

支笏第1軽石の火山礫を利用した軽量コンクリートの強度特性に関する基礎的研究

BASIC RESEARCH REGARDING THE STRENGTH OF LIGHT-WEIGHT CONCRETE THAT UTILIZED THE LAPILLI OF SPFA-1

長森 正*・越前谷 智**

by Tadashi NAGAMORI and Satoshi ECHIZENYA

1. 研究の目的

北海道千歳市周辺には約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⁾²⁾。

さらに上層には周辺の恵庭・樽前火山や有珠山等の火山活動の繰返しによるテフラが存在している。

この支笏第1テフラの火山礫は軽量の発泡軽石で、名称を「支笏第1軽石 (Spfa-1)」と分類され豊富に存在している。この火山礫の活用方法として、コンクリート製品への利用が考えられる。特に多孔質の火山礫は軽量化に効果があり、軽量コンクリート用骨材としての有効活用が見込まれる。但し脆い火山礫を骨材として全量使用した場合、コンクリート強度を期待する事が出来ないため、人工軽量骨材に容積置換することで必要強度が得られると考えられる。

この火山礫を置換した軽量コンクリートの利用法としては、主構造を補助するための材料として検討し、高強度を必要としない箇所への利用が考えられる。例えば外郭に棒鋼のラチス状切片材を植設した鋼板間に充填した構造用パネルに、あるいは鋼管に充填したCFT柱等の構造部材とすることで有効活用が期待できる。このような鋼板や鋼管等による閉塞された構造部材の充填コンクリート材として利用するための基礎的研究として、本実験では支笏第1軽石の火山礫を置換した軽量コンクリートの強度特性について検討した。

具体的には軽量コンクリートの粗骨材に火山礫を容積置換し、置換割合、水セメント比、単位セメント量を変動因子にした火山礫軽量コンクリートの調合設計を実施し、基礎的性状の把握を目的に、コンクリート用骨材としての可能性を検討した。

2. 火山礫骨材

支笏第1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骨材である。

その性状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¹⁾²⁾。この火山礫は多孔質で内部に空隙が多数存在しているため、物理試験結果から低密度と高い吸水率を示す。24時間吸水率を表2に示すが、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94%を示す。

また24時間以降5日までの吸水率はおおよそ5~7%程度の増加を示す。また化学組成は表1に示すとおりであり³⁾、人工軽量骨材よりもSiO₂がやや多い割合となっている。粒度未調整の状態では細骨材分が多く含み粗骨材として取り扱えないので、ふるい分け試験により粒径5mm未満のものを除去し、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。骨材の化学組成を表1に、物理的性質を表2に、骨材のふるい分け試験の通過率を表3に示す。

表1 火山礫及び人工軽量骨材の化学組成

支笏第一 降下軽石 [Spfa-1] (奥村:1988)	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 内田膨張頁岩	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2 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 (%)
火山礫	0.78	1.17	46.2	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
普通細骨材	2.44	2.57	2.9	1660	68.0

※24時間吸水率

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

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	
	火山礫 (%)	軽量粗骨材 (%)		軽量細骨材 (%)	普通細骨材 (%)
25	100		5	100	100
20	94	100	2.5	98	89
15	88	98	1.2	67	66
10	56	55	0.6	44	40
5	4	7	0.3	28	13
2.5	0	0	0.15	14	2
粗粒率	6.46	6.38	粗粒率	2.49	2.90

3. 実験概要

本実験では火山礫置換率を変数として調合設計を実施したものを実験Ⅰ、次に水セメント比と単位セメント量を変動因子として調合設計を実施したものを実験Ⅱとして検討した。

実験Ⅰでは軽量コンクリート1種及び2種を基準調合として、この調合の粗骨材に対し火山礫を容積置換した。置換率を0%、25%、50%、75%、100%として調合設計を実施した。

