

# ビーチロックの物理・力学特性

檀上 堯<sup>1\*</sup>・川崎 了<sup>2</sup>・畠 俊郎<sup>3</sup>

<sup>1</sup>北海道大学大学院 工学院環境循環システム専攻 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

<sup>2</sup>北海道大学大学院 工学研究院環境循環システム部門 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

<sup>3</sup>長野工業高等専門学校 環境都市工学科 (〒381-8550 長野県長野市徳間716)

\*E-mail: DANJO@geo-er.eng.hokudai.ac.jp

国内外の文献において報告例が少ないビーチロックの物理・力学特性を把握し、さらに一軸圧縮強さ  $q_u$  と各種物性の相関を検討することを目的として、原位置試験および室内試験を実施した。その結果、ビーチロックの湿潤状態における  $q_u$  は、調査地点 A, M, G でそれぞれ  $11.14 \pm 4.11$  MPa,  $19.91 \pm 6.72$  MPa,  $42.23 \pm 11.54$  MPa であることがわかった。また、 $q_u$  との相関が高い物性は形成年代  $t$  であり、 $q_u \approx 0.0158t$  なる関係がみられた。これは、一般の堆積岩に比べて強度増加の速度が速いことを示している。さらに、微生物の影響がビーチロック形成に関与している可能性があることがわかった。

**Key Words :** beachrock, physical property, mechanical property, unconfined compression strength, radiocarbon age, elemental concentration, microbe

## 1. 諸言

我が国における社会資本は、高度経済成長期において大量に造られた。国土交通省は国土交通白書 2010<sup>1)</sup>の中で、建設後 50 年以上が経過する港湾岸壁施設の割合は 2009 年度では約 5 % であるのに対し、2029 年には約 48 % まで高まると述べている。また、公共事業費は今後も少ないと考えられるため、今ある港湾岸壁施設を低コストで修復・補強し、さらにその修復・補強材が自己修復能力を持つこと、すなわち劣化によるひび割れを自然の生物学的・化学的作用により塞ぐことが望ましい。

そこで、筆者らは沿岸域で適用可能な自己修復能力を持つ人工岩盤の研究開発を進めている。具体的には、自然の材料（微生物、砂、貝殻、サンゴ片、海藻など）を用いて、厳しい気象条件に耐えうる強度の人工岩盤を短期間で形成させることを目指している。そして、港湾岸壁施設のひび割れ箇所が狭い範囲であれば、人工岩盤の材料を流し込み、また、修復範囲が広い場合は、今ある港湾岸壁施設や岩盤になじみやすい材料を用いた人工岩盤を必要となる場所に形成させるという対策を考えている。

その人工岩盤のモデルとして、筆者らは自然界に存在するビーチロック (beachrock, 写真-1 参照) に着目した。地学団体研究所によるビーチロックの定義<sup>2)</sup>は「砂浜の潮間帯に生ずる非常に新しい固結した石灰質岩。(中略)セメント物質は石灰質・鉄分、被セメント物質は粒

度・質に関係なくあらゆるものを含む。熱帯・亜熱帯の海岸にみられ、日本近海では南西諸島にみられる。」となっている。ビーチロックは、形成期間が短いものでは数十年程度である点<sup>3) 4)</sup>、また海岸に存在する点、さらに台風や大潮などによる侵食の影響を受けているにもかかわらず存在している点において、人工岩盤のモデルとしての有効性があると筆者らは考えている。そこで、ビーチロックが人工岩盤のモデルとして適しているかを判断するために、既往のビーチロックに関する国内外の文献を集め、必要な情報をまとめてきた。その結果、ビーチロックの物理・力学特性に関する情報が非常に少ないことがわかった。一軸圧縮強さや密度などの物理・力学特性の把握は、ビーチロックが人工岩盤のモデルとして



写真-1 ビーチロックの例 (沖縄県国頭郡本部町後備浜原)

