に、付着応力度に関してコンクリート強度の影響を以て補正した $\tau/\sqrt{F_c}$ とすべり量の比較を図 13 に示す。

コンクリートの圧縮強度が高い LA は付着応力度も高く繰返し荷重によるすべり量は僅かな挙動を示した。これに対し火山礫を置換した試験体では、すべりが大きく進行し始める時の付着応力度は LA50 が LA100 より大きく、その後はほぼ同様に荷重の増加がない繰返し荷重により、すべりが大きく進行する挙動を示した。また LA50 は付着応力度が 5.3N/mm^2 (荷重 150 kN) 付近まではすべり量も少なく比較的 LA に近い挙動を示したといえる (図 12)。

コンクリート強度の影響を $\sqrt{F_c}$ で補正した $\tau/\sqrt{F_c}$ とすべり量との関係では、LA50 は更に LA と挙動が

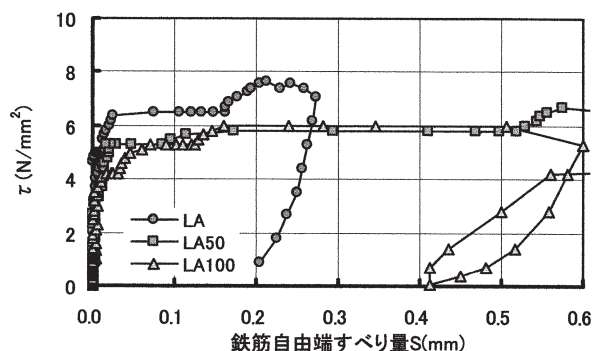


図 12 付着応力度と鉄筋すべり量の関係

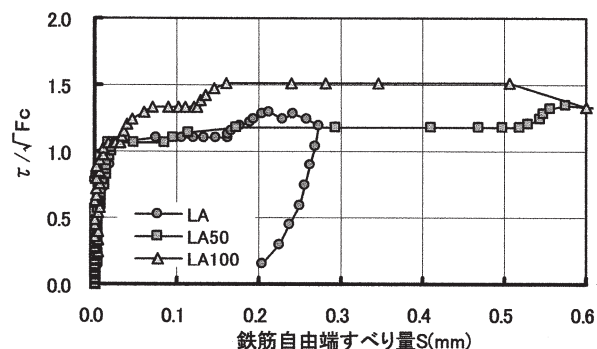


図 13 $\tau/\sqrt{F_c}$ と鉄筋すべり量の関係

近似し、ほぼ同様な関係を示した。LA100 はコンクリート強度が特に低いため、補正した場合 $\tau/\sqrt{F_c}$ の値が最も高い値となった (図 13)。

したがって、軽量コンクリートに火山礫を置換した LA50, LA100 は全体的に LA に比較して付着応力度が低下し、繰返し荷重によるすべり量が著しく進展することが確認された。

4. まとめ

本研究では大量に堆積した火山礫の処分並びに有効活用する方法として、軽量コンクリートの粗骨材としての利用に着目し、支筋降下軽石を置換した軽量コンクリートの付着性状について基礎的な資料を得た。その結果、実験の範囲内で次のような知見が得られた。

4.1 鉄筋引抜試験

1) 軽量コンクリートに支筋降下軽石を置換することで、コンクリート強度では圧縮・引張強度ともに強度が低くなり、50%置換では圧縮強度が 24.6N/mm^2 を発現したが、100%置換では 15.7N/mm^2 と著しく強度が低下した。

- 2) 火山礫を置換すると基準の軽量コンクリートと比較して、鉄筋周面の火山礫骨材の破壊により低荷重時からすべりが発生し、低い付着応力度を示した。しかしながら、置換率 50% では軽量コンクリート 2 種と比較して、圧縮強度は低いが付着応力度と鉄筋すべりの関係では差は少なく、比較的近似的な関係を示した。

4. 2 RC 梁型付着試験

- 1) 支筋降下軽石を置換した軽量コンクリートは圧縮強度が低いため、早期荷重時からひび割れが多数確認され、特に置換率 100% ではランダムに多数発生した。最終的な破壊状況は、基準の軽量コンクリートが支持点圧縮部の座屈による曲げ破壊に至ったのに対し、支筋降下軽石を置換した場合は引張側鉄筋部分の付着割裂により破壊した。
- 2) 支筋降下軽石を置換した場合は、鉄筋降伏荷重前から鉄筋の拔出しが始まり、更に繰返し荷重によりすべり量の進展が基準に比べいっそう大きくなり、試験体破壊時の最大荷重も基準の軽量コンクリートと比較すると、置換率 50% で 87%、置換率 100% では 78% と大きく低下した。
- 3) 支筋降下軽石を置換し更に置換率を多くすることにより、強度、静弾性係数が低くなる傾向を示し、付着性状に全般的な性能低下が確認された。しかし置換率 50% では鉄筋引抜試験と同様に付着性状は基準軽量コンクリートとの差は少なく、比較的近似していることも確認された。

支筋降下軽石を利用した火山礫軽量コンクリートの用途として、鋼板や鋼管等によって閉塞された部材への補助的な充填材料としての利用が考えられる。今後は CFT 柱や鋼板パネルの充填材として検討する予定である。

参考文献

- 1) 日本第四紀学会編集委員会編：第四紀露頭集日本のテフラ，pp. 26-27，1996
- 2) 加賀谷誠，濱田昌宏，城門義嗣，飯村弥：火山礫を用いたコンクリートの自然親和性に関する実験的研究，セメント・コンクリート論文集，NO. 52，pp. 486-491，1998
- 3) 長森正：火山礫を置換した軽量コンクリートの強度特性に関する基礎的研究，コンクリート工学論文集，第 17 巻 1 号，pp. 1-7，2006
- 4) 曾屋龍典，佐藤博之：地域地質研究報告千歳地域の地質，地質調査所，1980
- 5) 北海道恵庭市教育委員会編：2004 北海道恵庭市詳細分布調査報告書カリンバ 3 遺跡(3)，pp. 212，2004
- 6) 土木学会編：コンクリート標準示方書基準編，引抜き試験により鉄筋とコンクリートとの付着強度試験方法，pp. 435-438，2000. 6
- 7) RILEM Committee on Fracture Mechanics of Concrete-Test Methods, Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-Point Bend Tests on Notched Beams, Materials and Structures, Vol. 106, pp. 285-290, 1985
- 8) 日本建築学会編：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説[許容応力度設計法 1999]，pp. 38-40，2002

(2006年12月受付 2007年6月受理)