

千葉県検見川人工海浜の変形機構について

BEACH CHANGES AT KEMIGAWA ARTIFICIAL BEACH IN CHIBA PREFECTURE

熊田貴之¹・小林昭男²・三波俊郎³・宇多高明⁴・芹沢真澄³・古池 鋼³
Takayuki KUMADA, Akio KOBAYASHI, Toshiro SAN-NAMI, Takaaki UDA,
Masumi SERIZAWA and Kou FURUIKE

¹学生会員 工修 日本大学大学院理工学研究科海洋建築工学専攻 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

²正会員 工博 日本大学専任講師 理工学部海洋建築工学科 (同上)

³海岸研究室 (有) (〒160-0011 東京都新宿区若葉1-22 ローヤル若葉208)

⁴正会員 工博 国土交通省土木研究所河川部長 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

Beach changes at the Kemigawa artificial Beach in Tokyo Bay were investigated based on field surveys. Beach nourishment was conducted and the shoreline parallel to the seawall was formed. In order to enhance stability of nourished sand, curved groins were built at the south and north ends after the nourishment, forming wave calm zones in their lee sides. Large scale shoreline changes were triggered due to the construction. Beach changes were measured, and the changes in the beach profiles and the shoreline were studied. Comparison between the measured shoreline and that predicted by Hsu's model was made.

Key Words : Artificial beach, nourishment, shoreline change, aerial photograph, Kemigawa Beach

1. まえがき

近年, わが国では全国的に海岸侵食が進行し自然海浜の喪失が続いている。こうした状況の一方で, 臨海部開発に伴うミティゲーションや親水空間の創出を目的とした人工海浜の造成もまた多く行われてきている。東京湾に面した検見川浜もその一つであり, 両端を突堤で囲まれた延長1, 300mの区域で養浜が行われた。しかし養浜後侵食が進み護岸前面に高い浜崖が形成され, 折角建設された人工海浜であるにもかかわらず, 海岸利用上望ましくない状況となっている。特に海浜中央では侵食が激しく, 現在では遊泳・立ち入り禁止措置が取られている。このことから検見川浜では安全な海浜に戻すための有効な措置が望まれている。しかしながら, 従来検見川浜の詳細な海浜変形特性は明らかにされておらず, 有効な侵食対策の立案のためにはまず侵食の実態を明らかにすることが必要である。このことから, 本研究では前報¹⁾に続き, 検見川浜で現地踏査, 海浜地形測量, 海浜砂の材料調査などを行うとともに, 空中写真の判読による汀線変化分析, および実測汀線と修正Hsuモデル²⁾による予測汀線との比較を行った。

2. 検見川浜の概要

検見川浜は図-1に示すように東京湾最奥部に位置する。検見川浜で海岸線に立てた法線の方法はSWである。当海岸の風向特性として, 年間の最多風向はNNW (出現率11. 9%) であり, SSW (10. 9%), NNE (9. 7%) がそれに次ぐ。風速はSSW時に最も速い³⁾。

人工海浜の造成は1977年に開始され1991年に完成した³⁾。図-2 (a), (b) に示すように人工海浜の両端には先端部が円弧状の曲突堤が, また沖合には養浜砂流出防止用の潜堤が設置され, さらに海浜中央には小突堤が設置された。海浜の沿岸方向の長さは1, 300m, 岸沖方向の砂浜幅は満潮時で50m, 平均潮位時で80mであった。曲突堤は鋼管矢板式で長さは593mである。潜堤は石積み堤でその長さは1, 300mである。養浜砂の中央粒径 (d_{50}) は0. 162mmで, 養浜総土砂量は $1. 23 \times 10^6 \text{ m}^3$ であり, 海浜の初期勾配は1/20であった。

しかしながら養浜の完成と同時に侵食が始まり, 1993年には顕著な浜崖が形成された。1995年以降侵食対策として海浜中央の北側150mの位置にY字突堤が建設されている。

