

海岸堤防による二次元海浜の地形変化

服 部 昌太郎*・川 又 良 一**

1. ま え が き

海岸侵食防止工として海岸堤防（護岸）が建設されると、その前面にあった砂浜が短期間に消失し、堤防前面での局部洗掘が進行して堤体が崩壊することが、近年多くの地点で認められる¹⁾。

海岸堤防などの海浜地形に及ぼす影響の中で、堤脚部での局部洗掘に着目した研究が、従来よりなされている。しかし、堤脚部の局部洗掘を含む海岸堤防前面の海浜地形変動は、入射波の碎波状態とその位置、および沖浜より堤防前面にかけての底質移動などに対応して生ずるので、海浜全体の变形との関連の下に、海岸堤防の海浜形状に及ぼす影響を検討する必要がある。

海岸堤防前面の消失した浜が回復し汀線が前進する過程は、堤体よりの波の反射・もどり流れなどの影響を受けるとはいえ、自然海浜の波による海浜变形過程と何らかの類似点があると考えられる。本研究はこのような考えに基づいて、海岸堤防の海浜变形に及ぼす影響を実験的に検討したものである。

2. 従来の研究と本研究

海岸堤防（以下堤防と略記する）による海浜地形変動、これは構造物—移動床としての海浜—波と流れの三者の相互作用の下に起生する、数多くの要因が複雑に関係しあう現象である。この問題の基礎的な解明は、前記の理由より2次元模型実験による研究で行われて来た。従来の実験的研究は、すべて実験波として規則波を、模型底質として自然砂を使用している^{2)~10)}。また多くの実験は、1/10 勾配の初期海浜より形成される平衡海浜上に堤防を設置した後、平衡海浜を形成させた入射波と同一の特性をもつ波によって、海浜变形を生じさせるという実験方法によっている。したがって、堤防の設置位置が平衡海浜の汀線より碎波点沖側までの場合が実験の主たる対象となり、堤防を汀線より陸側に設置した場合の実験は比較的少ない。

堤防堤脚部での局所洗掘に対する従来の研究成果より堤防を設置する海浜形状とその設置位置とによる局部洗掘深さとその時間的变化^{2),4)}、堤防前面での碎波ともどり流れ¹¹⁾、底質の移動形式の効果^{9),12)}、堤防の反射率^{8),11)}など、堤防の海浜变形に対する影響について、数多くの重要な知見がえられている。

しかし、堤防前面に一旦消失した海浜が回復するような場合に対しては、前述の従来の研究成果に加えて、堤防前面域の海浜地形全体の変形挙動がより一層重要となる。そこで、従来の研究成果を踏まえて、本研究では図—1に示すような実験波の特性変化の下で、堤防前面の海浜形状が侵食性のものより堆積性のものに移行する過程を検討する。

波による2次元海浜地形の形成に関しては、従来より非常に多くの研究が進められて来た。しかし、入射波特性を変化させた場合の実験は、Wattsの入射波周期を変化させたもの¹³⁾、土屋らの風波によるもの¹⁴⁾、堀川・砂村らの波形勾配を変化させたもの¹⁵⁾があるに過ぎない。

先に述べたように、従来の堤防効果の実験は自然砂を模型底質として使用している。入射波により形成される海浜形状、碎波帯内での底質移動および粒径効果などを考慮して、本研究では空中比重1.33、中央粒径0.55mmのプラスチック粒（アンバーライト）を使用する。このような軽量の模型底質を使用する場合の実際海浜との相似性、自然砂を使用した場合との差異など、まだ検討すべき事柄は残されている^{16),17)}。

3. 実験装置と実験方法

実験は、長さ16m、幅0.5m、高さ0.7mの片面ガラス張りの二次元波動水槽を使用して行う。実験水槽の一端にはフラップ型の造波装置、またその他端より8mにわたる区間には、粒径分布がほぼ様なプラスチック粒を底質とする1/20勾配海浜模型が設置される。