実験Ⅱでは火山礫の置換率を50%、100%の2種類に固定し、水セメント比と単位セメント量を変数として組み合わせた調合設計を実施し、コンクリートのフレッシュ性状と硬化性状について検討した。

表4に実験Ⅰ、Ⅱの火山礫置換率、水セメント比、単位セメント量の組み合わせを示す。なお、実験Ⅰ、Ⅱともに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タオル等で除去し表乾状態として使用した。またコンクリート強度試験はJIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験」、JIS A 1113「コンクリートの割裂引張強度試験」、JSCE-G502「コンクリートの静弾性係数試験」に準拠し、供試体寸法は直径100mm、長さ200mmの円柱供試体により実施し、養生方法は20℃水中養生とした。

4. 実験Ⅰ

4.1 調合及び試験方法

軽量コンクリート1種、2種の基準調合を表5に示す。この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1種、2種の標準調合から呼び強度24N/mm²、スランプ18cmの組み合わせを使用した。この基準調合に対して、火山礫を25%ずつ容積置換した調合表を表6に示す。調合に用いた記号は1種をLⅠ、2種をLⅡとしてその後に火山礫置換率を記載した。

例：LⅠ-25（軽量1種に火山礫25%容積置換）

なお、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。

表4 実験組み合わせ表

種類	火山礫置換率 (%)	W/C (%)	単位セメント量 (kg/m ³)
実験Ⅰ	0, 25, 50, 75, 100	47, 50	376, 381
実験Ⅱ	50, 100	45, 50, 55, 60	350, 400

表5 実験Ⅰ基準調合表

種類	W/C (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位量(kg/m ³)			
	(%)	(cm)	(%)	(kg/m ³)	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
LⅠ	50	18	4.5	188	376	814	531	0.940
LⅡ	47	18	5.0	179	381	637	536	0.953

表6 実験Ⅰ調合表

種類	単位量 (kg/m ³)					
	水	セメント	細骨材		粗骨材	
			普通砂	軽量骨材	軽量骨材	火山礫
LⅠ-0	188	376	814	—	531	—
LⅠ-25	188	376	814	—	398	97
LⅠ-50	188	376	814	—	266	193
LⅠ-75	188	376	814	—	133	290
LⅠ-100	188	376	814	—	—	386
LⅡ-0	179	381	—	637	536	—
LⅡ-25	179	381	—	637	402	97
LⅡ-50	179	381	—	637	268	195
LⅡ-75	179	381	—	637	135	292
LⅡ-100	179	381	—	637	—	390

4.2 火山礫置換率の影響

材齢28日の強度試験結果を表7に示す。また圧縮強度の比較図を図1に、基準調合に対する圧縮強度の割合を図2に、圧縮強度と引張強度の関係を図3に示す。

圧縮強度は火山礫の置換割合を高くしていくと強度は低下した（図1）。LⅠとLⅡを比較すると、LⅡの基準強度が高いため、火山礫を置換してもLⅡ調合の方が圧縮強度は高い値を示した。置換率50%～75%の強度は、LⅠで18.6～17.4N/mm²、LⅡで21.1

表7 実験Ⅰ強度試験結果

種類	圧縮強度	偏差	引張強度	偏差	静弾性係数	見掛け密度
	材齢28日 (N/mm ²)				(×10 ⁴ N/mm ²)	(kg/m ³)
LⅠ-0	29.6	4.2	2.92	0.30	1.59	1788
LⅠ-25	22.0	4.6	2.21	0.46	1.41	1725
LⅠ-50	18.6	3.5	1.64	0.19	1.36	1655
LⅠ-75	17.4	2.6	1.28	0.18	1.25	1636
LⅠ-100	11.4	2.1	0.99	0.14	0.82	1618
LⅡ-0	34.4	5.1	2.20	0.27	1.72	1685
LⅡ-25	30.0	4.8	2.23	0.28	1.51	1647
LⅡ-50	21.1	2.9	1.99	0.62	1.22	1617
LⅡ-75	19.1	2.3	1.37	0.11	1.01	1590
LⅡ-100	13.8	2.4	1.05	0.22	0.83	1502