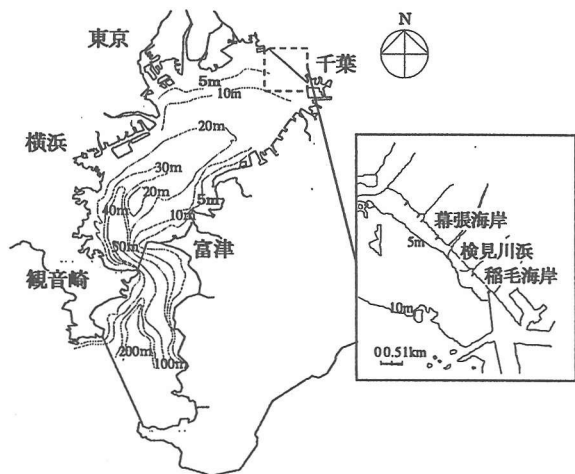


図-1 検見川浜の位置

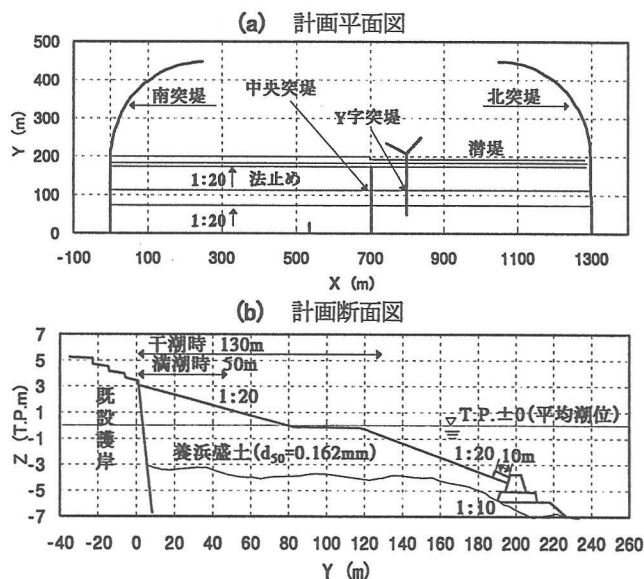


図-2 検見川浜の概略図

3. 空中写真の汀線変化

検見川浜の過去の海浜変形過程を把握するために、空中写真よりまず大スケールでの海浜状況の変化を判読した。検見川浜では(株)京葉測量撮影により毎年1回空中写真が撮影されてきているが、以下では全体で13枚の空中写真より3枚を選んで写真判読を行う。なお、空中写真による汀線変化解析では1987～1999年に撮影された全ての写真を用いることとする。

写真-1には1987年の空中写真を示す。この段階では突堤先端の曲部は建設されておらず海岸線は直線状であった。養浜汀線は護岸線と平行に設定されたが、波の入射方向が平均汀線への法線方向よりわずかに時計回りの方向に傾いていたため、南突堤付近の汀線は北突堤付近よりも若干前進している。

写真-2は1993年の空中写真である。突堤先端の曲部が完成し、それに伴って突堤付け根付近の汀線が前進し海浜中央部では後退した。このような汀線変化は、曲突堤により波の遮蔽域が形成されたために、波の遮蔽域外から

遮蔽域内に向かう沿岸漂砂が生じたことによる。

写真-3に示す1999年の空中写真では汀線変化が更に顕著となった。海浜中央に設置されていた養浜砂安定化のための小突堤が撤去され、海浜中央より北側150mに新たにY字突堤が建設されつつある。それに伴い汀線は建設中のY字突堤の付け根では1993年と比べて前進し、Y字突堤の両側のやや離れた場所では後退した。また、曲突堤の付け根ではさらに前進していることが分かる。

検見川浜における1987～1999年撮影の空中写真から各年の汀線形状を読み取り、潮位補正を行って1987年を基準とした各年の汀線変化量(ΔY)を算出した。結果を図-3に示す。なお、後述する前浜測量データをもとにM. W. L. 時の汀線位置に補正した。