適しているかどうか、すなわち厳しい沿岸域の気象条件に耐える物理・力学特性を有しているかどうかを判断する上で重要である。また、ビーチロック形成の要因について、海水の温度変化<sup>5)</sup>、地下水のpH変化<sup>6)</sup>、微生物の影響<sup>7, 8)</sup>などの諸説があり、特に自己修復能力を有する人工岩盤の開発のためには現地に生息する微生物の代謝を利用することが望ましいため、調査対象地点のビーチロック形成における微生物の影響の有無を評価することは、人工岩盤を作製していく上で重要な情報になると考えられる。さらに、形成年代に対する強度変化や強度増加に伴う元素含有率の変化も同様に重要である。

以上のことから、本稿では、試験データが非常に不足しているビーチロックの物理・力学特性を把握し、一軸圧縮強さと形成年代および元素含有率、微生物の菌数との相関を検討することを目的とし、国内で調査・報告事例が多い沖縄本島のビーチロックを対象とし、現地および室内にて、物理・力学試験、元素分析、菌数測定を行なった結果について報告する。

## 2. 試験方法

沖縄本島の後備浜原、真栄田、儀間、済井出（以下、順に調査地点A, M, G, Sとする）の4地点（図-1参照）のビーチロックを対象にして、物理・力学試験および元素分析、菌数測定を行なった。その試験項目の内訳は表-1のとおりである。調査地点A, M, Gでは、一軸圧縮試験、密度測定、含水比測定、弾性波速度測定、元素分析を実施した。一方、これらの3地点に比べて軟質な堆積物であり、かつサンゴ片などの粒形が残っている調査地点Sでは、針貫入試験および菌数測定を行なった。各試験項目の試験方法は、以下のとおりである。

### (1) 一軸圧縮試験

調査地点A, M, Gの3地点のビーチロック周辺から15cm×15cm×25cm程度の岩石を1つずつ採取し、採取した岩石を直径3cm×高さ6cmの円柱形供試体に成形した。コアリングの方向は、直交する2方向（X方向, Y方向）とし、現地から採取する前の岩石の鉛直方向をX方向とした。また、成形した供試体を試験に供するまでの間、水道水に浸けて湿潤状態に保ったものと、80℃の恒温乾燥炉に3日間入れて乾燥状態にしたものに分けた。なお、3日間の炉乾燥により、すべての供試体が一定の質量になることを確認している。供試体数の内訳は、表-2のとおりである。これらの供試体に対して、インストロン万能試験機（INSTRON社製、5586）を用いて一軸圧縮試験を実施した。なお、軸ひずみ速度は0.03mm/min、データサンプリング間隔は0.10sとした。

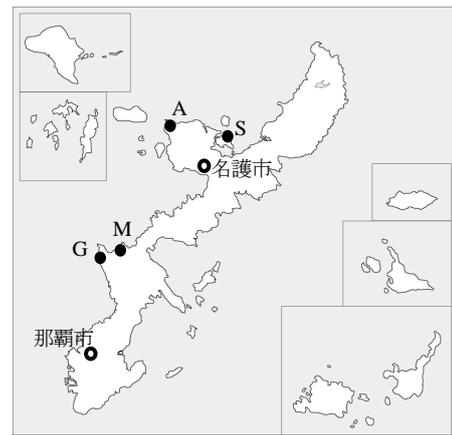


図-1 調査地点

表-1 試験項目

調査地点	物理・力学試験	その他
A, M, G	一軸圧縮試験 密度測定 含水比測定 弾性波速度測定	元素分析 (EDX)
S	針貫入試験	菌数測定

表-2 調査地点A, M, Gの供試体条件

調査地点	方向	状態	供試体名	供試体数
A	X	湿潤 (W)	AXW	3
	Y	同上	AYW	3
	X	乾燥 (D)	AXD	2
	Y	同上	AYD	3
M	X	湿潤 (W)	MXW	3
	Y	同上	MYW	0
	X	乾燥 (D)	MXD	3
	Y	同上	MYD	0
G	X	湿潤 (W)	GXW	3
	Y	同上	GYW	3
	X	乾燥 (D)	GXD	3
	Y	同上	GYD	3

