大東島および石垣島周辺の地殻の応力状態の評価

藍檀オメル*1, 渡邊英彦2,渡嘉敷直彦1

¹琉球大学,工学部,社会基盤デザインコース(〒903-02131,沖縄県,西原町,千原)
²日本大学,工学部土木工学科(〒963-8642 郡山市田村町徳定字中河原1番地)
*E-mail: aydan@tec.u-ryukyu.ac.jp

琉球諸島における地殻の応力状態に関する地圧測定は、ほとんど行われていないのが現状である.琉球諸 島で行われた地圧測定は、本島東村の海水揚水発電所地下空洞建設における応力測定のみである.著者ら は、琉球諸島の地殻の応力状態の把握するため、AE法を用いて計測を開始している.本研究では、大東島 および石垣島で行われたAE法による地圧測定結果について紹介し、断層条線法、地震発生機構法およびGP S法より得られた結果と比較・検討を行う.

Key Words : In-situ stress, Daitojima, Ishigaki, AE Method, Focal Mechanism Method

1. 前書き

琉球諸島の南東側には、フィリピン海プレートの潜 り込み口が存在し、一方、大陸側には沖縄トラフと呼ば れる谷状の海底地形が存在しており、周辺で断層運動も 確認されている(図-1).このような地殻変動による地 殻内の初期応力の状態も複雑に変動していることが予想 される.重要土木構造物を建設する際には、岩盤内の初 期応力の把握が必要となり、南西諸島における岩盤内の 初期応力の推定も課題となる.



地中には地圧が作用し、自然の地盤・岩盤内に生じ ている地圧を初期応力といい、岩盤空洞等の地下構造物 を設計する際に、その周辺岩盤の主要な荷重として考慮 される. 今まで琉球諸島で行われた初期応力の測定は, 本島東村の海水揚水発電所地下空洞建設における応力測 定のみである. 著者らはこの状況を考量して,琉球諸 島の初期応力状態を把握するため,直接法としてAE法と 非直接法として断層条線法,地震断層機構法およびGPS を用いて琉球諸島の各島の応力状態を評価するプロジェ クトを立ち上げている.本論文では,そのプロジェクト の一環として,北大東島および石垣島とその周辺の初期 応力状態について,AE法による地圧測定結果について紹 介し,断層条線法,地震発生機構法およびGPS法より得 られた結果と比較・検討を行う.

2. 大東島および石垣の地質と断層

(1) 北大東島の地質と断層

南大東島,北大東島,沖ノ鳥島の地域は大東諸島と 呼ばれ,フィリピン海プレート上の大東海嶺の上に位置 する.沖縄本島から約360kmの位置にあり,沖縄海溝 (琉球海溝)の東方,フィリピン海プレート上に位置す る.南大東島と北大東島は年に約4~5cmの速度で琉球 海溝に向かって動いていることが計測されている.フィ リピン海プレート上に位置する南大東島および北大東島 は隆起サンゴ礁がドロマイト化している.南大東島, 北大東島は,太平洋の島々と同じ海洋島に属し,水深40 00m以上の深海より海上に頭を出したサンゴ礁の島であ る.したがって,南大東島および北大東島は,これら琉 球列島の島々とは異なった成因を持ち,島の地質も異な り,戦前の北大東島ボーリング調査で,島の地下深くま でサンゴ石灰岩が連続することが明らかになっている (地下430mまで確認). 図-2に、北大東島の地質図と断層露頭とAE初期地圧 計測用サンプリングの位置を示す.また、各観察点にお ける断層露頭の様子を図-3に、その断層のパラメータを 表-1に示す.図-3の中央の写真に、北大東島掘り込み式 港の建設の関係で実施されたボーリングコアに正断層が 認められたが、調査位置では正断層が見られなかった.



図-2:北大東島の地質および断層露頭の位置





夷_1	北大市自における新屋のパラメータ	2
78-1	北八宋岛にわける町層ワハノノーク	1

位置	記号	方位	傾斜	条線角
新港	L1	280	84	168
北港	L2	82	36	202
空港	L3	310	70	16

(2) 石垣島の地質と断層

石垣島は、琉球列島南部に広がる八重山諸島の東端 部に位置し、ほぼ五角形を呈する主要部と北東へ連なっ て伸びる野底(のそこ)半島・平久保(ひらくぼ) 半 島および北西端から北に突き出る川平半島、西に伸びる 屋良部半島から構成されている図-4).これらの内、石 垣島東北部は、野底半島の北部から平久保半島全域、川 平半島の先端部を含んでいる. 石垣島は、九州から続 く地帯構造区分の最南部に位置し、台湾との地質対比や 沖縄トラフの形成を考える上で地質学的に極めて重要な 意味をもっている地域である.