1999年の ΔY を見ると $X=710\text{m}$ で $\Delta Y=-34.6\text{m}$ と、最大の汀線後退量を示す。この汀線後退量は初期海浜における平均潮位時の海浜幅80mの43%にも達する量であった。これと対照的に $X=1,290\text{m}$ では90.6mも汀線が前進している。また汀線変化量(ΔY)に海岸線の分割幅(ΔX)を乗じて1999年の侵食域と堆積域の面積 A_1 、 A_2 を算定すると、それぞれ $A_1=1.6 \times 10^4\text{m}^2$ 、 $A_2=2.2 \times 10^4\text{m}^2$ となった。

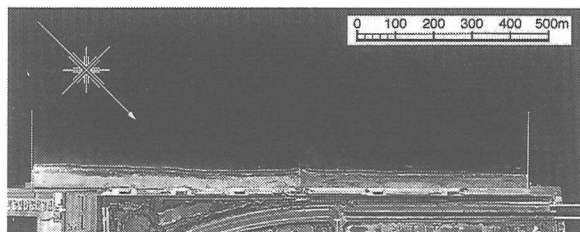


写真-1 検見川浜の空中写真 (1987年)



写真-2 検見川浜の空中写真 (1993年)

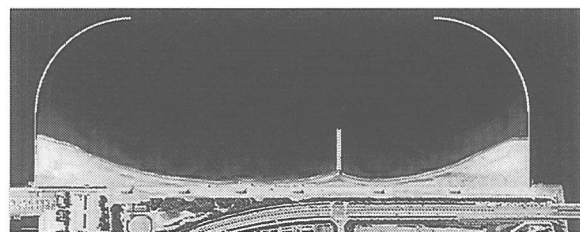


写真-3 検見川浜の空中写真 (1999年)

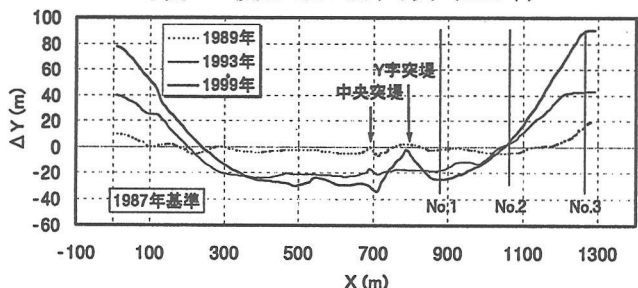


図-3 1987年を基準にした汀線変化量

図-4は、図-3に測線位置を示すように、侵食域のNo. 1、侵食も堆積も起きていない中立位置のNo. 2、堆積域のNo. 3の汀線変化量（ ΔY ）の時系列変化である。No. 2の ΔY は測定年によって若干変動はあるものの大きな変化はない。これに対しNo. 1では ΔY が経年的に減少し、No. 3では顕著に増大している。これらの長期的トレンドとは別に、No. 1とNo. 3の ΔY には顕著な1年の周期変動が見られる。すなわちNo. 3で汀線が前進した時にNo. 1で後退するという特性が見られる。場所的に対照的な位置にあるNo. 1とNo. 3で逆モードの汀線変化が生じるためには、波向の周期変動が存在しなければならない。そして図-4に示したように侵食域での汀線後退と堆積域での汀線の前進が同時に進行していることは、このような変形が沿岸漂砂起源であることを強く示唆していると考えられる。また、図-4によれば汀線はまだ安定形状に到達しておらず、今後も汀線変化が継続する傾向にある。