～19.1N/mm²を記録し、比較的高い圧縮強度を示した。

基準調合からの強度割合は置換率 25%では差があるが、置換率 50%～100%ではほぼ同様な低下割合を示した(図2)。すなわち25%置換ではL Iで74%、L IIで87%と差があるが、50%置換では61%～63%、75%置換では55%～59%、100%置換では38%～40%の強度割合を示した。

引張強度は火山礫骨材自体が脆く強度が低いため、加圧時に火山礫と軽量骨材が割裂を起こし、置換率が高くなるほど強度は低下した。図3に圧縮強度と引張強度の関係を示す。普通コンクリートのような $\sigma_c=1/10\sigma_t$ のような明瞭な比例関係はみられず、全体的に低い強度を示した。置換率 25%から 100%の圧縮強度に対する比率では、L Iで1/10～1/13、L IIで1/11～1/14を示し、基準軽量コンクリートの比率が1/9～1/15であるので、バラツキはあるがほぼ同様な割合と思われる。

静弾性係数はL Iで $0.8\sim1.4\times10^4\text{N/mm}^2$ 、L IIで $0.8\sim1.5\times10^4\text{N/mm}^2$ の範囲を示し、火山礫を置換すると基準調合よりもかなり小さな値となった。

見掛け密度は火山礫を利用することにより僅かずつ小さくなり、軽量I種で1618～1725 kg/m³、軽量II種で1502～1702 kg/m³の範囲にあり、人工軽量コンクリートから更に軽量化出来る事が確認された。

5. 実験Ⅱ

5.1 調合及び試験方法

実験Ⅱでは単位セメント量と水セメント比を実験変数として調合設計を実施した。具体的には火山礫置換率を50%、100%の2種類、単位セメント量を350kg/m³、400kg/m³の2種類、水セメント比を45、50、55、60%の4種類として組み合わせた16種類の調合設計を実施し、単位セメント量と水セメント比の違いによる影響を検討した。また調合は軽量1種を基準とし、細骨材率は40%に固定し、空気量は5.5%、混和剤はAE減水剤を単位セメント量の0.25%使用して調合設計を実施した。測定はフレッシュ性状として、スランプ、空気量、ブリーディング率を記録し、硬化性状は圧縮強度試験を材齢28日、13週、26週について実施した。また材齢28日の割裂引張強度、静弾性係数を記録した。実験Ⅱの調合表を表8に示す。

調合に用いた記号について「35-LGS-45」を例に示すと、最初の数字35は単位セメント量350 kg/m³、最後の数字45は水セメント比を示し、LGSは火山礫置換率50%、LSは火山礫置換100%を示す。