石垣島の地質は、ペルム紀と考えられているトムル 層ジュラ紀の富崎ふさき層、始新世の宮良みやら層群、 それらを貫く始新世-鮮新世の貫入岩類・漸新世の花 崗岩、これらを覆う更新世の琉球層群・完新世の堆積物 からなる.トムル層は三畳紀~ジュラ紀の変成年代を示 し、琉球列島で最も古い地層と考えられている.トムル 層は、石垣島の北東部(本図幅範囲)、中央部および西 部に分布し、低温高圧型の藍閃石片岩相 属する藍閃石 片岩・緑色片岩・泥質片岩・砂質 岩から構成されてい る.塩基性片岩は肉眼的には青灰色~暗緑色~黄緑色を 呈し、剥離性に富む 藍閃石片岩~緑色片岩である.ま た、枕状溶岩、ピローブレチャー、ハイアロクラスタイ トなどの原岩組織を示す形態や産状がしばしば保存され、 枕状溶岩の良好な露頭は安良岳の北東沢沿いや安良崎に おいて観察することができる.



第三系層は宮良層群であり、下位の宮良川層と上位 の野底層から構成されている. 宮良川層と野底層は、一 部指交関係にあり、宮良川層の上位に野底層が累重した ものと考えられる. また、両層から発見された化石から 上部始新統と推定される. 宮良川層は、平久保半島の西 海岸に点在し、主として石灰岩・礫岩・砂岩・泥岩から 構成されている. 一方、野底層は野底半島の広い範囲と 平久保半島の西海岸および川平半島に分布し、凝灰岩・ 凝灰角礫岩・安山岩溶岩・流紋岩溶 岩から構成されて いる. このうち、野底半島の東部域は凝灰岩が卓越し、 西部域は凝灰角礫岩が卓 越する傾向にある.安山岩溶 岩は凝灰岩・凝灰角礫岩中に礫もしくは溶岩として挟在 しており,流紋岩溶岩は,川平石崎周辺で確認され凝灰 角礫岩とは部分的に漸移関係を示している.主として, 第三紀に活動した貫入岩類は認められる.平久保半島明 石(あかいし)付近ではトムル層に,野底半島大浦山周 辺では,野底層にそれぞれ始新世の流紋岩が貫入し,そ の走向はN50Eである.

川平石崎では、野底層流紋岩溶岩に斑岩が、大野 崎・野底石崎では野底層凝灰角礫岩に漸新世の安山岩 がそれぞれ貫入し、さらに、野底崎では、野底層凝灰角 礫岩に貫入する鮮新世の安山岩が発見された.また、平 久保半島北部では、トムル層に貫入する時代未詳の大規 模な石英脈群が確認された.これらの石英脈は、トムル 層を切るようにほぼ北東-南西の方向に網目状、板状 に層序的上位に向かって伸びており、層厚数m程度の石 英脈は平久保半島北部域で8本確認され、そのうち最大 のものは側方に5km以上伸びるものもある.

第四系は、更新統の琉球層群と完新統の海浜堆積物からなる.琉球層群は、礫岩・砂岩・泥岩からなる名蔵層と石灰岩からなる大浜層から構成される.完新統堆積物は、砂丘堆積物・海浜砂・ビーチロックなどからなり、 集落周辺や河川沿いには沖積層が認められた.野底集落周辺では、大浜層のサンゴ石灰岩が形成する段丘に変位が認められるため、活断層の存在が報告されている.この活断層は野底岳の西側をかすめ、大野から野底岳に伸びる沢沿いの破砕帯に連続することが明らかで、野底断層と命名されている.