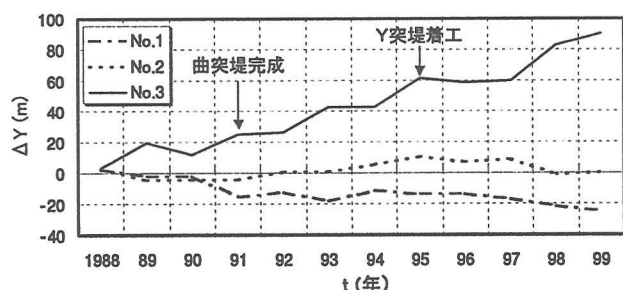


図-4 汀線変化量の経時変化

4. 海浜の現地踏査

2000年10月9日、海浜の侵食状況を調査するために現地踏査を実施した。現地踏査では、海浜を北側から南側へと汀線に沿って移動しつつ調べた。海浜の南北両端に設置された曲突堤は釣り桟橋を兼ねており、突堤上に上がることができる。写真-4は北突堤上において突堤の付け根方向を撮影したものである。向かって右側に海浜が広がっている。注目されるのは突堤上に砂が堆積し、さらに砂が右側で厚く、左側ではほとんど堆積していないことである。これは手すりの右側に広がる海浜から飛砂によって突堤上へと砂が運ばれてきていること、そして海浜砂の一部はSSWの風によって飛砂となって海浜区域から失われていることを示している。

写真-5は突堤上から南側の海浜を撮影したものである。この位置から南側の海浜では沖向きに凸な形状の汀線が形成されており、またパーム上には数本の満潮時汀線の縞模様が見られ、その背後にはほぼ平坦な面が広がっている。このことは、この平坦面が波の作用で土砂が堆積して形成されたものであることを示している。なお、写真中央やや左側に見える白い建築物は検見川市民病院である。

写真-6はさらに市民病院に接近して海浜状況を撮影したもので、中央には病院の施設が大きく写っている。汀

線は、写真中央付近から大きく湾曲し背後地へと離れていく。この付近の汀線形状は写真-5と異なり全体に凹状である。ここでも汀線に沿ってパームが形成されており、その陸側にはやや標高の低い土地がある。写真中央付近より手前は汀線が前進した区域、遠方は汀線の後退区域であって、写真中央は汀線が前進も後退もしていない中立断面（図-3の測線No. 2）がある場所である。

写真-7は、写真-6では中央やや右に写されていた休憩所に接近して撮影したものである。海岸護岸と平行に延びた養浜区域において浜崖が形成されている。この付近は汀線が最も後退した場所であり、そこでは越波が激しいために写真-8のように海岸線に沿って連続的に消波ブロックが置かれている。消波ブロック背後の浜崖の高さは約1.8mに達し、造成直後の土砂が著しく削り取られ

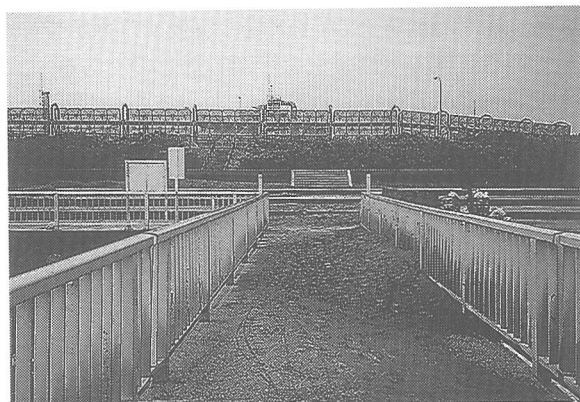


写真-4 北突堤上における飛砂による土砂の堆積状況



写真-5 北突堤の南側で堆積して広がった砂浜



写真-6 侵食・堆積域の境界付近の海浜状況

たことが分かる。侵食土砂の大部分は写真-5に示す北突堤に隣接する堆積域へと運ばれたと考えられる。

写真-9は写真-8よりもさらに南側で撮影したもので、直立護岸の表面に残された模様より判断すると、ポールで示す位置まで土砂が被さっていたが、それが運び去られたことを表している。写真-9に示す状況はその南側でも同様に続いており、護岸下部には消波ブロックが連続的に設置されている。