### (2) 密度測定

表-2の供試体について、一軸圧縮試験を行う前に、供試体の高さ、直径、質量の測定を行ない、湿潤および乾燥状態の密度を計算により求めた。

### (3) 含水比試験

含水比試験の方法は、地盤工学会基準（JGS 2134-2009）に準拠して行なった。ただし、炉乾燥の方法が基準と異なり、80℃の恒温乾燥炉に入れ、一定質量となるまで炉乾燥させた。また、本試験は、表-2の湿潤状態の供試体のみを用いて一軸圧縮試験後に行なった。

(4) 弾性波速度測定 (P 波, S 波)

表-2 の供試体について、一軸圧縮試験を行う前に弾性波速度測定装置 (応用地質製, MODEL-5251) によって無拘束圧下における P 波速度および S 波速度の測定を各 3 回ずつ実施した。測定は、超音波の周波数としてそれぞれ 200 kHz および 100 kHz の振動子を用い、また P 波速度測定時においては、振動子と供試体を圧着する際に供試体の端面にグリスを薄く塗布した。

(5) 元素分析

湿潤かつ X 方向の供試体のうち、各調査地点で最も一軸圧縮強さが大きいものを 1 本ずつ選び、実験室内で自然乾燥させ、それらの供試体の一片に白金 (Pt) を蒸着させて、走査型電子顕微鏡 SEM (島津製作所製, SUPERSCAN SS-550) によって観察した。また、エネルギー分散形 X 線分析装置 EDX (島津製作所製, SEDX-500) により元素分析を行なった。

(6) 針貫入試験

調査地点 S の原位置において、軟岩ペネトロ計 (丸東製作所製, SH-70) を用いて、硬さの異なる 2 種類の露出しているビーチロック (EB-1 および EB-2) と土中に埋まっているビーチロック (BB-1) (写真-2 参照) に対して針貫入試験を実施した。一つの試験箇所に対して 5 回ずつ行ない、測定値を平均した。測定値から針貫入勾配である  $N_p$  (N/mm) を求め、本装置の取扱説明書<sup>9)</sup>に記載されている  $N_p$  と一軸圧縮強さの相関図より、一軸圧縮強さを算出した。

(7) 菌数測定

滅菌したスプーンで調査地点 S の各試験箇所の試料を遠沈管に採取し、5°C で保存した。なお、本試験箇所は前節(6)の 3 箇所および BB-1 上部の未固結砂 (US-1)、同海岸のビーチロックが形成されていない場所の未固結



写真-2 調査地点 S の針貫入試験箇所 (黄色の矢印は、右から順に EB-1, EB-2, BB-1)

砂 (US-2) である。それらの試料に対し、ZoBell2216E 培地 (海洋細菌用) と標準寒天培地 (一般細菌用) の 2 種類の培地で菌数測定を実施した。なお、培養期間は 7 日間とした。