図-5 観察位置における断層,褶曲,貫入帯の露頭の様子

図-4 は、石垣島の地質図と執筆者らが観察した断層 露頭、褶曲および貫入帯およびと AE 初期地圧計測用サ ンプリングの位置を示す.また、各観察点における断層 露頭や褶曲構造および貫入帯の様子を図-5 に、地質構 造(断層、片理面、貫入岩体など)のパラメータを表-2 に示す. AE サンプリングは石垣島の新生代古第三紀始 新世の石灰岩を掘っている採石場から採集し、その深さ は約45mであった.平久保半島に見られる貫入岩体の走行と御神崎で観察された貫入岩体の走行はほぼ同様である.

表-2 石垣島における地質構造のパラメータ

位置	記号	構造	方位	傾斜	条線角
		F1-SS	10	60	55
御神崎	T 1	F2-DS	335	73	140
	LI	DYKE	324	80	
灾洪	13	TF+SS	138	50	305
工作	L	Schistosty	4	40	270
		F1-SS	210	82	344
採石場	14	F2-DS	30	80	196
	24	F3-NF	53	36	84

3. 初期応力の測定法

初期応力の推定について様々な手法が提案され、大き く二つに大別される.その内一つは直接法であり、応力 解放法,水圧破砕法、AE法などがある.本研究では、 直接法としてAE法に基づいて計測を行う.非直説法と して、断層条線法、地震発生機構に基く推定法があり、 簡単にその原理をここで紹介する.

(1) AE 法による初期応力の測定

履歴応力を越えるとAE事象数が急増するというカイザ 一効果によるAE法により行った.採取した琉球石灰岩は 亀裂が発達しているため供試体の整形が難しく,コアリ ングの時点で破損してしまうものが多かったが,円柱供 試体の一軸圧縮試験によるAE法により初期応力を測定し た.なお,この実験研究は日本大学の渡辺研究室との共 同研究として行われたものである²⁰.

(2) 断層条線法による初期応力の推定

Aydan^{3,4,5)}が提案している断層条線より断層近傍の 応力状態を求める手法に基づいて沖縄各地の初期応力を 求めた.この手法は、一つの断層面の方位角 p, 傾斜角 d および条線角 i から初期応力を推定するものである. 条線角とは断層面の走向と滑動方向のなす角で、図-6 および図-7 のように定義される.断層面の滑動方向は 面の条痕を観察して決める.



図-6 断層条線法における断層パラメータの定義

(3) 地震発生機構による初期応力の推定

断層条線より断層近傍の応力状態を求める手法は、地 震発生機構に対するパラメータをそのまま適用して、同 様に初期応力を推定することができる^{4,5}. 地震発生機 構のパラメータとは、断層の方位角、傾斜角およびすべ り角である. この場合最も重要な要素は、地震断層の選 択である. 地震発生機構に対する解を求めるには、2 つ の断層に基づいた計算が必要である.



図-7 条線法の4つの基礎モデルと条線角

4. 北大東島とその周辺応力状態の推定

北大東島における掘り込み式港の建設の関連で、深さ は 20m を超える掘削が実施された. その工事の前に事前 調査のため,深さが 30m を超えるボーリング調査が行わ れた.また,港の建設際に深さが20mを超える掘削が実 施された.建設の際に著者らは沖縄県の協力を得て, 図-8 に示す位置で岩盤ブロックを採集することができ た. 最終地点における深さは 11m であった. 採集したブ ロックから異なる6つの方向で供試体を作成し、日本大 学工学部の岩盤力学研究室で AE 法による応力測定を行 った. 図-9 に, 鉛直方向の供試体の応力・AE 発生数と の関係を示す. 異なる 6 つの方向における AE 数が急激 に変化する応力レベルを決定して、主応力とその方向を 求めた. その結果を表-3 にまとめ、主応力の方向に対 するステレオ射影を図-10に示す.最大主応力はほぼ № S 方向に作用していることがわかる. 応力法として, 逆 断層型に近い応力状態になっていると言える.

北大東島で行った現地調査で、3 か所で断層の露頭を 確認できた(図-2 を参照). それらの断層について、 推定結果を表-4 に示す. 表-4 に、南大東島の亀池港で 観察された断層より推定した地圧推定も示した. 南大東 島で 2011 年に行ったものである. 大東島地域の地震活 動は琉球列島の他の地域と比べて、極めて少ない. 大半 の地震は琉球海溝に近い場所で発生している. 南大東島 および北大東島に最も近い地震発生機構から推定した初

期地圧を表-5に示す.



