

分離式防波堤の水利機能と設計波圧について

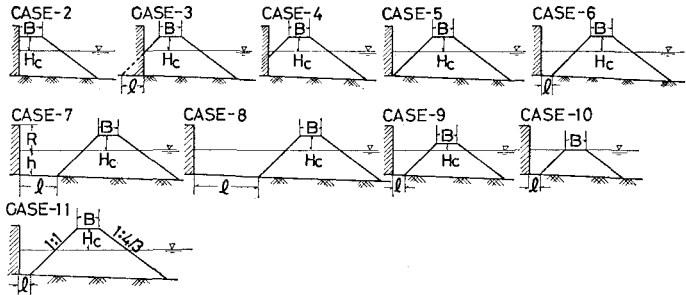
佐伯 浩*・菊地秀明**・京谷 修***
松井弘夫****・尾崎 晃*****

1. 緒 論

我が国においては、漁港等のように比較的水深の浅い海岸に建設される防波堤には波圧の軽減と越波量を減らす目的から、消波ブロックで被覆された直立堤（消波ブロック被覆堤）が数多く建設されてきた。この消波ブロック被覆堤の出現以来、防波堤の滑动災害は非常に減ってきた。しかし、波圧軽減を目的とした経済設計がなされる場合の消波ブロック被覆堤の場合には、消波工は直立部に遅れて施工されるので、直立堤は波浪に対して不安定であり、またそれを防止するために消波ブロックの移設が行われたり、あるいは直立堤と消波工を同時に施さねばならないような事があって、現場の施工を管理する技術者にとっては頭の痛い問題であった。本研究は、そのような問題を解決するために直立堤と異形ブロックによる傾斜堤との二重構造にする事によって今までの消波ブロック被覆堤にあった諸問題を克服しようとしたもので、その防波堤型式を分離式防波堤と呼ぶことにする。本研究は分離式防波堤の直立部に作用する波圧公式を求めるとともに、越波量、ブロックの安定性及びこの防波堤の反射率について今までの消波ブロック被覆堤との比較を行ったものである。

2. 実験装置・実験条件・実験方法

実験に用いた水槽は、幅 1 m、深さ 0.8 m、長さ 20 m の両面ガラス張りで水底勾配は $i=1/30$ とした。本実験は一応、北海道亀田郡の大淵漁港を対象として、1/25 の縮尺で実験を行い、直立部前趾の水深は $h=20.5$ cm とし、傾斜堤はテトラポッドで前・後面法勾配は、標準的な 1:4/3, 1:1 とした。天端幅 B は 18 cm としたが、これは 8 t テトラ 3 個並びに相当し、実験に用いたテトラポッドの重量は 475 g である。実験を行った断面



図一

表一

CASE	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
l (cm)	-32.0	-20.5	-16.5	0.0	8.0	30.0	50.0	8.0	8.0	8.0
H_c (cm)	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5	5.75	0.0	17.25

$B=18.5$ cm, $h=20.5$ cm

及び寸法は 図一1, 表一1 に示す。CASE 2 はそれぞれ直立堤、消波ブロック被覆堤に相当する。CASE 5~11 は分離堤に関する実験で、直立堤と傾斜堤の距離 l 及び傾斜堤の天端高 H_c の効果を調べる実験である。本実験の l の範囲は $0 \leq l/h < 2.5$ であるが、現実の問題として l を大きくする事は港域が広くなり過ぎる事と、港口部からの船舶の出入が不自由になる事と分離式防波堤でも堤頭部では CASE 2 の如く被覆堤にする必要がある事を考慮したからである。CASE 3, 4 は分離式から、被覆堤の遷移領域の Type に相当している。各 CASE に対して実験波の周期は $T=1.2, 1.4, 1.8$ そして 2.2 秒で波高は一つの周期に対して 10~16 個変えて、必ず碎波波高まで行った。波圧に関する実験は全ケースに対して 662 ケース、反射率・透過率については CASE 6, 9, 10, 11 に対して 263 ケース、越波については CASE 1, 2, 6, 9, 10, 11 に対して 182 ケースの実験を行った。また直立部への波圧の作用高、異形ブロックの安定については全実験について調べた。なお本研究において波高 H 、波長 L は構造物のない時の直立堤前趾での進行波としての値である。なお全波圧は P で表し、波圧強度は P^* とする。