3. 試験結果および考察

(1) 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験の結果は、表-3 に示すとおりである。

表-3 ビーチロックの物理・力学特性

状態	供試体 No.	$\rho_t, \rho_d$ g/cm <sup>3</sup>	w %	$q_u$ MPa	$V_p$ km/s	$V_s$ km/s
湿潤 (W)	AXW-1	2.01	12.2	10.88	3.60	2.50
	AXW-2	2.10	10.3	13.99	3.49	2.44
	AXW-3	2.05	11.3	5.63	3.37	2.29
	AYW-1	2.09	—	17.97	3.37	2.32
	AYW-2	2.01	12.5	7.11	3.41	2.15
	AYW-3	2.08	9.3	11.23	3.73	2.35
	平均値 $\pm \sigma$	2.06 $\pm 0.04$	11.1 $\pm 1.2$	11.14 $\pm 4.11$	3.50 $\pm 0.13$	2.34 $\pm 0.11$
乾燥 (D)	AXD-1	1.98	—	25.69	3.75	2.28
	AXD-2	1.91	—	15.29	3.46	2.08
	AYD-1	1.76	—	7.92	3.00	2.05
	AYD-2	2.00	—	19.11	3.85	2.22
	AYD-3	2.00	—	27.10	3.80	2.42
	平均値 $\pm \sigma$	1.93 $\pm 0.09$	—	19.02 $\pm 7.03$	3.57 $\pm 0.32$	2.21 $\pm 0.13$
	湿潤 (W)	MXW-1	1.96	25.2	24.31	3.74
MXW-2		1.96	26.0	11.04	3.44	2.26
MXW-3		1.98	25.2	24.38	3.88	2.54
平均値 $\pm \sigma$		1.97 $\pm 0.01$	25.4 $\pm 0.4$	19.91 $\pm 6.27$	3.69 $\pm 0.18$	2.31 $\pm 0.17$
乾燥 (D)	MXD-1	1.60	—	43.03	3.94	2.77
	MXD-2	1.60	—	26.37	3.80	2.83
	MXD-3	1.57	—	18.25	3.80	2.60
	平均値 $\pm \sigma$	1.59 $\pm 0.01$	—	29.22 $\pm 10.32$	3.85 $\pm 0.07$	2.73 $\pm 0.10$
湿潤 (W)	GXW-1	2.49	3.4	49.71	5.14	—
	GXW-2	2.49	3.6	57.80	5.05	3.49
	GXW-3	2.50	3.4	50.45	4.77	3.40
	GYW-1	2.44	3.7	31.48	4.82	2.98
	GYW-2	2.40	4.2	24.66	4.57	2.78
	GYW-3	2.47	4.1	39.25	4.11	2.76
	平均値 $\pm \sigma$	2.47 $\pm 0.04$	3.7 $\pm 0.1$	42.23 $\pm 11.54$	4.74 $\pm 0.34$	3.08 $\pm 0.31$
乾燥 (D)	GXD-1	2.38	—	36.61	4.09	2.48
	GXD-2	2.36	—	21.86	4.09	2.32
	GXD-3	2.24	—	30.98	3.84	2.46
	GYD-1	2.37	—	39.33	4.20	2.43
	GYD-2	2.31	—	30.39	4.20	2.72
	GYD-3	2.39	—	27.50	3.99	2.62
	平均値 $\pm \sigma$	2.34 $\pm 0.05$	—	31.11 $\pm 5.73$	4.07 $\pm 0.12$	2.51 $\pm 0.13$

なお、同表には、その他の室内試験結果である供試体の湿潤密度  $\rho_t$ 、乾燥密度  $\rho_d$ 、含水比  $w$ 、P 波速度  $V_p$ 、S 波速度  $V_s$  に関する結果についても一緒に示している。同表より、一軸圧縮強さ  $q_u$  の全体的な範囲としては 5.63 ~ 57.80 MPa であり、湿潤状態における  $q_u$  の平均値と標準偏差  $\sigma$  は、調査地点 A, M, G でそれぞれ  $11.14 \pm 4.11$  MPa,  $19.91 \pm 6.72$  MPa,  $42.23 \pm 11.54$  MPa である。調査地点によって大きく異なっており、調査地点 G が最も  $q_u$  が大きく、調査地点 A が最も  $q_u$  が小さいことがわかる。この大小関係は、乾燥状態の供試体についても同様である。一方、本調査地点の沖縄本島を含む南西諸島に多く存在し、石材としても広く用いられている琉球石灰岩の  $q_u$  は、宮城、小宮<sup>10)</sup>によると 1.6~47MPa (供試体数は 114 個) で、その平均値は 22.8 MPa であると報告されており、強度や強度のばらつきが大きい点において、ビーチロックと類似しているといえる。また、各調査地点における乾燥状態と湿潤状態の試験結果を比べると、湿潤状態の方がより低強度である点についても、琉球石灰岩と同様の傾向である。ただし、調査地点 G の供試体は湿潤状態の方が高強度である。一方、X, Y 方向の異方性については、顕著な違いがみられないことがわかる。

## (2) 密度測定

密度測定の結果は、表-3 より湿潤密度  $\rho_t$  および乾燥密度  $\rho_d$  の範囲は  $1.96 \sim 2.50$  g/cm<sup>3</sup> および  $1.57 \sim 2.39$  g/cm<sup>3</sup> であり、 $\rho_t$  の平均値と標準偏差は調査地点 A, M, G でそれぞれ  $2.06 \pm 0.04$  g/cm<sup>3</sup>,  $1.97 \pm 0.01$  g/cm<sup>3</sup>,  $2.47 \pm 0.04$  g/cm<sup>3</sup> である。このように、密度は  $q_u$  と同様に地点ごとに違いがみられる。また、密度は調査地点 G が他の 2 地点に比べて大きく、調査地点 M が最も小さい。この密度の地点ごとの大小関係は  $q_u$  の地点ごとの大小関係と一致していないため、密度と  $q_u$  の相関性の低さが推察できる。そこで、各地点のビーチロックおよび琉球石灰岩<sup>9)</sup>の  $\rho_d$  と  $q_u$  の関係を図-2 により検討したところ、