入射波波高は容量式波高計とペン書きオシロによって検出・記録し、海浜・堤防よりの波の反射率はHealyの方法で算出する。碎波点位置は、目測によると同時に小型容量式波高計による検出水面変動より、入射

* 正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科

** 正会員 中央大学助手 理工学部土木工学科

波前面がほぼ垂直となる所とし、碎波波高も同時に測定する。

海浜形状は、あらかじめ定めた時間間隔ごとに造波を一時的に中断し、砂面測定器によって水槽中心線上の地形を測定する。入射波波高および反射率の測定は、地形測定後の造波開始直後に行う。実験波の波高と周期は、水平床部（水深 0.35m）で底質移動が発生しないよう、堀川らの底質初期移動限界条件¹⁸⁾を考慮して決定する。

堤防前面にある海浜が侵食性の波によって後退・消失する場合、堤防よりの反射波やもどり流れの影響などによって、形成される海浜形状は自然海浜の場合と相当異なる。この海浜形状の差は碎波点より岸側の区域で顕著であり、これが堤防前面での海浜の回復に大きな影響を有すると考えられる。以上の事柄より、本実験では以下に述べる実験方法を用いる。

1/20 勾配海浜に、堆積性の海浜地形を形成する実験波を長時間（24 時間以上）入射させ、まず平衡海浜を形成させる。この平衡海浜を実験の基準地形とし、汀線より陸側の地点に模型鉛直堤防を設置する。堤防設置後、侵食性の波（周期は一定とし、波高のみを変える）

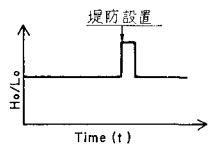


図-1 本実験の入射波特性変化

を短時間この海浜に入射させ、堤防前面の海浜後退・局部洗掘を生ぜしめる。そして初期海浜に入射させたとき同一の入射波を再び入射させ、海浜地形が変化する状況などを測定する（図-1 参照）。なお、侵食性の波の入射継続時間は、堤防前面の海浜形状が所要のものをうるよう調節する。

4. 予備実験結果

図-2 は、自然砂（ $\gamma_s=2.64$, $d_{50}=0.29$ mm）とアンバーライトによる 1/20 勾配海浜に、沖波波形勾配 $H_0/L_0=0.006$ （ $H_0=3.75$ cm, $T=2.0$ sec）の波を入射させた場合の、海浜形状を比較したものである（図中 S. W. L. 上の矢印が碎波位置を示す）。

軽量底質のアンバーライトの場合は、自然砂の場合に

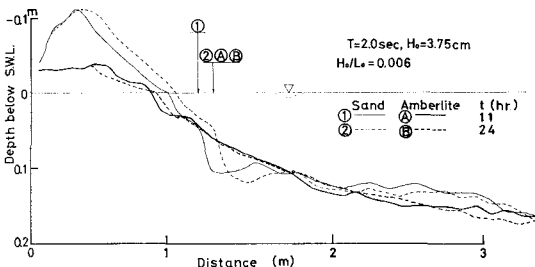


図-2 模型底質の違いによる海浜形状の比較（自然砂とアンバーライト）

比べて底質移動は活発であり、このため海浜形状は全般的に平滑なものとなる。沿岸砂州は、自然砂の場合に比べてアンバーライトの場合は形成しにくい。このような軽量底質の示す挙動は、Nayak¹⁶⁾ と Paul ら¹⁷⁾の実験でも認められている。図-2 の2つの海浜形状より、アンバーライトを底質とする場合の方が、より砂海浜の特徴をもつ海浜地形を示していると思われる。

5. 自然海浜に対する実験結果

実験波の特性と堤防設置の海浜変形に及ぼす効果を検討する基準として、自然海浜に対する実験を行う。

自然海浜に対する実験結果の例として、図-3 と 4 を示す。図-3 は $H_0/L_0=0.008$ の堆積性の波（ $H_0=2.5$ cm, $T=1.4$ sec）を 1/20 勾配海浜に、図-4 は $H_0/L_0=0.011$ の侵食性の波（ $H_0=3.5$ cm, $T=1.4$ sec）を、 $H_0/L_0=0.007$ の入射波（ $H_0=2.2$ cm）によって形成した平衡海浜に入射させた場合の海浜変形経過をそれぞれ示したものである。