* 正会員 工修 北海道大学助教授 工学部土木工学科
** 正会員 大成建設(株)土木設計部
*** 東京電力(株)
**** 北海道土木部港湾課漁港建設係長
***** 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科

3. 分離式防波堤の反射率と透過率

(1) 反射率について

防波堤前面海域の静穏度を保つためには反射率ができるだけ小さい方が望ましい。反射率の計測は Healy の方法によった。この方法には多くの問題点が指摘されているが、他の実験結果との比較の都合上同方法によった。結果の一例を図-2 に示すが、 H_0/L_0 及び h/L_0 によ

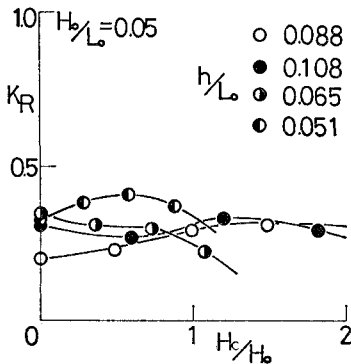


図-2

て K_R は若干変化するが、 H_0/H の影響はそれほど顕著ではない。また l/L の K_R に及ぼす効果も調べたが、その範囲がせまいため明確ではなかった。実験の全般を通して $0 < H_0/L_0 < 0.08$, $0.051 < h/L_0 < 0.108$ の範囲では $0.15 < K_R < 0.60$ となり、従来の消波ブロック被覆堤の反射率 $0.1 < K_R < 0.5$ とほぼ同様の値を示した。

(2) 透過率について

傾斜堤の透過率 K_T は直立部の波圧に大きな影響を与える。この透過率を明確にするために、直立部を取り去って CASE 6, 9, 10, 11 に相当する傾斜堤のみで実験を行った。一般に傾斜堤の透過率への影響因子としては、入射波特性、用いるブロックの大きさ・形・空隙率、傾斜堤の天端幅・天端高・法面勾配が考えられるが、本実験では天端高 H_0 の効果を調べたがその一例を図-3 に示す。 $H_0/L_0 > 0.03$ の範囲では H_0/H に無関係で h/L_0

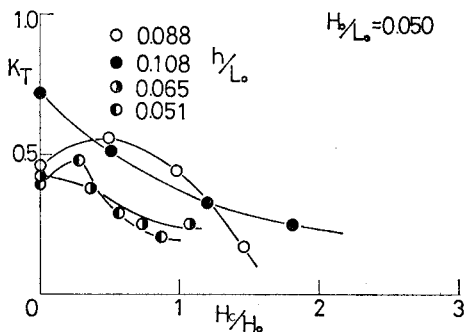


図-3

によって変化するが、 $H_0/L_0 < 0.03$ では H_0/H が小さくなるにつれて K_T は増大する。特に $H_0/H < 1.0$ の範囲では K_T の変化が激しく、これは後に述べる波圧の変化と非常に関連が強い。

4. 直立部に作用する波圧について

(1) 波圧の鉛直分布について

CASE 1~11 までの波圧分布形を大きく分類すると次の 3 種類に分類される。① ほぼ重複波圧分布に近似できる分布 (擬重複波), ② 静水面付近に碎波圧が作用したような分布, ③ 静水面付近に衝撃波圧が作用しているような分布。① の分布形状は CASE 5, 6, 7, 8, 11 等で顕著に現れ、一見重複波分布形をしているが、波圧の作用高が透過波から求められる $H + \delta$ より高い値を示す。② の分布形は全ケースで見られたが、傾斜堤の天端高の低い CASE 9, 10 で顕著であった。③ の分布は永井の提案した A 形分布に近い形で、天端高の低い CASE 10 のみで見られた。代表的な分布形状を図-4 に示す。