図-8 供試体の採集位置と試験用の資料の作成 表-3 AE法で決定した初期地圧

		0100000	
応力成分	応力値	方位	傾斜
$\sigma_{_I} / \sigma_{_V}$	2.1	201.4	25.1
$\sigma_{_{II}}/\sigma_{_{V}}$	1.4	299.8	17.2
$\sigma_{_{III}}/\sigma_{_{V}}$	0.8	60.2	59.1

$\sigma_{V} = 282.7$ kPa. ($\sigma_{V} : \pm$ かぶり圧)



図-9 鉛直方向に対する先行応力の推定 表-4 条線法で決定した初期地圧

成分	パラメータ	新港	北港	空港	南大東
	$\sigma_{_I}/\sigma_{_V}$	1.417	1.481	1.374	1.037
$\sigma_{\scriptscriptstyle I}$	方位	219.5	159.9	15.0	341.4
	傾斜	13.4	14.6	23.3	74.9
	$\sigma_{_{II}}/\sigma_{_{V}}$	0.976	1.020	0.947	0.714
$\sigma_{{\scriptscriptstyle II}}$	方位	36.2	287.0	170.0	212.9
	傾斜	76.6	66.7	64.6	9.5
	$\sigma_{_{III}}/\sigma_{_V}$	0.472	0.494	0.458	0.346
$\sigma_{_{III}}$	方位	129.3	65.1	280.9	120.9
	傾斜	0.8	17.8	9.6	11.6



 $(\sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III})$:最大、中間、最小主応力)

	図-10	主応力のステレオ射影
表5	批震発	生機構法で決定した初期地圧

成分	パラメータ	2010/5/26 Mw-6.4;h-8 291/52/126	2016/11/27 Mw5.0;h-11km 119/39/108	
	$\sigma_{_I}/\sigma_{_V}$	1.108	1.117	
$\sigma_{\scriptscriptstyle I}$	方位	196.8	338.4	
	傾斜	59.3	65.1	
	$\sigma_{\scriptscriptstyle II}/\sigma_{\scriptscriptstyle V}$	0.763	0.770	
$\sigma_{{}_{II}}$	方位	45.1	223.2	
	傾斜	27.6	11.2	
	$\sigma_{_{III}}/\sigma_{_V}$	0.369	0.372	
$\sigma_{_{III}}$	方位	308.5	128.6	
	傾斜	12.4	22.0	

5. 石垣島とその周辺応力状態の推定

石垣空港の北部に石灰岩を主体とする大きな採石場が いくつか存在している.採石場の掘削深さは、50mを超 えている.著者らは、採石場内で元の土かぶりは45mを 超える地点でAE計測用に石灰岩のブロックを採集し、 日本大学工学部の岩盤力学研究室でAE法による応力測 定を行った(図-10).得られた計測結果を表-6にまと め、主応力の方向に対するステレオ射影を図-11に示す.

図-5および図-10に示すように、採石場で数多くの断 層露頭が確認され、その断層の大半は横ずれ断層と正断 層であった.現場調査より、正断層の発生時期は横ずれ 断層に比べ、新しいと思われる.ここでの比較は、採 石場で行った現地調査で観察されたで断層の露頭につい て推定結果に限定し、その結果を表-7に示す.

大東島地域に比べ,石垣島とその周辺の地震活動は活 発であるが,ここでの比較に関して,震源は15kmより浅 い地震に限定した.石垣島とその近辺に発生した地震発 生機構から推定した初期地圧を表-8に示す.AE法で求め た初期地圧結果を条線法と発生機構法と比較すると若干 値が異なっている.しかし,AE法による値は横連れ断層 と正断層について得られる結果に間に存在している.

表-6 AE法よって決定した初期地圧 ($\sigma_v = 1.103$ MPa)

応力成分	応力値(MPa)	方位	傾斜
$\sigma_{_I}/\sigma_{_V}$	1.266	40.8	30.5
$\sigma_{_{II}}/\sigma_{_{V}}$	1.049	291.4	28.9
$\sigma_{_{I\!I\!I}}$ / $\sigma_{_{V}}$	0.379	167.5	45.6