堆積性海浜を形成する波で発生した沿岸砂州は、徐々に汀線に向かって移動する。砂州の移動と共に碎波点も汀線に近づき、平衡海浜形状として step 型の海浜が形成される（図-3）。この海浜変形過程を検討するため、図-5 に Battjes の surf similarity parameter ξ_b ¹⁹⁾, Kemp の phase difference P ²⁰⁾, および反射率 K_R の時間的変化 (t/T) を示す。

$$\left. \begin{aligned} \xi_b &= (h_b/X_b)/(H_0/L_0)^{1/2} \\ P &= X_L/L_b \\ K_R &= H_R/H_I \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

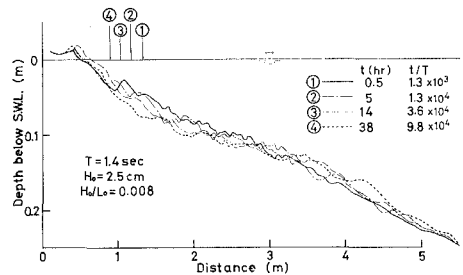


図-3 自然海浜の実験結果（堆積性海浜）

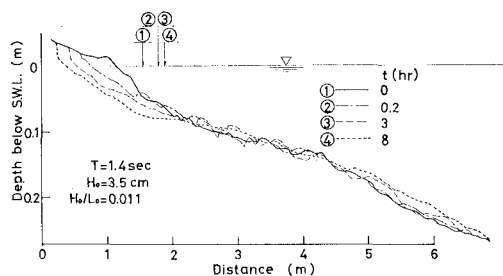


図-4 自然海浜の実験結果（侵食性海浜）

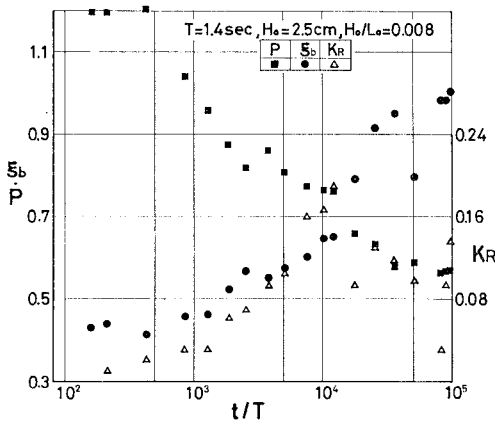


図-5 ξ_b , P および K_R の時間的变化

ここに, H_I , H_R , H_b は入射波高, 反射波高, 砕波波高, L_0 , L_b は沖波と砕波点での波長, X_b は砕波点より汀線までの距離, X_L は砕波点より最高うち上げ点までの距離, h_b は砕波水深, T は入射波周期, t は時間である(図-6(a)). 図-5 より沿岸砂州が汀線に接近するにつれて, 海浜よりの反射率が增大し, また沿岸砂州が消失すると, 砕波位置は急に汀線に接近し, 砕波形態は plunging 型より surging 型に移行し, 反射率は減少することが認められる(表-1 参照).

侵食性の波が海浜に入射すると前浜勾配は急になり, 図-4 に見られるように汀線の後退と共に前浜もほぼ平行して後退する. 汀線後退による侵食底質は, もどり流れによって沖浜へ輸送され, 外浜での海底勾配は緩くなる. このため, 砕波は plunging 型より spilling 型に移行し, 海浜よりの反射率は小さくなる. 侵食性海浜が示