写真-10は写真-9の撮影地点付近から南側を望んだもので、護岸と直交方向に見えるのはポケットビーチの中央やや北側に建設されたY字突堤である。さらに写真-11は侵食が最も激しい区域から北側を撮影したものである。写真手前側では、直立護岸の前面に造成した平坦な面は完全に侵食され消失しているが、その前方ではこの平坦面が一部残されている。

写真-12は、海浜中央のY字突堤の背後で汀線がやや前進している区域の海岸状況を撮影したものである。ここでは一部前浜が広がっているが、これはまずY字突堤が存在しない時期に大きく削られて浜崖が形成されたが、その後Y字突堤の付け根部分では波の遮蔽域が形成され、局所的に汀線が前進したことを表している。

5. 海浜測量

2000年11月15日、海浜形状を定量的に把握するために海浜地形測量を行った。図-2(a)に示したように、海浜の

中央付近（沿岸方向距離 $X=625\text{m}$ ）から北突堤付け根付近（ $X=1,275\text{m}$ ）までを50mピッチで直接水準測量法により測量した。同時に同じ測線上で前浜砂を採取した。図-



写真-9 直立護岸に残された盛土の高さ



写真-10 侵食域と中央の小突堤



写真-7 侵食域の全体状況

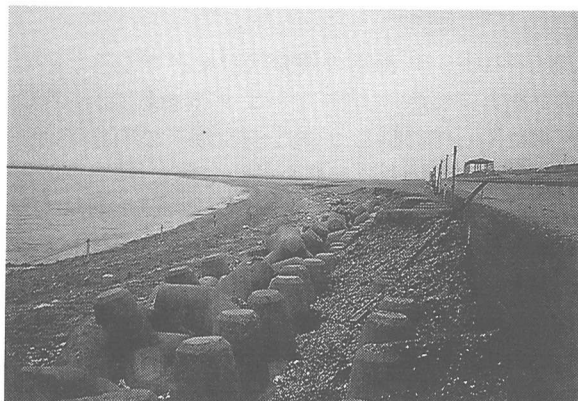


写真-11 侵食域から北側の全体状況を望む



写真-8 侵食域における浜崖形成状況



写真-12 小突堤背後の海浜状況

3に示した侵食域の測線No. 1と、中立断面の測線No. 2, 堆積域の測線No. 3の海浜縦断面形を重ね合わせて表示したのが図-5である。各測線の前浜勾配は約1/8とほぼ同一の値を示し、前浜付近の海浜断面は岸沖方向にほぼ平行移動した特徴を示している。検見川浜はもともと沿岸方向にNo. 2に近い断面形状でほぼ一様に養浜されたから、測線No. 1では計画断面から約30m陸側へ汀線が後退し、堆積域のNo. 3では約90m前進したことを示している。

図-6は前浜勾配 ($\tan \beta$) と中央粒径 (d_{50}) の沿岸方向分布である。前浜勾配は縦断測量データから算定した。 d_{50} は採取砂を粒度分析して求めた。汀線後退域 ($X=925\sim 975\text{m}$) では前浜勾配が大きく、かつ d_{50} が大きい。これに対し既設中央突堤およびY字突堤 ($X=675\sim 825\text{m}$)、北突堤付け根 ($X=1,175\sim 1,275\text{m}$) など汀線前進域では前浜勾配が小さく、かつ d_{50} が小さいという特徴がある。

図-7は各測点における粒度分析結果をもとに礫、粗砂、細砂の含有率をまとめたものである。図-6において相対的に d_{50} の大きい侵食域 ($X=925\sim 975\text{m}$) では、粗砂・礫の含有率が25%と高いのに対し、堆積域 ($X=675\sim 825\text{m}$, $1,175\sim 1,275\text{m}$) では粗砂・礫の含有率は10%未満と低い特徴が現れている。