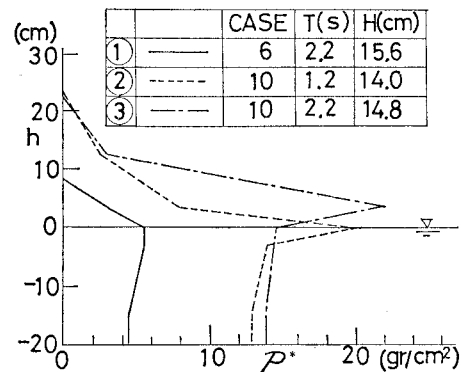


図-4

この 3 つの分布形状に分けて波圧を論じると非常に複雑となるので、① で示される非碎波圧と ②, ③ の碎波圧に分け、その発生領域を調べたものが図-5 である。各 CASE の碎波と非碎波 (擬重複波) の境界は CASE 5 で $h/H = 1.64$, CASE 6 で $h/H = 1.57$, CASE 7 で $h/H = 1.56$, CASE 8 で $h/H = 1.54$, CASE 9 で $h/H = 2.2$ そして CASE 10 では $h/H = 2.25$ であった。安全を見込んで以後 CASE 5~8 まではその波圧形式の境界を $h/H = 1.65$ とし、CASE 9 では $h/H = 2.20$ とした。直立部の天端高を高くし越波を許さない条件で波圧の実験を行こなったが、波圧係数 $P/\omega \cdot H \cdot (h + 1.25H) = P/\omega HA$ の最大値は、CASE 1, 10 では 1.5 以下、CASE 2, 3, 4, 9 では 1.0 以下で他の CASE では 1.0 よりはるかに小さい波圧係数を示した事から、CASE 3, 4 は CASE 2 と同じ既存の消波ブロック被覆堤の波圧公式をそのまま準用できる。CASE 5~8 の波圧係数の実験例を図-6 に示す。4 CASE とも波圧係数は 0.4 以下と

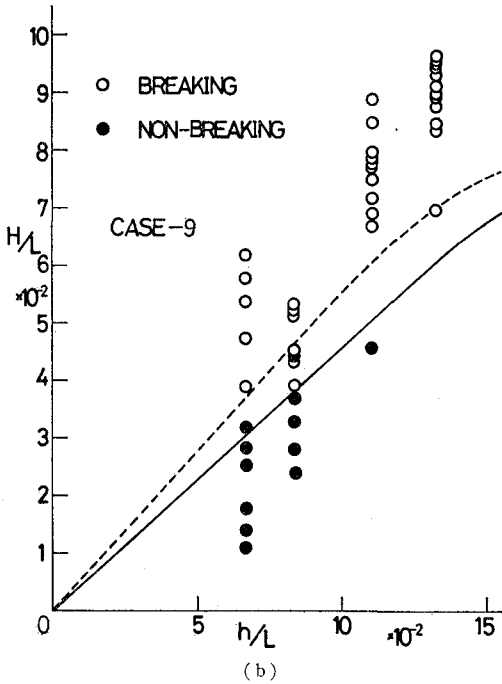
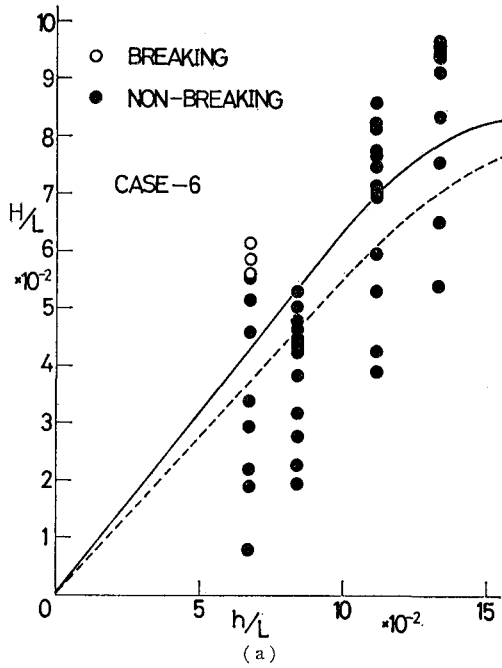