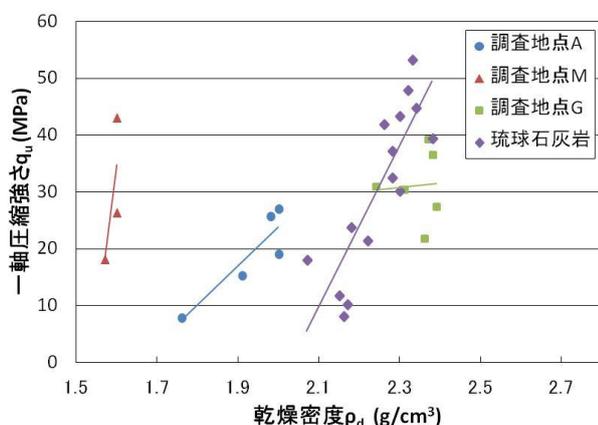


図-2 各地点のビーチロックおよび琉球石灰岩<sup>9)</sup>の  $\rho_d$  と  $q_u$  の関係(直線はそれぞれの線形近似直線)

調査地点 A のビーチロックと琉球石灰岩では  $\rho_d$  と  $q_u$  の正の相関がみられるが、調査地点 M と G ではみられないことが判明した。なお、本節中の琉球石灰岩の試験値は、小暮ら<sup>11)</sup>の試験結果のうち、本供試体と寸法が類似している一辺の長さ  $d$  が 2.5 cm もしくは 2.6 cm の正方形断面で、高さが  $2d$  の角柱供試体の試験値である。また、 $\rho_t$  と  $\rho_d$  の差異は、調査地点 M で顕著に表れている。

## (3) 含水比試験

含水比試験の結果は、表-3 より  $w$  は調査地点によって大きく異なり、調査地点 A, M, G でそれぞれ 9.3~12.5%, 25.2~26.0%, 3.4~4.2% であり、平均値と標準偏差はそれぞれ  $11.1 \pm 1.2\%$ ,  $25.4 \pm 0.4\%$ ,  $3.7 \pm 0.1\%$  である。この調査地点 M の含水比の高さが、前節(2)で述べた  $\rho_t$  と  $\rho_d$  の差異が大きい原因の一つであるといえる。

## (4) P 波および S 波速度測定

表-3 より、 $V_p$  および  $V_s$  の範囲は 3.00~5.14 km/s および 2.05~3.49 km/s であり、乾燥状態での平均値と標準偏差は調査地点 A, M, G でそれぞれ  $3.57 \pm 0.32$  km/s および  $2.21 \pm 0.13$  km/s,  $3.85 \pm 0.07$  km/s および  $2.73 \pm 0.10$  km/s,  $4.07 \pm 0.12$  km/s および  $2.51 \pm 0.13$  km/s である。これらの結果を他の岩の  $V_p$  と比較すると、 $q_u$  が類似している琉球石灰岩<sup>11)</sup>は乾燥状態で  $5.03 \pm 0.21$  km/s とビーチロックより大きいことがわかる。一般的に、石灰岩<sup>12)</sup>の  $V_p$  は 5~7 km/s の範囲に多くみられる。一方、石灰岩以外の堆積岩であるチャート、砂岩、粘板岩<sup>12)</sup>の  $V_p$  は、3~5 km/s の範囲に多くみられ、ビーチロックと類似している。ビーチロックは石灰岩と同じくサンゴ片などの石灰質の堆積物からなるにもかかわらず、 $V_p$  が石灰岩に比べて小さい原因は、形成年代が石灰岩に比べて短いビーチロックは密度が石灰岩より低いため、密度と正の相関がある  $V_p$  も石灰岩より小さくなったと推察される。