図-10 AEブロックの採集位置とブロックの様子 表-7 条線法で決定した初期地圧

成分	パラメータ	F1-SS	F2-DS	F3-NF
	$\sigma_{_I}/\sigma_{_V}$	1.484	1.500	1.013
$\sigma_{_I}$	方位	87.6	152.7	178.7
	傾斜	9.6	8.5	81.4
	$\sigma_{_{II}}/\sigma_{_{V}}$	1.022	1.033	0.698
$\sigma_{{\scriptscriptstyle II}}$	方位	325.9	268.8	302.4
	傾斜	72.2	72.2	4.8
	$\sigma_{_{III}}/\sigma_{_V}$	0.495	0.500	0.338
$\sigma_{_{III}}$	方位	180.2	60.1	33.0
	傾斜	14.9	16.6	7.1



Aydan and Tokashiki⁶⁾は、琉球諸島の応力状態に関して、 条線法と地震発生機構を用いて、検討を行っている.こ こで、その結果と比較するため、最大水平応力の結果を 用いることした.図-12に、最大水平応力の方向と鉛直 応力に対するその比を示す.また、同図に今回の結果と Aydan and Tokashiki⁶⁾が報告している結果を示す.図か らわかるように、今回得られた結果は過去の結果と大変 類似している.AE法による地圧推定について様々な考 え方があるが、琉球諸島について今まで行った計測と他 の方法との比較より大変類似してことが明らかになり、 条線法、地震発生機構法および GPS 法などの方法と一緒 に利用すれば、地圧評価に対して大変有効的な手法であ るといえる.

成分		2002/12/04	2017/09/01
	パラメータ	Mw-4.3;h-8	Mw4.1;h-5km
		10/75/140	19/67/108
	$\sigma_{_I}/\sigma_{_V}$	1.213	1.033
$\sigma_{\scriptscriptstyle I}$	方位	307.1	316.4
	傾斜	41.8	72.5
	$\sigma_{_{II}}/\sigma_{_{V}}$	0.835	0.711
$\sigma_{{}_{II}}$	方位	117.1	116.2
	傾斜	47.7	16.5
	$\sigma_{_{III}}/\sigma_{_V}$	0.404	0.344
$\sigma_{_{III}}$	方位	212.6	207.9
	傾斜	5.0	5.7

表-8 地震発生機構法で決定した初期地圧



図-12 琉球諸島におけるAE法による応力測定と他の方から 推定したものと比較

REFERENCES

- Kizaki, K. (1986) : Geology and tectonics of the Ryukyu Island, Tectonophysics, 125, pp198-207.
- 2) Watanabe, H., Tano, H., Tokashiki, N., Akagi, T. and Aydan, Ö. (2006) : Crustal stresses in Ryukyu Islands of Japan. 4th Asian Rock Mechanics Symposium, Singapore, Paper No. A0446 (on CD).
- Aydan, Ö., (2000): A stress inference method based on structural geological features for the full-stress components in the earthøcrust, *Yerbilimleri*, 22, 223-236.
- Aydan, Ö. and Y.U. Kim (2002) : The inference of crustal stresses and possible earthquake faulting mechanisms in Shizuoka Prefecture from the striations of faults. J. of the School of Marine Science and Technology, No.54, 21-34.
- 5) Aydan, Ö., Kumsar, H. & Ulusay, R. (2002): How to infer the possible mechanism and characteristics of earthquakes from the striations and ground surface traces of existing faults. JSCE, Earthquake and Structural Engineering Division, Vol. 19, No.2, 199-208.
- Aydan, Ö. and N. Tokashiki (2003) : The Inference of crustal stresses in Ryukyu Islands. 3rd International Symposium on Rock Stress, Kumamoto, 349-354.

THE EVALUATION OF CRUSTAL STRESSES IN ISHIGAKI AND KITADAITO ISLANDS AND THEIR CLOSE VICINITY

Ömer AYDAN, Hidehiko WATANABE and Naohiko TOKASHIKI

In-situ stress measurements in Ryukyu islands have not been carried out as compared with other regions of Japan except the one location at the Okinawa Seawater Pumped-Storage Power Plant. In this study, an attempt was made to infer the crustal stresses in Ishigaki and Kita-Daito Islands of Ryukyu Archipelago from AE method, the striations of faults and focal plane solutions. This is the second attempt to evaluate in-situ stress state in as a part of in-situ stress measurement program using the AE method following its first application in Okinawa Island. The focal plane solutions were gathered from renowned institutes in Japan. The results obtained from three different techniques are quite similar to each other and they show that the AE method could be an effective tool for in-situ stress evaluations.