図-5

なり、分離堤では直立部の波圧が非常に小さくなる事を示している。同様に $h/L=0.133$ では 0.3 以下, $h/L=0.111$ で 0.33 以下, $h/L=0.084$ で 0.51 以下となった。次に CASE 5~8 で, l の効果について調べたものが 図-7 である。 l/L が増大するにつれて波圧係数は低下する傾向にはあるが、その効果はそれ程大きくない。これは他の波形勾配においても同様の結果である。

次に全ケースについて、 (H_0/H) の効果を調べたものが 図-8 である。 $H_0/H < 1.0$ の範囲では、 H_0/H の減少と

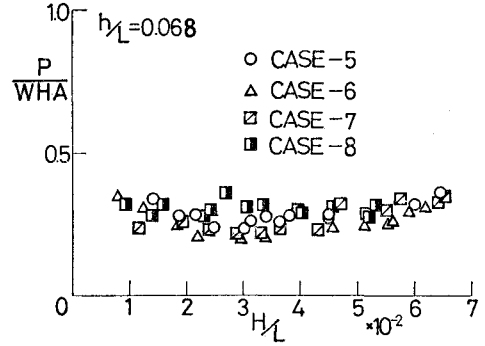


図-6

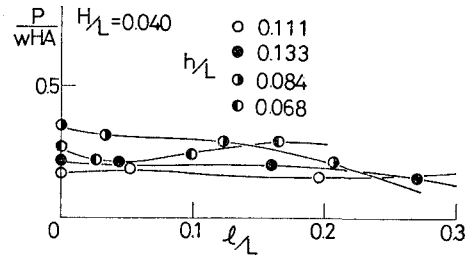
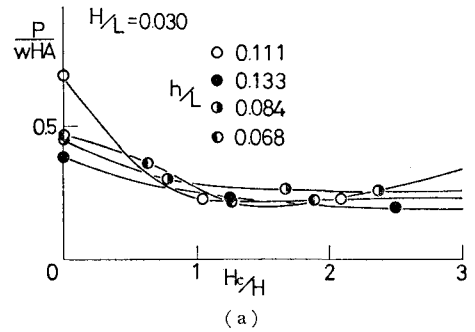
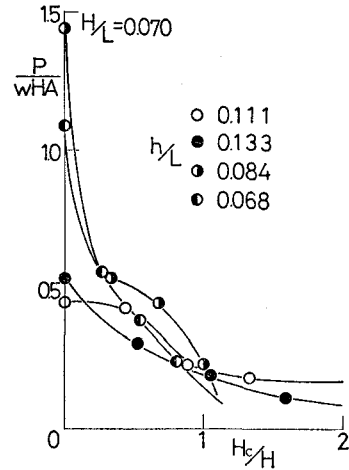


図-7



(a)



(b)