## (5) 元素分析

各調査地点における湿潤かつ X 方向の供試体のうち、最も  $q_u$  が大きい供試体 AXW-2, MXW-3, GXW-2 を対象として実施した試験結果について述べる。EDX による元素分析の結果は、図-3 のとおりである。図-3 より、全体の傾向としては  $\text{CaO} > \text{C} > \text{MgO} > \text{SiO}_2 \approx \text{SrO} \approx \text{Y}_2\text{O}_3 \approx \text{Al}_2\text{O}_3 \approx \text{Na}_2\text{O}$  であることがわかる。また、CaO および C の含有率は、それぞれ 50.23~59.65% および 35.60~46.49% であり、CaO と C で 9 割以上を占めている。その他の元素含有率が低い点やサンゴ片などから構成されている点を考慮すると、調査地点 A, M, G のビーチロックは 9 割前後が炭酸カルシウムで構成されているといえる。また、1 章で述べたビーチロックの定義には「セメント物質は石灰質・鉄分」とされているが、本

調査地点のビーチロック中には鉄分が見られないことが図-3よりわかる。さらに、ビーチロックのセメント部に関する報告の中には、セメント部は主にMg方解石であるとする報告<sup>13)</sup>や、霏石や方解石が主なセメントであるとする報告<sup>7), 8)</sup>など、地点によって様々な報告がある。GXW-2はMgOの含有率が比較的高いことからセメント部はMg方解石であり、AXW-2およびMXW-3のセメント部はCaOおよびC以外がほとんど含まれていないため、霏石や方解石であると推定される。

本試験結果だけでは、元素と $q_u$ の間に存在する相関について議論することは難しいが、 $q_u$ とセメント部の元素・鉱物の相関を把握することは、人工岩作製の上で重要である。今後は、SEM・EDXによる更なる元素分析に加え、薄片観察や鉱物分析などを行い、相関について把握する予定である。

### (6) 針貫入試験

針貫入試験の結果は、表-4のとおりである。表-4より、土中に埋まっているビーチロック(BB-1)の $N_p$ および $q_u$ は、露出しているビーチロック(EB-1およびEB-2)に比べて小さく、約1/6~1/9であることがわかる。これは、Vousdoukas et al.<sup>14)</sup>の「海側で露出しているビーチロックよりも陸側で土中に埋まっているビーチロックの方が固化的程度が低い」という報告と調和的である。また、EB-1およびEB-2の $q_u$ は、調査地点A, M, Gと同程度の強度を示している。

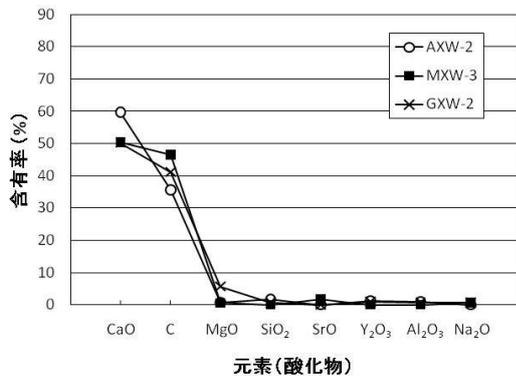


図-3 各調査地点のビーチロックの元素含有率

表-4 調査地点Sの各試験箇所の力学特性および菌数

試験箇所	針貫入試験		菌数測定	
	$N_p$ N/mm	$q_u$ MPa	海洋細菌用 E+4 CFU/mL	一般細菌用 E+4 CFU/mL
海水	—	—	1.3	0
EB-1	80	27	410	45
EB-2	51	18	1500	8.15
BB-1	9	3	460	13.6
US-1	—	—	500	5.4
US-2	—	—	1000	25