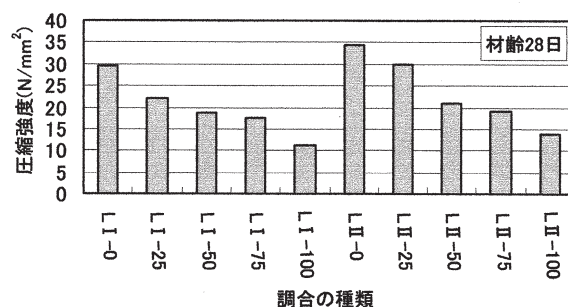


図1 圧縮強度の比較

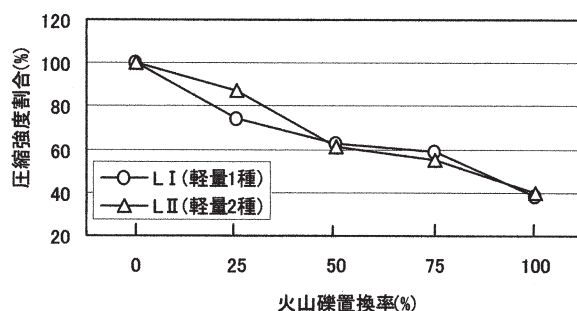


図2 基準調合からの強度割合

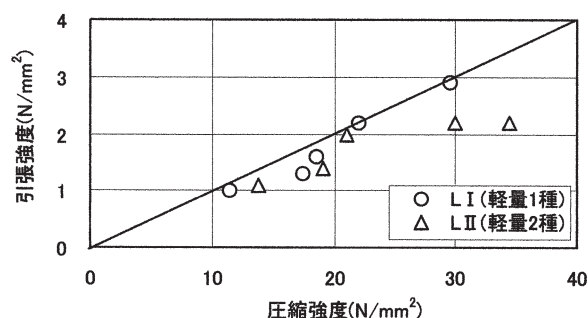


図3 圧縮強度と引張強度の関係

表8 実験Ⅱ調合表

番号	記号	W/C	単位水量 (kg/m ³)	単位量(kg/m ³)				備考
				セメント	火山礫	粗骨材	細骨材	
1	35-LS-50	50	175	350	466	—	672	置換率 100%
2	35-LS-55	55	193	350	453	—	653	
3	35-LS-60	60	210	350	442	—	637	
4	35-LS-65	65	228	350	429	—	617	
5	40-LS-45	45	180	400	452	—	650	
6	40-LS-50	50	200	400	437	—	630	
7	40-LS-55	55	220	400	423	—	610	
8	40-LS-60	60	240	400	409	—	590	
9	35-LGS-45	45	158	350	239	329	688	置換率 50%
10	35-LGS-50	50	175	350	233	320	672	
11	35-LGS-55	55	193	350	227	312	653	
12	35-LGS-60	60	210	350	221	303	637	
13	40-LGS-45	45	180	400	226	311	650	
14	40-LGS-50	50	200	400	219	301	630	
15	40-LGS-55	55	220	400	212	291	610	
16	40-LGS-60	60	240	400	205	282	590	

表 9 実験Ⅱ強度試験結果

番号	記号	スランブ (cm)	空気量 (%)	ブリージ ング率(%)	見掛け密度 (kg/m ³)	圧縮強度(N/mm ²)			引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 ($\times 10^4$ N/mm ²)	備考
						材齢28日	材齢13週	材齢26週			
1	35-LS-50	6.1	6.5	—	1670	11.5	14.6	14.0	1.28	0.80	置換率 100%
2	35-LS-55	16.0	7.0	1.05	1650	10.4	11.6	10.4	1.03	0.52	
3	35-LS-60	17.5	6.0	1.29	1618	8.6	10.9	12.8	1.06	0.64	
4	35-LS-65	24.0	6.0	2.08	1618	8.9	9.1	9.1	1.19	0.72	
5	40-LS-45	13.8	5.0	0.47	1739	14.9	15.7	16.4	1.01	0.96	
6	40-LS-50	18.2	5.0	1.13	1726	12.3	13.8	14.1	1.13	0.87	
7	40-LS-55	24.0	3.0	1.80	1783	11.9	13.8	14.1	1.20	0.91	
8	40-LS-60	24.0	4.0	1.95	1720	12.3	12.4	12.2	1.00	0.89	
9	35-LGS-45	6.5	4.0	0.33	1822	19.7	21.1	22.3	1.31	1.23	置換率 50%
10	35-LGS-50	12.0	6.0	0.54	1758	16.1	17.4	18.1	1.57	1.20	
11	35-LGS-55	17.5	5.0	0.80	1764	14.6	14.9	17.3	1.57	1.18	
12	35-LGS-60	20.0	4.5	1.07	1739	15.4	16.5	15.9	1.84	1.12	
13	40-LGS-45	10.6	4.5	0.47	1834	24.1	25.4	26.4	1.28	1.42	
14	40-LGS-50	18.0	3.0	0.90	1847	20.0	22.5	20.6	1.29	1.11	
15	40-LGS-55	20.5	3.5	1.73	1854	16.4	17.8	20.3	1.59	1.18	
16	40-LGS-60	25.0	3.5	2.42	1777	16.6	16.7	19.9	1.49	1.04	