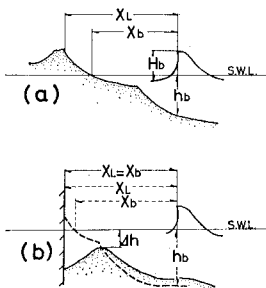


図-6 記号説明図

表-1 Phase difference と Surf similarity parameter による砕波形態と海浜形状の区分

砕波形態	海浜形状	Phase difference		Surf similarity parameter	
		著者ら	Kemp	著者ら	Battjes
Spilling 型	—	$P > 1.2$	$P > 1.1$	$\xi_b < 0.4$	$\xi_b < 0.4$
Plunging 型	Bar 型	$1.2 > P > 0.7$	$1.1 > P > 0.7$	$0.4 < \xi_b < 0.7$	$0.4 < \xi_b < 2.0$
Surging 型	Step 型	$0.7 > P$	$0.7 > P$	$0.7 < \xi_b$	$2.0 < \xi_b$

すこのような挙動は, 実験条件の違いによる若干の差はあるが, Chesnutt らの実験結果²¹⁾と類似している.

6. 海岸堤防を設置した場合の実験結果

図-7 は, 堤防前面に海浜が回復しない場合の実験結果例である. $H_0/L_0=0.014$ の波によって形成された堤防前面の海浜①に, $H_0/L_0=0.008$ の波を 0.5 時間入射させたものである. この実験結果のように, 堤防前面で入射波が砕波しない場合には, 堤防前面に重複波が形成され, 海浜は回復することはない.

図-8 と 9 は, 侵食性の波によって形成された海浜に堆積性の波が入射し, 堤防前面に海浜が回復する場合の海浜形状変動を示す実験結果例である. 入射波特性の変化は, それぞれの図中に示される. ここに, 実験波の入射経過時間は, 堆積性の波の入射開始を基準としたもので, 海浜地形①は侵食性の波によって形成された侵食海浜, また④は堆積性の波による最終地形である.

これらの実験結果に見られるように, 堤防前面に汀線が現われた後の海浜変形過程は, 図-3 の自然海浜の場合と非常に類似している. 堤防前面での局部洗掘が進行した後波高の小さい波が堤防に入射すると, 堤防よりの反射波によって部分重複波が発生し, 海浜形状もこの重複波に対応して変化する(図-9 (b)). しかし, 堤防前面でこの部分重複波が砕波し, 底質が堤脚部に向って輸送されると, 堤防前面の洗掘は徐々に埋戻される. そして, この堤防前面の海浜変動に対応して, 入射波の砕波位置は沖側に移動し, 最終的には堤防前面に海浜が回復する.

以上の実験結果より, 堤防前面に海浜が回復する条件を, 自然海浜の場合と同様に surf similarity parameter

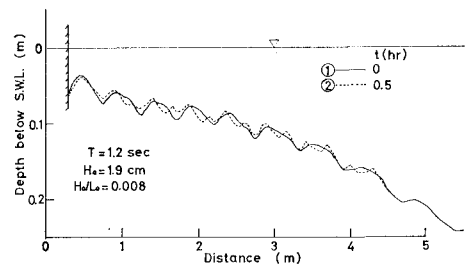
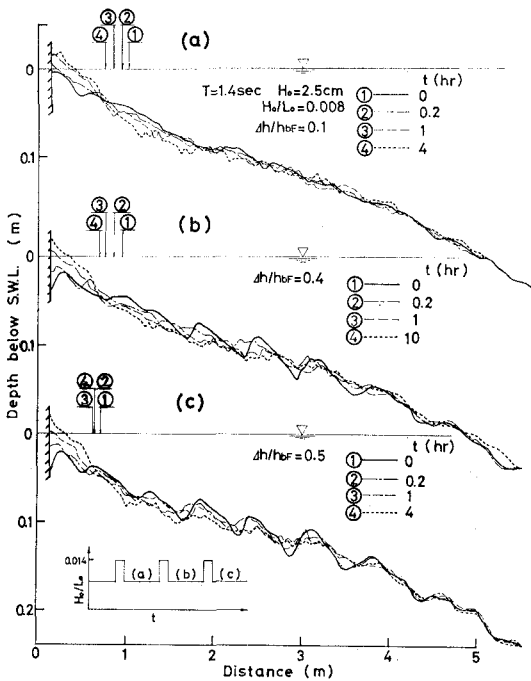