図-8

次に全ケースについて、 (H_0/H) の効果を調べたものが図-8である。 $H_0/H < 1.0$ の範囲では、 H_0/H の減少とともに波圧係数は急激に大きくなる。分離式防波堤において波圧への影響因子の中で最も大きいものは、傾斜堤の天端高 H_0/H と波圧の作用形式(擬重複波圧・砕波圧)である。以上の結果から、擬重複波圧(非砕波圧)の分布 P^* については補正係数 α を用いて次式で近似する。

$$P^* = \alpha \cdot P_s \dots\dots\dots (1)$$

ここで P_s はサンフルーの近似式で示され、この時の波圧の作用高さ R は $R = H + d_0$ であり、砕波圧については、波圧係数 β を用いて次式で示される。

$$P^* = \beta \cdot \omega \cdot H \dots\dots\dots (2)$$

ここで ω は流体の単位体積重量で波圧の作用高さは $R = 1.25H$ である。(1),(2)式で用いられる H, L, h は、構造物がないとした時の直立堤前趾位置での波高、波長、水深である。以上の結果から、分離式防波堤の直立部に作用する波圧式の係数は表-2で示されることになる。

表-2

D. R.		G. R.	B REGION $\alpha=0.85$ $2.2H < h$	A REGION $\alpha=0.5$ $1.65H < h$
$\beta=1.5$		$\beta=1.0$	$\beta=0.7$	$\beta=0.5$
$\beta=1.0$		$\beta=0.7$	$\beta=0.5$	$\beta=0.3$
$\beta=0.7$		$\beta=0.5$	$\beta=0.3$	$\beta=0.2$
$\beta=0.5$		$\beta=0.3$	$\beta=0.2$	$\beta=0.1$
$\beta=0.3$		$\beta=0.2$	$\beta=0.1$	$\beta=0.05$
$\beta=0.2$		$\beta=0.1$	$\beta=0.05$	$\beta=0.02$
$\beta=0.1$		$\beta=0.05$	$\beta=0.02$	$\beta=0.01$
$\beta=0.05$		$\beta=0.02$	$\beta=0.01$	$\beta=0.005$
$\beta=0.02$		$\beta=0.01$	$\beta=0.005$	$\beta=0.002$
$\beta=0.01$		$\beta=0.005$	$\beta=0.002$	$\beta=0.001$
$\beta=0.005$		$\beta=0.002$	$\beta=0.001$	$\beta=0.0005$
$\beta=0.002$		$\beta=0.001$	$\beta=0.0005$	$\beta=0.0002$
$\beta=0.001$		$\beta=0.0005$	$\beta=0.0002$	$\beta=0.0001$
$\beta=0.0005$		$\beta=0.0002$	$\beta=0.0001$	$\beta=0.00005$
$\beta=0.0002$		$\beta=0.0001$	$\beta=0.00005$	$\beta=0.00002$
$\beta=0.0001$		$\beta=0.00005$	$\beta=0.00002$	$\beta=0.00001$
$\beta=0.00005$		$\beta=0.00002$	$\beta=0.00001$	$\beta=0.000005$
$\beta=0.00002$		$\beta=0.00001$	$\beta=0.000005$	$\beta=0.000002$
$\beta=0.00001$		$\beta=0.000005$	$\beta=0.000002$	$\beta=0.000001$
$\beta=0.000005$		$\beta=0.000002$	$\beta=0.000001$	$\beta=0.0000005$
$\beta=0.000002$		$\beta=0.000001$	$\beta=0.0000005$	$\beta=0.0000002$
$\beta=0.000001$		$\beta=0.0000005$	$\beta=0.0000002$	$\beta=0.0000001$
$\beta=0.0000005$		$\beta=0.0000002$	$\beta=0.0000001$	$\beta=0.00000005$
$\beta=0.0000002$		$\beta=0.0000001$	$\beta=0.00000005$	$\beta=0.00000002$
$\beta=0.0000001$		$\beta=0.00000005$	$\beta=0.00000002$	$\beta=0.00000001$
$\beta=0.00000005$		$\beta=0.00000002$	$\beta=0.00000001$	$\beta=0.000000005$
$\beta=0.00000002$		$\beta=0.00000001$	$\beta=0.000000005$	$\beta=0.000000002$
$\beta=0.00000001$		$\beta=0.000000005$	$\beta=0.000000002$	$\beta=0.000000001$
$\beta=0.000000005$		$\beta=0.000000002$	$\beta=0.000000001$	$\beta=0.0000000005$
$\beta=0.000000002$		$\beta=0.000000001$	$\beta=0.0000000005$	$\beta=0.0000000002$
$\beta=0.000000001$		$\beta=0.0000000005$	$\beta=0.0000000002$	$\beta=0.0000000001$
$\beta=0.0000000005$		$\beta=0.0000000002$	$\beta=0.0000000001$	$\beta=0.00000000005$
$\beta=0.0000000002$		$\beta=0.0000000001$	$\beta=0.00000000005$	$\beta=0.00000000002$
$\beta=0.0000000001$		$\beta=0.00000000005$	$\beta=0.00000000002$	$\beta=0.00000000001$