以上のことから、検見川浜は曲突堤の建設に伴い沿岸漂砂移動が起こり、侵食域では主として細砂が流出して粗砂が残され、堆積域では細砂が堆積し、これに応じて前浜勾配が定められたと考えられる。前浜勾配と d_{50} の関係を線形回帰すると式(1)の関係が導かれる。決定係数 (R^2) は0.944であり両者の間に高い相関があることが分かる (図-8参照)。

$$\tan \beta = 0.286 (d_{50})^{0.533} \quad (1)$$

前浜勾配に関する従来の研究^{4) 5) 6)}では、前浜勾配は底質粒径だけではなく入射波高、周期に依存していることが指摘され、Sunamura⁷⁾はこれらのパラメータを用いて前浜勾配の予測式(2)を与えた。

$$\tan \beta = 0.12 (H_b / (g^{1/2} T d_{50}^{1/2}))^{-1/2} \quad (2)$$

ここに、 H_b と T は碎波波高と周期である。式(1)の関係は、沿岸方向の土砂移動の結果として求められたものである。これに対し式(2)は局所的に岸沖方向の漂砂によって前浜で侵食・堆積が起こる場合に得られた関係である。両者を比較すると、粒径のべき数が式(2)では0.25であるのに対し、式(1)では0.53であり、検見川浜で得られた式(1)のほうが粒径への依存性が強く、波浪条件への依存性が低いことが分かる。

6. 安定汀線に関するHsuモデルの適用

検見川浜は曲突堤により波の遮蔽域が形成されたために、波の遮蔽域外から遮蔽域内へ向かう沿岸漂砂が発生し、海浜の中央が侵食されたと考えられる。図-4に示した ΔY の経時変化によると汀線はまだ安定形状に達していないため、海浜中央部はさらに激しく侵食されると考