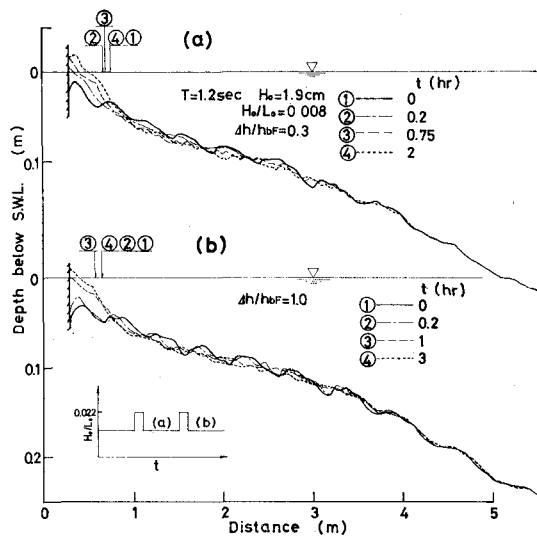
図-7 海岸堤防を設置した場合の海浜変形(海浜が回復しない場合)



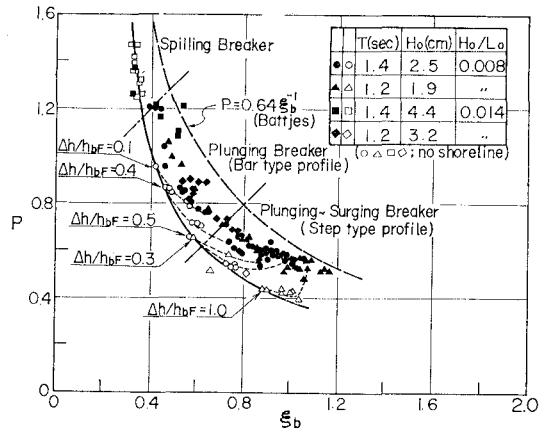
図—8 海岸堤防を設置した場合の海浜変形
(海浜が回復する場合)

と phase difference とで検討しようと考えられる。

図—10 は、堤防を設置した場合の P と ξ_b との関係を示したものである。この図には、堤防前面に汀線が存在する場合と自然海浜の場合 (図—3) の実験値を黒印、また堤防前面に汀線がない場合を白抜きの記号で示してある。この場合、 X_L および X_b は共に砕波点より堤防までの距離とし、 P および ξ_b を算定した (図—6 (b))。



図—9 海岸堤防を設置した場合の海浜変形
(海浜が回復する場合)

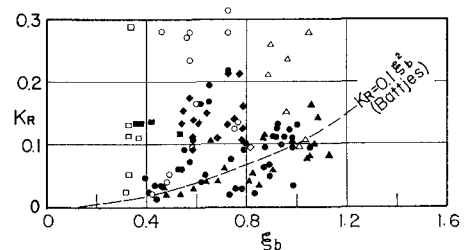


図—10 堤防設置時の海浜変動に対する
 P と ξ_b との関係

図—10 に見られるように、侵食性の波によって汀線が後退する場合と、堆積性の波によって堤防前面に汀線が回復した場合の P と ξ_b との間には、図中の破線で示される Battjes の与えた関係 $P=0.64\xi_b^{1.19}$ と類似の関係がえられる。なお本実験結果と Battjes の式との差は、底質特性の違いによるものと考えられる。

すでに述べたように、堤防前面での海浜地形に対応して、入射波の砕波形態も変化する。図—10 には、本実験で認められた海浜形状と砕波形態の発生域を、一点鎖線で示してある。表—1 は、本実験結果よりえられた発生域に対する P と ξ_b の範囲を、Kemp^{20), 22)} および Battjes¹⁹⁾ が与えたものと比較したものである。この表にみられるように、本実験の結果と Kemp の示した phase difference の与える海浜形状と砕波形態の発生区分は、非常に良く一致している。しかし、surf similarity parameter ξ_b に対しては、本実験によるものと、Battjes のものとは若干の差が認められる。これは底質の特性差と共に、砕波帯内の海底勾配の決定法などの差も関係していると思われる。