$\beta=0.00000000005$		$\beta=0.00000000002$	$\beta=0.00000000001$	$\beta=0.000000000005$
$\beta=0.00000000002$		$\beta=0.00000000001$	$\beta=0.000000000005$	$\beta=0.000000000002$
$\beta=0.00000000001$		$\beta=0.000000000005$	$\beta=0.000000000002$	$\beta=0.000000000001$
$\beta=0.000000000005$		$\beta=0.000000000002$	$\beta=0.000000000001$	$\beta=0.0000000000005$
$\beta=0.000000000002$		$\beta=0.000000000001$	$\beta=0.0000000000005$	$\beta=0.0000000000002$
$\beta=0.000000000001$		$\beta=0.0000000000005$	$\beta=0.0000000000002$	$\beta=0.0000000000001$
$\beta=0.0000000000005$		$\beta=0.0000000000002$	$\beta=0.0000000000001$	$\beta=0.00000000000005$
$\beta=0.0000000000002$		$\beta=0.0000000000001$	$\beta=0.00000000000005$	$\beta=0.00000000000002$
$\beta=0.0000000000001$		$\beta=0.00000000000005$	$\beta=0.00000000000002$	$\beta=0.00000000000001$
$\beta=0.00000000000005$		$\beta=0.00000000000002$	$\beta=0.00000000000001$	$\beta=0.000000000000005$
$\beta=0.00000000000002$		$\beta=0.00000000000001$	$\beta=0.000000000000005$	$\beta=0.000000000000002$
$\beta=0.00000000000001$		$\beta=0.000000000000005$	$\beta=0.000000000000002$	$\beta=0.000000000000001$
$\beta=0.000000000000005$		$\beta=0.000000000000002$	$\beta=0.000000000000001$	$\beta=0.0000000000000005$
$\beta=0.000000000000002$		$\beta=0.000000000000001$	$\beta=0.0000000000000005$	$\beta=0.0000000000000002$
$\beta=0.000000000000001$		$\beta=0.0000000000000005$	$\beta=0.0000000000000002$	$\beta=0.0000000000000001$
$\beta=0.0000000000000005$		$\beta=0.0000000000000002$	$\beta=0.0000000000000001$	$\beta=0.00000000000000005$
$\beta=0.0000000000000002$		$\beta=0.0000000000000001$	$\beta=0.00000000000000005$	$\beta=0.00000000000000002$
$\beta=0.0000000000000001$		$\beta=0.00000000000000005$	$\beta=0.00000000000000002$	$\beta=0.00000000000000001$
$\beta=0.00000000000000005$		$\beta=0.00000000000000002$	$\beta=0.00000000000000001$	$\beta=0.000000000000000005$
$\beta=0.00000000000000002$		$\beta=0.00000000000000001$	$\beta=0.000000000000000005$	$\beta=0.000000000000000002$
$\beta=0.00000000000000001$		$\beta=0.000000000000000005$	$\beta=0.000000000000000002$	$\beta=0.000000000000000001$
$\beta=0.000000000000000005$		$\beta=0.000000000000000002$	$\beta=0.000000000000000001$	$\beta=0.0000000000000000005$
$\beta=0.000000000000000002$		$\beta=0.000000000000000001$	$\beta=0.0000000000000000005$	$\beta=0.0000000000000000002$
$\beta=0.000000000000000001$		$\beta=0.0000000000000000005$	$\beta=0.0000000000000000002$	$\beta=0.0000000000000000001$
$\beta=0.0000000000000000005$		$\beta=0.0000000000000000002$	$\beta=0.0000000000000000001$	$\beta=0.00000000000000000005$
$\beta=0.0000000000000000002$		$\beta=0.0000000000000000001$	$\beta=0.00000000000000000005$	$\beta=0.00000000000000000002$
$\beta=0.0000000000000000001$		$\beta=0.00000000000000000005$	$\beta=0.00000000000000000002$	$\beta=0.00000000000000000001$