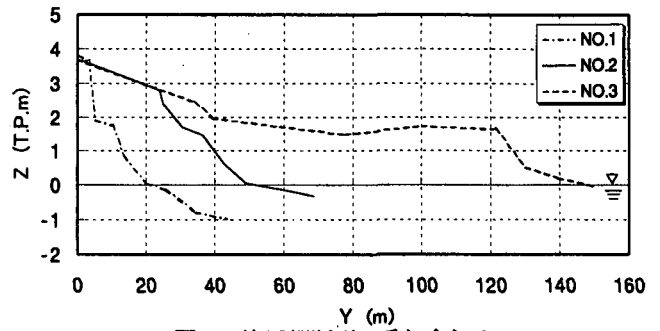


図-5 海浜縦断面形の重ね合わせ

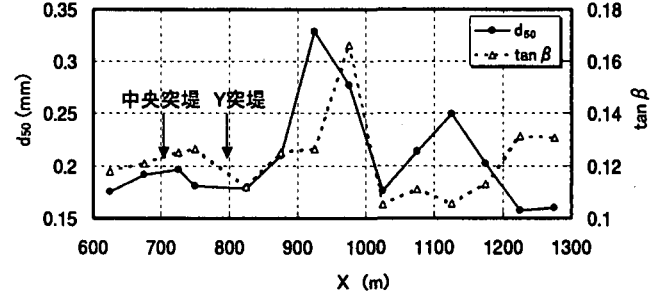


図-6 $\tan \beta$ と d_{50} の沿岸方向分布

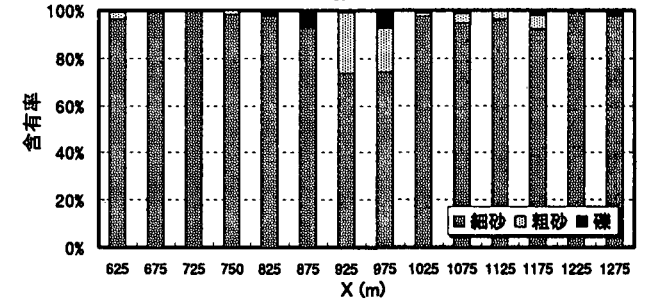


図-7 礫、粗砂、細砂の含有率

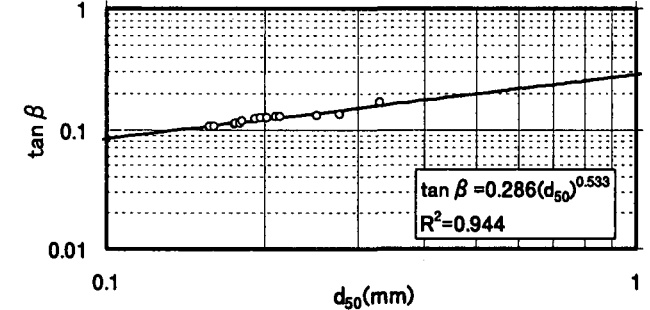


図-8 $\tan \beta$ と d_{50} の関係

えられる。そこで将来の安定汀線形状を予測した。安定汀線形状の予測には、極座標表示の汀線形状に関して2次のオーダーまでの回帰分析により直接的に汀線形状を求め、土砂収支および境界条件を満足させた修正Hsuモデル²⁾を使用した。計算はY字突堤がない場合 (ケース1) とY字突堤を考慮した場合 (ケース2) である。初期汀線は、ケース1では1987年とし、ケース2では1999年とした。

ケース1の計算結果を図-9に示す。計算結果によると海浜両端部の汀線が沖向きに前進し、海浜中央部では汀線が後退する。この場合、汀線変化の不動点は図-3に示した実測値とよく一致している。初期汀線からの最大汀線後退量は $X=647\text{m}$ で98m、最大汀線前進量は $X=1,259\text{m}$ で286mとなり、実態のほぼ2倍の変化である。これは、予測結果が安定形状であるのに対して、現況汀線はその変化途中にあるためと考えられる。なお、計算結果によると現況

汀線は約27年後（2027年）に安定形状になると予測される。したがって計画時の直線状汀線で護岸の露出を防ぐには、曲突堤の建設時に少なくとも護岸から約50m以上岸側に汀線が後退可能なスペースが必要であったと考えられる。

同様にケース2の計算結果を図-10に示す。曲突堤の付け根ではケース1と同様に汀線は1999年に比べ194m前進し、Y字突堤付け根では23m前進した。汀線はX=958mで、直立護岸より岸側に11m後退し、汀線変化の不動点は実態よりも曲突堤方向に70m移動した。直立護岸より岸側まで後退した侵食域（X=900～1,000m）では、現地調査によると浜崖の形成が進み、護岸に砂がほとんどついていないことから、計算と実態がほぼ対応を示していると考えられる。ケース1と比較すると、Y字突堤が建設されたことによって最大汀線後退量は40m軽減され、海浜中央の侵食対策として有効であることが分かる。しかしX=900～1,000mには新たに侵食域が形成されるので追加養浜の必要があると考えられる。

今後Y字突堤が完成したとしても侵食域は形成されるため、養浜土砂が更に必要となる。その場合、新たな購入砂で養浜するのではなく、曲突堤付け根付近の舌状砂州上で通常時には波の作用の及ばない区域の砂を採取し、侵食域に養浜する方法が考えられる。曲突堤付近で、現況で波の作用の及ばない植生範囲（X=1,050～1,300m）の面積に陸上部の標高1.5mを乗じると $1.4 \times 10^4 \text{ m}^3$ の砂の採取が可能である。砂を採取した部分は通常の粘性土と入れ替えれば植生の繁茂にも有効である。