### (7) 菌数測定

菌数測定の結果は、表-4のとおりである。表-4より、海洋細菌用と一般細菌用の両培地で得られた菌数を比較すると、海洋細菌用の方が多いことがわかる。この結果から、本調査地点のような沿岸部における菌数測定においては、海洋細菌用の培地を用いる必要があることがわかる。海洋細菌用および一般細菌用の両培地で得られたビーチロック中の菌数は、 $4.1E+6 \sim 1.5E+7$  CFU/mLおよび $8.15E+4 \sim 4.5E+5$  CFU/mLであり、一般的な海岸の菌数に比べて多い。このことから、ビーチロックの形成に微生物が寄与している可能性があると思われ、炭酸カルシウム析出に関与していると思われる細菌を探索するため、 $NH_4$ -YE寒天培地等により尿素分解を行う細菌を選択・採取し、人工岩盤の作製実験に用いることを計画している。

### (8) 一軸圧縮強さと形成年代の関係

前の図-3より、本調査地点の元素含有率は地点ごとに大きな違いが見られないため、ここでは地点ごとの違いの影響は考慮しないものとして、 $q_u$ と形成年代 $t$ の関係について検討してよいといえる。そこで、以下、 $q_u$ と形成年代の関係について考察する。

$q_u$ と $t$ の関係を図-4に示す。なお、 $t$ は岩石を採取した地点とGPSによる緯度・経度の座標値がほぼ同値の小元<sup>15)</sup>によって測定された形成年代( $^{14}C$ 年代)の値である。また、 $t$ の単位のyBPは、「西暦1950年から~年前」という意味である。同図より $q_u$ と $t$ の関係について検討すると、時間の経過に伴って $q_u$ が増加していることがわかる。この $q_u$ と $t$ の関係について、切片を0とする直線近似式を用いて表すと、 $q_u$  (MPa)と $t$  (yBP)の間には次式のような関係があることがわかった。

$$q_u \approx 0.0158t \quad (1)$$

一般の堆積岩と堆積岩の一つ<sup>14)</sup>であるビーチロックを比べると、ビーチロックは $q_u$ が数十MPaになるのに形

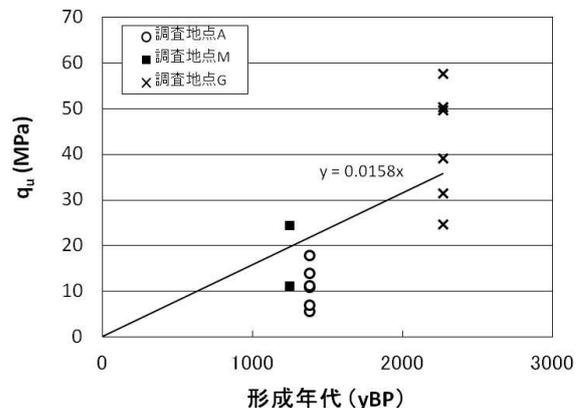


図-4 一軸圧縮強さと形成年代の関係

成期間 1000~2000 年程度であるのに対し、一般の堆積岩では数百万年以上<sup>10)</sup>の時間が必要である。この強度増加の速度が大きい点で、ビーチロックが一般の堆積岩に比べて人工岩盤のモデルとして適しているといえる。

#### 4. 結言

国内外の文献で非常にデータが不足しているビーチロックの物理・力学特性を中心とした物性について、沖縄本島の4地点を対象として実施した試験結果は、以下のとおりである。

ビーチロックの湿潤密度の平均値と標準偏差は、調査地点A, M, Gでそれぞれ $2.06 \pm 0.04 \text{ g/cm}^3$ ,  $1.97 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$ ,  $2.47 \pm 0.04 \text{ g/cm}^3$ であった。また、含水比および湿潤状態における一軸圧縮強さ $q_u$ は、それぞれ $11.1 \pm 1.2 \%$ および $11.14 \pm 4.11 \text{ MPa}$ ,  $25.4 \pm 0.4 \%$ および $19.91 \pm 6.72 \text{ MPa}$ ,  $3.7 \pm 0.1 \%$ および $42.23 \pm 11.54 \text{ MPa}$ であった。 $q_u$ との相関が高いのは、形成年代 $t$ で、 $q_u \approx 0.0158t$ なる関係がみられた。これは、一般の堆積岩に比べて強度増加の速度が速いため、この点でビーチロックが人工岩盤のモデルとして適しているといえる。また、ビーチロック中の海洋細菌用培地における菌数は、 $4.1E+6 \sim 1.5E+7 \text{ CFU/mL}$ と一般的な海岸の菌数に比べて多いため、ビーチロックの形成に微生物が寄与している可能性があるかと推察される。今後はこの微生物の影響について、さらなる検討を行う予定である。

謝辞：本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(B) (課題番号：21300326, 研究代表者：川崎了)の一部として行なわれた。末筆ながらここに記して、深甚なる感謝の意を表する次第である。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省：国土交通白書2010, p.34, ぎょうせい, 2010.
- 2) 地学団体研究会：新版地学事典, pp.1083-1084, 平凡社, 2000.