5. 2 水セメント比・単位セメント量の影響

(1) フレッシュコンクリートの性状

実験Ⅱのフレッシュ性状の測定結果を表9に示す。

水セメント比とスランブ、ブリーディング率の関係をそれぞれ図4と図5に示す。スランブは各調合とも水セメント比を高くすると増加している。水セメント比45%ではスランブが6.5～13.8cmと低く、また60%では35-LS調合を除きスランブが20～25cmと高くワーカビリティが悪化した。単位セメント量の違いでは、単位セメント量が多い400 kg/m³の方が350 kg/m³よりもスランブが高くなる傾向がみられた。ブリーディング率はスランブが高くなるほど型枠投入後のブリーディングも多く確認され、ブリーディング率も高い値を示した。また35-LS-65の調合を除き、スランブと同様に単位セメント量400 kg/m³の方が350 kg/m³よりブリーディング率が高い傾向がみられた。

(2) 圧縮強度と水セメント比

図6に材齢28日の圧縮強度の比較を、図7に圧縮強度と水セメント比の関係を示す。

単位セメント量の違いによる影響では、火山礫50%置換のLGS、100%置換のLSの両グループとも単位セメント量が多い40-LGS、40-LS調合の強度が高く発現した。水セメント比の影響は、火山礫50%置換のLGS調合では水セメント比55%と60%の強度差はほとんどみられないが、45～55%の間では水セメント比が低いほど圧縮強度は高く発現し、水セメント比の違いによる影響が大きい。圧縮強度の値は35-LGS調合で15～20 N/mm²、40-LGS調合で16～24 N/mm²の強度が発現した。火山礫100%置換の40-LS

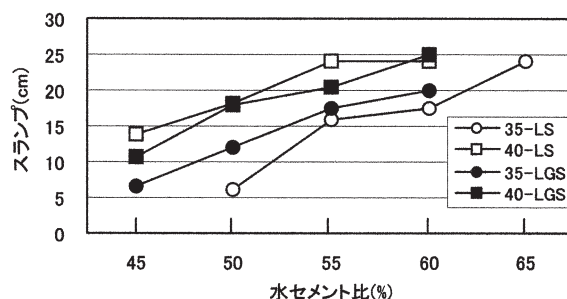


図4 水セメント比とスランブの関係

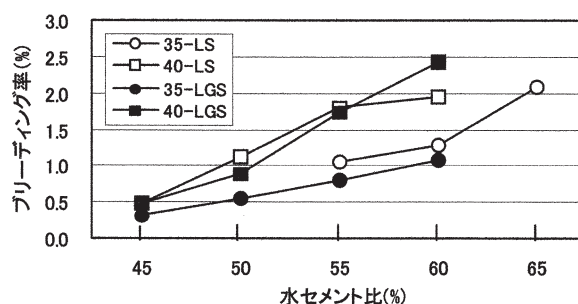


図5 水セメント比とブリーディング率の関係

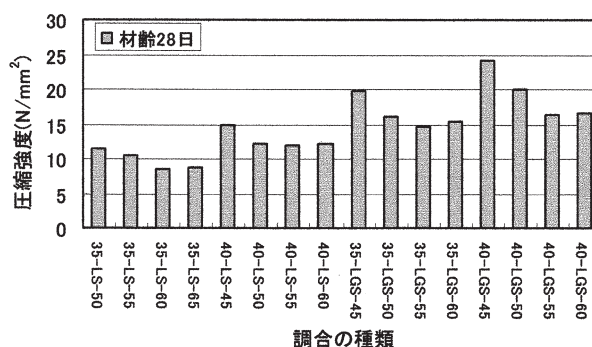


図6 圧縮強度の比較

調合では水セメント比 50～60%で強度差は殆どみられず、35-LS 調合では全体的に強度は低く、水セメント比の違いによる圧縮強度の影響は少ない。圧縮強度の値は 35-LS 調合で 8～11N/mm²、40-LS 調合で 12～15 N/mm²を示した。