侵食性の波によって堤防前面が洗掘された後、堆積性の波により堤防前面に海浜が回復するための一つの条件は、入射波が堤防前面で砕波することである。図—10



図—11 堤防設置時の海浜変動に対する
 K_R と ξ_b との関係

には、堤防前面に汀線が存在せず、しかも入射波が碎波している場合の P と ξ_b との関係を、 $\Delta h/h_{bF}$ をパラメーターとして示してある。ここで、 Δh は侵食性の波によって生じた堤防直前の最小水深(図-6(b))、また h_{bF} は堆積性の波によって形成される堤防前面の最終海浜による碎波水深である。図-10に見られるように、堤防前面の海底面が堆積性の入射波によって上昇するにつれて P - ξ_b の関係は、堤防前面に汀線が存在する場合の関係(黒印)に移行してゆく。また、堤防前面の海底洗掘が進行するに従って、すなわち $\Delta h/h_{bF}$ の値が増大するに従って、堆積性の波の入射開始時の P の値は減少し、 ξ_b の値は増大している。

以上の実験結果より、堤防前面に海浜が回復しない条件を推定するため、図-10の実線で示す堤防前面に汀線が存在しない場合の P - ξ_b の包絡線を画くと、式(2)の関係をうる。すなわち、

$$P < 0.4 \text{ および } \xi_b > 1.1 \dots\dots\dots (2)$$

図-11は、 K_R と ξ_b の関係を示したものである。図-10と11により堤防前面の海浜に沿岸砂州が存在すると、砂州の移動に応じて反射率が変化する。そして、沿岸砂州が消失すると実験結果にばらつきはあるが、ほぼ Battjes の提示した $K_R = 0.1\xi_b^2$ (図中の破線) の関係¹⁹⁾を満たすことが認められる。Battjes は、 ξ_b と碎波形態および海浜形状との関係についても検討しており、このことを考慮すれば本実験結果に見られるように、沿岸砂州の存在によって海浜よりの反射率は変化するこの方が妥当な結果である。本実験の結果によると、Battjes の提示した K_R と ξ_b との関係は、主として step 型海浜に対して適用しうるものといえる。

図-11には、堤防前面に汀線が存在しない場合の実験結果も示されている。この場合には、堤防よりの反射によって反射率は大きくなるが、堤防前面の海浜変形が堆積型に進むにつれて、汀線が存在する場合の K_R と ξ_b の関係へ移行する。

7. おわりに

海岸堤防(護岸)前面に消失した海浜が回復する条件を、二次元模型実験によって検討を行った。

海岸堤防前面の海浜が侵食性の波によって後退し、堤脚部付近が局部洗掘された後、堆積性の波が入射すると堤防前面に再び汀線が回復する。この海岸堤防の影響を受ける状況下での海浜地形変動も、phase difference と surf similarity parameter とによってその挙動傾向を検討しうることが、本研究によって認められた(図-10)。その結果、本研究の範囲内では、海岸堤防前面に海浜が回復しない条件として、 $P < 0.4$ 、 $\xi_b > 1.1$ がえられた。

海岸堤防前面に汀線が現われると、海浜変形過程は自

然海浜の場合とほとんど同一の傾向を示す。そして、表-1に見られるように、波によって形成される海浜地形と碎波形態は、入射波特性変化による若干の履歴効果を考慮した実験条件の下でも、phase difference と surf similarity parameter とによって、その発生区域が分類しうることが認められた。

本研究は、模型底質として軽量のアンバーライトを使用し、また実験条件も限定されている。したがって、本研究結果の妥当性を確かめるため、今後も引き続き種々の検討を進める必要がある。