- 3) 武永健一郎：Beach rockの成因について, 地理学評論, Vol.38, No.12, pp.739-755, 1965.
- 4) 小笠原 洋, 吉富健一, 次重克敏：能登半島, 輪島市曾々木海岸のビーチロック, 日本応用地質学会中国四国支部平成16年度研究発表会, pp.31-34, 2004.
- 5) 田中好國：ビーチロックの形成に関する一考察, 地理科学, Vol.38, no.2, pp.91-101, 1983.
- 6) 米谷静二：奄美大島本島北部におけるビーチロックの予察的研究, 地理学評論, Vol.36, No.9, pp.519-527, 1963.
- 7) Lazar, B., Enmar, R., Schossberger, M., Bar-Matthews, M., Halicz, L., Stein, M. : Diagenetic effects on the distribution of uranium in live and Holocene corals from the Gulf of Aqaba, *Geochemica et Cosmochimica Acta*, Vol. 68, No. 22, pp. 4583-4593, 2004.
- 8) KNEALE, D. and VILES, H. A. : Beach cement : incipient  $\text{CaCO}_3$ -cemented beachrock development in the upper intertidal zone, North Uist, Scotland, *Sedimentary Geology*, Vol.132, pp.165-170, 2000.
- 9) 株式会社丸東製作所：軟岩ペネトロ計SH-70取扱説明書, 4p.
- 10) 宮城調勝, 小宮康明：琉球石灰岩の有効空隙率と圧縮強度, 琉球大学農学部学術報告, No.50, pp.131-135, 2003.
- 11) 小暮哲也・青木 久・前門 晃・前倉公憲：琉球石灰岩の一軸圧縮強度に与える寸法効果と岩石物性の影響, 応用地質, Vol.46, No.1, pp.2-8, 2005.
- 12) 物理探査学会：“土と岩”の弾性波速度—測定と利用—, 物理探査学会, pp.129-136, 1990.
- 13) Gregory E. Webb, John S. Jell, Julian C. Baker : Cryptic intertidal microbialites in beachrock, Heron Island, Great Barrier Reef: implications for the origin of microcrystalline beachrock cement, *Sedimentary Geology*, Vol.126, pp.317-334, 1999.
- 14) Voudoukas, M. I., Velegakis, A. F., Plomaritis, T. A. : Beachrock occurrence, characteristics, formation mechanisms and impacts, *Earth-Science Reviews*, Vol.85, pp. 23-46, 2007.
- 15) 小元久仁夫：南西諸島から採取したビーチロックの $^{14}\text{C}$ 年代および安定同位体比( $\delta^{13}\text{C}$ )—測定資料とその分析—, 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, No.40, pp.1-27, 2005.
- 16) 岡本隆一, 緒方正彦, 小島圭二：土木地質, 新体系土木工学14, pp.92-98, 技報堂出版, 1984.

## PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF BEACHROCK

Takashi DANJO, Satoru KAWASAKI and Toshiro HATA

There are very few reports about physical and mechanical properties of beachrocks in the world. To obtain the properties of beachrocks, we performed a series of in-situ tests and laboratory tests for beachrocks in Okinawa Island. As a result, it was shown that unconfined compression strengths of the beachrock samples obtained from three testing sites A, M and G were about 11 MPa, 20 MPa and 42 MPa, respectively. and it was found that there was a relationship like  $q_u \approx 0.0158 t$  between unconfined compression strength,  $q_u$  (MPa), and radiocarbon age,  $t$  (yBP). Moreover, the formation of beachrock may be controlled by the presence of microbes.