図 8 に圧縮強度とセメント水比との関係を示す。これはセメント水比と圧縮強度の平均値から、最小二乗法により近似直線を求めたものである。置換率 50%の場合、40-LGS 調合の方が近似直線の傾きが急であり、単位セメント量が多く、セメント水比が高い調合ほど強度は高く発現する傾向を示した。置換率 100%でもこの傾向はみられるが、近似直線の傾きは緩やかであり全般的に強度は低く、セメント水比との関係は低いと思われる。

(3) 圧縮強度と静弾性係数

圧縮強度と静弾性係数の関係を図 9 に示す。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・解説—許容応力度設計法 1999」によるコンクリートのヤング係数に関する規準式（旧来式）による参考曲線を記入した。（1 式）

$$E = 21000 \times (\gamma / 23)^{1.5} \times (F_c / 20)^{1/2} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (1)$$

但し、実験値の見掛け密度に差があるため、コンクリートの気乾単位体積重量は $\gamma = 16, 17, 18 \text{ (kN/m}^3\text{)}$ の 3 種類の規準式を示した。

置換率 50%の 35-LGS と 40-LGS の静弾性係数の平均は $1.04 \sim 1.42 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ の範囲を示し、図 9 のグラフから 35-LGS は $\gamma = 17 \text{ (kN/m}^3\text{)}$ の規準式に近く分布し、40-LGS は $\gamma = 18 \text{ (kN/m}^3\text{)}$ の規準式に比べやや下方に分布したが、比較的良好な相関が認められた。置換率 100%の 40-LS は $\gamma = 17 \text{ (kN/m}^3\text{)}$ の規準式の僅かに下方に分布した。また 35-LS の静弾性係数は $0.52 \sim 0.79 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ と低く、 $\gamma = 16 \text{ (kN/m}^3\text{)}$ の規準式の下方に分布し、圧縮強度と静弾性係数の関係は 40-LS に比べ低い。

(4) 圧縮強度と養生材齢

養生材齢 28 日、13 週、26 週と圧縮強度の関係を図 10 に示す。置換率 100%の 35-LS 調合では水セメント比 50～60%までは、13 週材齢で僅かながら強度が増進したが、26 週材齢では水セメント比 60%を除き、強度の増進はみられない。40-LS 調合も水セメント比 45%を除き、35-LS 調合と同様な結果を示した。また水セメント比が最大の 35-LS-65 と 40-LS-60 の調合は 28 日材齢から 26 週材齢までの強度がほぼ同じ値を示し、強度の増進はみられない。置換率 50%の 35-LGS 調合は、水セメント比 60%を除き 13 週、26 週材齢ともに僅かながら強度が増進した。同様に 40-LGS 調合では水セメント比 50%を除き全体的に強度増進がみられた。したがって置換率 100%