$\beta=0.00000000000000000005$		$\beta=0.00000000000000000002$	$\beta=0.00000000000000000001$	$\beta=0.000000000000000000005$
$\beta=0.00000000000000000002$		$\beta=0.00000000000000000001$	$\beta=0.000000000000000000005$	$\beta=0.000000000000000000002$
$\beta=0.00000000000000000001$		$\beta=0.000000000000000000005$	$\beta=0.000000000000000000002$	$\beta=0.000000000000000000001$
$\beta=0.000000000000000000005$		$\beta=0.000000000000000000002$	$\beta=0.000000000000000000001$	$\beta=0.0000000000000000000005$
$\beta=0.000000000000000000002$		$\beta=0.000000000000000000001$	$\beta=0.0000000000000000000005$	$\beta=0.0000000000000000000002$
$\beta=0.000000000000000000001$		$\beta=0.0000000000000000000005$	$\beta=0.0000000000000000000002$	$\beta=0.0000000000000000000001$
$\beta=0.0000000000000000000005$		$\beta=0.0000000000000000000002$	$\beta=0.0000000000000000000001$	$\beta=0.00000000000000000000005$
$\beta=0.0000000000000000000002$		$\beta=0.0000000000000000000001$	$\beta=0.00000000000000000000005$	$\beta=0.00000000000000000000002$
$\beta=0.0000000000000000000001$		$\beta=0.00000000000000000000005$	$\beta=0.00000000000000000000002$	$\beta=0.00000000000000000000001$
$\beta=0.00000000000000000000005$		$\beta=0.00000000000000000000002$	$\beta=0.00000000000000000000001$	$\beta=0.000000000000000000000005$
$\beta=0.00000000000000000000002$		$\beta=0.00000000000000000000001$	$\beta=0.000000000000000000000005$	$\beta=0.000000000000000000000002$
$\beta=0.00000000000000000000001$		$\beta=0.000000000000000000000005$	$\beta=0.000000000000000000000002$	$\beta=0.000000000000000000000001$
$\beta=0.000000000000000000000005$		$\beta=0.000000000000000000000002$	$\beta=0.000000000000000000000001$	$\beta=0.0000000000000000000000005$
$\beta=0.000000000000000000000002$		$\beta=0.000000000000000000000001$	$\beta=0.0000000000000000000000005$	$\beta=0.0000000000000000000000002$
$\beta=0.000000000000000000000001$		$\beta=0.0000000000000000000000005$	$\beta=0.0000000000000000000000002$	$\beta=0.0000000000000000000000001$
$\beta=0.0000000000000000000000005$		$\beta=0.0000000000000000000000002$	$\beta=0.0000000000000000000000001$	$\beta=0.00000000000000000000000005$
$\beta=0.0000000000000000000000002$		$\beta=0.0000000000000000000000001$	$\beta=0.00000000000000000000000005$	$\beta=0.00000000000000000000000002$
$\beta=0.0000000000000000000000001$		$\beta=0.00000000000000000000000005$	$\beta=0.00000000000000000000000002$	$\beta=0.00000000000000000000000001$
$\beta=0.00000000000000000000000005$		$\beta=0.00000000000000000000000002$	$\beta=0.00000000000000000000000001$	$\beta=0.000000000000000000000000005$
$\beta=0.00000000000000000000000002$		$\beta=0.00000000000000000000000001$	$\beta=0.000000000000000000000000005$	$\beta=0.000000000000000000000000002$
$\beta=0.00000000000000000000000001$		$\beta=0.000000000000000000000000005$	$\beta=0.000000000000000000000000002$	$\beta=0.000000000000000000000000001$