本研究を行うに当たって、種々ご助言を賜った東京大学工学部 砂村継夫博士、また実験に協力した当時の中央大学の学生諸君に感謝致します。最後に、本研究は文部省科学研究費自然災害特別研究(代表者:京都大学岩垣雄一教授)による研究の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 堀川清司: 海岸工学, 東大出版会, 昭和48年4月, pp. 275~277.
- 2) 樫木 亨・川崎芳一: 海岸堤防堤脚部の洗掘について, 京大防災研年報, 第4号, 昭和35年, pp. 1~12.
- 3) Kadib, Abdel-Latif: Beach profile as affected by vertical walls, Tech. Memo. No.143, B.E.B., 1936.
- 4) 佐藤昭二・田中則男・入江 功: 直立壁堤堤部の波による2次元洗掘, 第13回海講講演集, 昭和41年, pp. 156~161.
- 5) 細井正延: 堤防設置による海浜変形について, 第14回海講講演集, 昭和42年, pp. 325~328.
- 6) 野田英明・岩佐敏博: 海岸堤防堤脚部の洗掘に関する研究, 第19回海講論文集, 昭和47年, pp. 53~57.
- 7) 沼田 淳・和田 信: 護岸前面海底地形の変化に関する一実験, 第20回海講論文集, 昭和48年, pp. 495~499.
- 8) Herbich, J.B. and S.C.Ko: Scour of sand beaches in front of seawalls, Proc. of 11th Conf. on Coastal Eng., 1968, pp. 622~643.
- 9) Russell, R.C.H. and C. Inglis: The influence of a vertical wall on a beach in front of it, Proc. of Minesota International Hydraulics Convention, 1953, pp. 221~226.
- 10) 本間 仁・堀川清司・安川 浩: 海岸護岸の実験的研究—根固め工について—, 第7回海講講演集, 昭和35年, pp. 237~244.
- 11) 樫木 亨: 海岸堤防基部の洗掘機構に関する研究(その1), 第14回海講講演集, 昭和42年, pp. 329~335.
- 12) 細井正延・荒川忠昭: 堤防前面の海浜変形に関する一考察, 第15回海講講演集, 昭和43年, pp. 136~140.
- 13) Watts, G.M.: Laboratory study of effect of varying wave periods on beach profiles, Tech.

- Memo. No.53, B.E.B., 1954
- 14) 土屋義人・稲田和則: 風波による海浜変形に関する実験—特に沿岸砂州の発生限界について—, 第21回海講論文集, 昭和49年, pp. 219~224.
 - 15) 堀川清司・砂村継夫・近藤浩右・岡田 滋: 波による二次元汀線変化に関する実験的研究, 第22回海講論文集, 昭和50年, pp. 329~334.
 - 16) Nayak, I.V.: Equilibrium profiles of model beaches, Tech. Rept. HEL -2-25, Univ. of California, Berkeley, 1970.
 - 17) Paul, M.J., J.W. Kamphuis, and A. Brebner: Similarity of equilibrium beach profiles, Proc. of 13th Conf. on Coastal Eng., 1972, pp. 1217~1234.
 - 18) 堀川清司・佐々木民雄: 波の運動に伴う砂の移動限界水深の数表, 土木学会誌, Vol. 55, No.5, 昭和45年, pp. 58~63.
 - 19) Battjes, J.A.: Surf similarity, Proc. of 14th Conf. on Coastal Eng., 1974, pp. 466~480.
 - 20) Kemp, P.H.: The relation between wave action and beach profile characteristics, Proc. of 7th Conf. on Coastal Eng., 1960, pp. 262~276.
 - 21) Chesnutt, C.B. and C.J. Galvin, Jr.: Lab. Profile and reflection changes for $H_0/L_0=0.02$, Proc. of 14th Conf. on Coastal Eng., 1974, pp. 958~977.
 - 22) Kemp, P.H. and D.T. Plinston: Beaches produced by waves of low phase difference, Proc. A.S.C.E., Vol. 94. No. HY. 5, 1968, pp. 1183~1195.
-