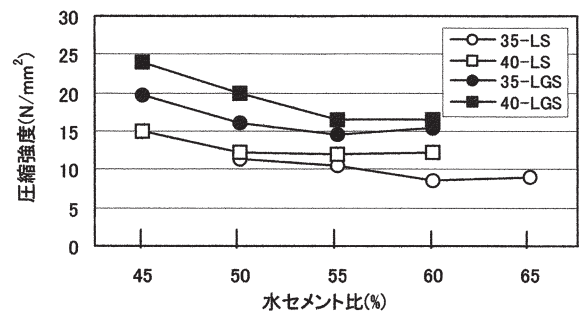


図 7 水セメント比と圧縮強度の関係

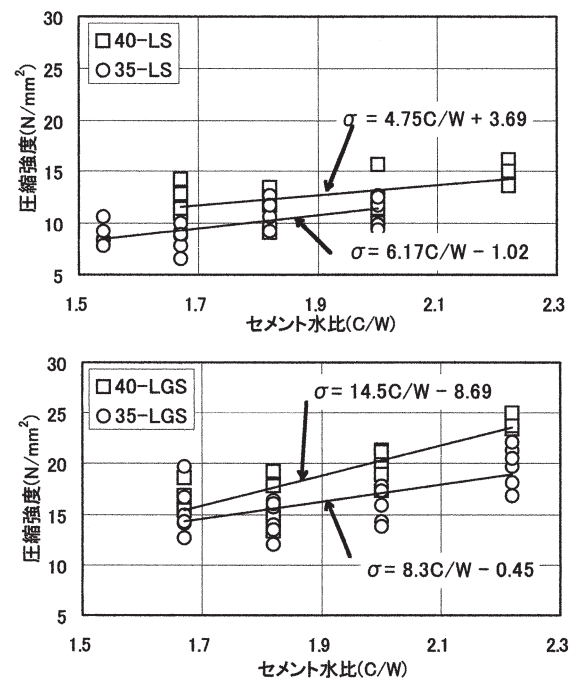


図 8 セメント水比と圧縮強度の関係

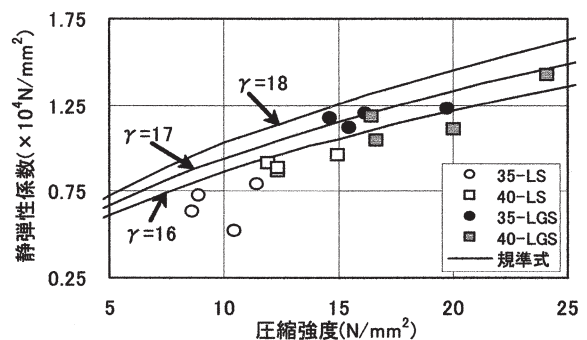


図 9 静弾性係数と圧縮強度の関係

の調合では 13 週材齢で僅かに強度増進がみられたが、一部調合を除き 26 週材齢での強度増進は殆ど無く、置換率 50%の調合では一部調合を除き 13 週、26 週とも強度増進がみられ、単位セメント量が多い調合に強度の伸びが高く確認された。

6. まとめ

本研究では、火山礫の有効活用の観点からコンクリート用骨材としての利用に着目し、軽量コンクリートの粗骨材に火山礫を容積置換した調合設計を行い、構造物コンクリート材料としての可能性を検討した。その結果、実験の範囲内で次のような知見が得られた。

- (1) 軽量コンクリート1種、及び2種の調合に対し、火山礫の置換率を多くするほど圧縮強度は低下した。基準調合からの圧縮強度の低下割合は、軽量コンクリート1種、2種ともにほぼ同様な割合を示し、置換率の影響に対する圧縮強度の低下割合が示された。この中で、置換率50%では基準コンクリートのおよ60%程度の強度が発現し、強度と単位容積質量から検討すると置換率50%までが比較的有效性があると思われる。
- (2) 水セメント比と単位セメント量を変数とした調合では、水セメント比を高くすると圧縮強度は低く発現し、単位セメント量を多くすると圧縮強度は高く発現した。したがって水セメント比を45～50%程度の比較的小さい値とし、単位セメント量を $400\text{kg}/\text{m}^3$ とする調合により、本実験では火山礫100%置換の調合で圧縮強度 $15\text{ N}/\text{mm}^2$ 程度、火山礫50%置換の調合で圧縮強度 $24\text{ N}/\text{mm}^2$ 程度のコンクリートを作製することが可能であった。
- (3) 静弾性係数は置換率を多くするほど軽量コンクリートに比べかなり低くなり、特に置換率100%の調合では $1.0 \times 10^4\text{ N}/\text{mm}^2$ 以下の低い値を示した。また、日本建築学会の規準式との関係では、置換率100%の場合は規準式よりも低く、置換率50%では比較的良好な相関がある。
- (4) 養生材齢と圧縮強度では、13週材齢でほぼすべての調合に僅かながら強度増進が確認され、26週材齢では一部調合を除き置換率50%の調合に強度の伸びが多く確認された。また単位セメント量が多い調合に強度の伸び率が高い傾向を示した。