$\beta=0.000000000000000000000000005$		$\beta=0.000000000000000000000000002$	$\beta=0.000000000000000000000000001$	$\beta=0.0000000000000000000000000005$
$\beta=0.000000000000000000000000002$		$\beta=0.000000000000000000000000001$	$\beta=0.0000000000000000000000000005$	$\beta=0.0000000000000000000000000002$
$\beta=0.000000000000000000000000001$		$\beta=0.0000000000000000000000000005$	$\beta=0.0000000000000000000000000002$	$\beta=0.0000000000000000000000000001$
$\beta=0.0000000000000000000000000005$		$\beta=0.0000000000000000000000000002$	$\beta=0.0000000000000000000000000001$	$\beta=0.00000000000000000000000000005$
$\beta=0.0000000000000000000000000002$		$\beta=0.0000000000000000000000000001$	$\beta=0.00000000000000000000000000005$	$\beta=0.00000000000000000000000000002$
$\beta=0.0000000000000000000000000001$		$\beta=0.00000000000000000000000000005$	$\beta=0.00000000000000000000000000002$	$\beta=0.00000000000000000000000000001$
$\beta=0.00000000000000000000000000005$		$\beta=0.00000000000000000000000000002$	$\beta=0.00000000000000000000000000001$	$\beta=0.000000000000000000000000000005$
$\beta=0.00000000000000000000000000002$		$\beta=0.00000000000000000000000000001$	$\beta=0.000000000000000000000000000005$	$\beta=0.000000000000000000000000000002$
$\beta=0.00000000000000000000000000001$		$\beta=0.000000000000000000000000000005$	$\beta=0.000000000000000000000000000002$	$\beta=0.000000000000000000000000000001$
$\beta=0.000000000000000000000000000005$		$\beta=0.000000000000000000000000000002$	$\beta=0.000000000000000000000000000001$	$\beta=0.0000000000000000000000000000005$
$\beta=0.000000000000000000000000000002$		$\beta=0.000000000000000000000000000001$	$\beta=0.0000000000000000000000000000005$	$\beta=0.0000000000000000000000000000002$
$\beta=0.000000000000000000000000000001$		$\beta=0.0000000000000000000000000000005$	$\beta=0.0000000000000000000000000000002$	$\beta=0.0000000000000000000000000000001$
$\beta=0.0000000000000000000000000000005$		$\beta=0.0000000000000000000000000000002$	$\beta=0.0000000000000000000000000000001$	$\beta=0.00000000000000000000000000000005$
$\beta=0.0000000000000000000000000000002$		$\beta=0.0000000000000000000000000000001$	$\beta=0.00000000000000000000000000000005$	$\beta=0.00000000000000000000000000000002$
$\beta=0.0000000000000000000000000000001$		$\beta=0.00000000000000000000000000000005$	$\beta=0.00000000000000000000000000000002$	$\beta=0.00000000000000000000000000000001$
$\beta=0.00000000000000000000000000000005$		$\beta=0.00000000000000000000000000000002$	$\beta=0.00000000000000000000000000000001$	$\beta=0.000000000000000000000000000000005$
$\beta=0.00000000000000000000000000000002$		$\beta=0.00000000000000000000000000000001$	$\beta=0.000000000000000000000000000000005$	$\beta=0.000000000000000000000000000000002$
$\beta=0.000000000000000000000000000$				