7. まとめ

検見川浜を対象とした種々の現地調査結果は以下に要約される。

- ①海浜測量結果によると、各測線の前浜勾配は約1/8とほぼ同一の値を示し、海浜縦断形は岸沖方向にほぼ平行移動していることが分かった。また侵食域の汀線は建設当初より約30m後退し、堆積域では約90m前進したことが分かった。
- ②粒度分析結果によると、検見川浜は曲突堤建設に伴い侵食域では沿岸漂砂移動が起こり主として細砂分が流出し粗砂分が残された。対照的に堆積域では細砂分が堆積し、これに前浜勾配が応じていることが示された。前浜勾配と d_{50} の間には $\tan \beta = 0.286 (d_{50})^{0.533}$ の関係が導かれ、前浜勾配は d_{50} に高く依存していることが分かった。
- ③空中写真に基づく汀線変化解析結果によると、侵食域での汀線後退と堆積域での前進が同時に進行していることから、検見川浜は海浜変形が主として沿岸漂砂によって支配されることが分かった。また、養浜後14年が経過した現段階の汀線はまだ安定形状に到達しておらず、今後汀線が安定形状に達するまで変化が続くと考えられる。計算結果によると、海浜中央のY字突堤がなかった場合の

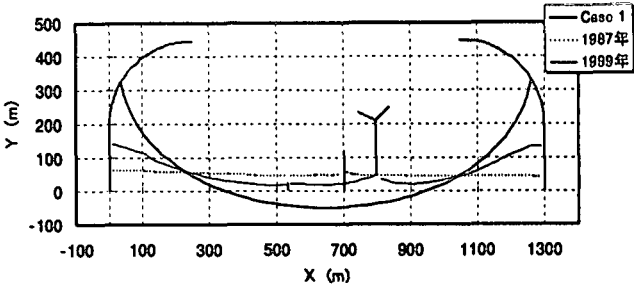


図-9 Y字突堤がない場合の安定汀線形状

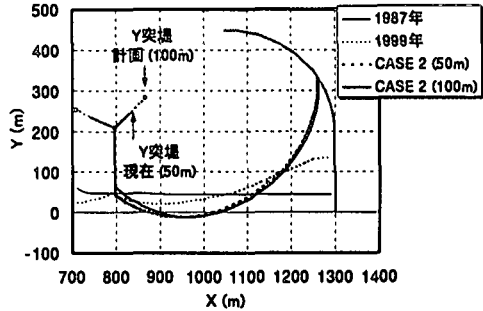


図-10 Y字突堤を考慮した場合の安定汀線形状

汀線は2027年には現況の約2倍の汀線前進・後退で安定することが示された。したがって計画時の直線状汀線で護岸の露出を防ぐには、曲突堤の建設時に少なくとも護岸から約50m以上岸側に汀線が後退可能なスペースが必要である。新たな養浜砂には、曲突堤付け根付近の舌状砂州上で通常時には波の作用の及ばない区域の土砂を利用することが有効なことが示された。

謝辞：本研究の実施に際し、検見川浜の波浪観測記録及び浅深図などの貴重なデータを提供して頂いた千葉県土木部港湾整備課主任技師の野村拓司氏および千葉県千葉港湾事務所建設課長の児安哲司氏に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 熊田貴之, 小林昭男：検見川浜を対象にした人工海浜の侵食過程に関する研究, 海洋開発論文集, 第16巻, pp. 315-320, 2000.
- 2) 芹沢真澄, 宇多高明, 三波俊郎, 古池綱, 神田康嗣：修正HSUモデルによるヘッドランド周辺の最適安定海浜形状の計算法, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 646-650, 1996.
- 3) (財)沿岸開発技術研究センター：検見川の浜数値解析, 千葉県海岸環境整備委託委員会報告書, 1993.
- 4) Bascom, W. N.: The relationship between sand size and beach-face slope, Am. Geophy. Union Trans., Vol. 32, pp. 866-874, 1951.
- 5) Wiegel, R. L.: Oceanographical Engineering, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 532p, 1964.
- 6) King, C. A. M.: Beaches and Coasts, Edward Arnold, London, 570p, 1972.
- 7) Sunamura, T.: Quantitative predictions of beach-faces slopes, Geol. Soc. Am. Bull., Vol. 95, pp. 242-245, 1984.