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) 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)
- 3) 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)
- 4) 長森 正・佐藤善太郎・越前谷智：降下軽石の火山れきを利用した軽量コンクリートに関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、材料施工、pp. 7-8、(2001)

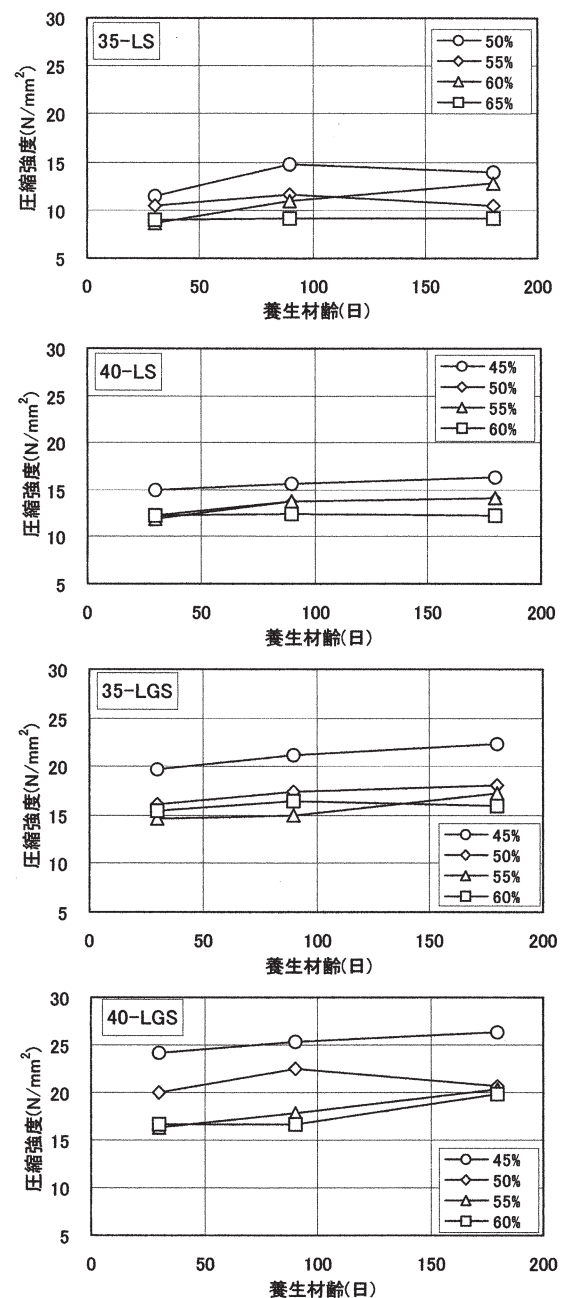


図10 養生材齢と圧縮強度の関係

- 5) 長森 正・佐藤善太郎・越前谷智：火山れきを利用した軽量コンクリートに関する実験的研究、日本建築学会北海道支部研究報告集、pp. 393-396、(2002)
- 6) 長森 正・佐藤善太郎・越前谷智：火山れきを利用した軽量コンクリートの強度・付着力に関する基礎的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、材料施工、pp. 323-324、(2003)
- 7) 永島茂雄・他：粗・細骨材に火山灰を利用したコンクリートの強度特性に関する基礎実験(その1)、日本建築学会大会学術講演梗概集、材料施工、pp. 337-338、(1982)

(2005年11月2日受付 2006年1月12日受理)