

千葉県検見川浜の海浜変形と 3 次元 Hsu モデルによる変化予測

熊田 貴之* ・ 小林 昭男** ・ 宇多 高明***
芹沢 真澄**** ・ 三波 俊郎***** ・ 星上 幸良*****

1. はじめに

近年, わが国では防波堤建設に伴う沿岸漂砂の連続性の阻止や波浪場の変化に起因する地形変化, 砂利採取やダム建設に伴う河川流出土砂量の減少などにより, 全国的に海岸侵食が進行し自然海岸が著しく減少している。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 1,300 m の区域で養浜が行われた。しかし養浜後侵食が進行し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いないのが現状である。そこで本研究では, 検見川浜で現地踏査(熊田ら, 2001), 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・深淺図の判読および汀線変化分析を行い, 海浜変形特性を明らかにすることにした。また, 有効な侵食対策の立案のために将来の安定汀線形状を修正 Hsu モデル(芹沢ら, 1996)により求めるとともに, Hsu モデルを拡張した 3 次元海浜変形予測モデル(芹沢ら, 2000)を用いてバームと浜崖の形成を含む 3 次元的な海浜形状を予測し, 実測海浜形状との比較を行った。

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。検見川浜の海岸線の法線方向は 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%) がこれ

に次ぐ。風速は SSW 時に最も速い(沿岸開発技術研究センター, 1993)。

人工海浜の造成は 1977 年に開始され 1991 年に完成した。図-2a, b に示すように人工海浜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 1,300 m, 岸沖方向の砂浜幅は満潮時で 50 m, 平均潮位時で 80 m であった。曲突堤は鋼管矢板式で延長は 593 m である。潜堤は石積み堤で長さは 1,300 m である。養浜砂の中央粒径(d_{50})は 0.162 mm

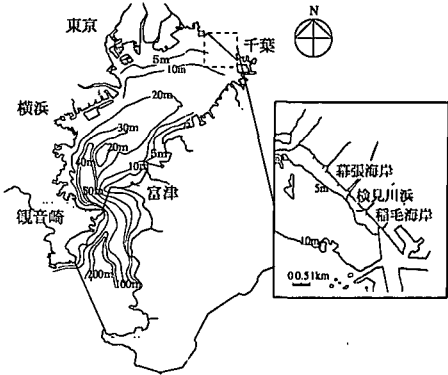


図-1 検見川浜の位置

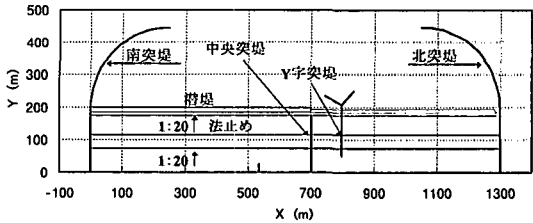


図-2a 検見川浜の計画平面図

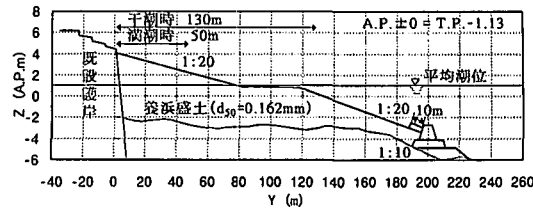


図-2b 検見川浜の計画断面図

* 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
** 正会員 工博 日本大学専任講師 理工学部海洋建築工学科
*** 正会員 工博 国土交通省 国土技術政策総合研究所研究総務官
**** 正会員 海岸研究室(有)
***** 正会員 国際航業(株)海洋エンジニアリング部

で、養浜総土砂量は $1.23 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、初期海浜勾配は $1/20$ であった。しかし養浜完了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より北側150 mの位置にY字突堤が建設された。

3. 海浜変形特性の解明

3.1 空中写真・深浅図による海浜変形過程の分析

検見川浜の過去の実地変形過程を把握するために、空中写真により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おり、以下では1987年からの13年間の写真のうち3枚を選んで考察を行う。

写真-1a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。1993年撮影の写真-1bでは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-1cに示す1999年の空中写真では汀線変化が更に顕著となっている。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150 m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年に比べて前進し、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。

図-3は1999年測量の深浅図である。Y字突堤と両突堤の間では侵食が起きた結果2～3 mの等深線が凹状となり、汀線付近では浜崖が形成された。初期等深線は護岸線と平行となるように海浜造成が行われ、その後汀線の後退とともに等深線も後退して凹状になったが、そのような特徴を示す等深線はほぼ-3 m以浅にある。このことから侵食域における地形変化の限界水深(h_c)はほぼ-3 mに等しい。一方、南北両突堤の付け根付近では、土砂堆積によるバームの形成によって陸域には+2 mの平坦面が形成されると同時に、海面下では堆積した結果土砂の落ち込みによって突堤の先端方向へと非常に急勾配の海底斜面が形成された。これは、主として2～3 mの間で波の遮蔽域外から遮蔽域内に向かう沿岸漂砂が発生したことにより形成された地形と考えられる。

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-4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80 m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90.6 m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、



写真-1a 検見川浜の空中写真 (1987年)

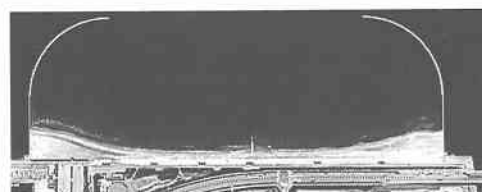


写真-1b 検見川浜の空中写真 (1993年)

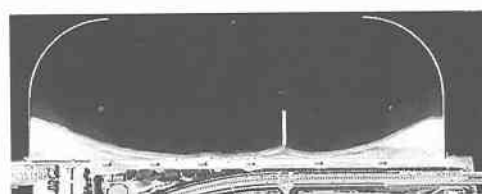


写真-1c 検見川浜の空中写真 (1999年)

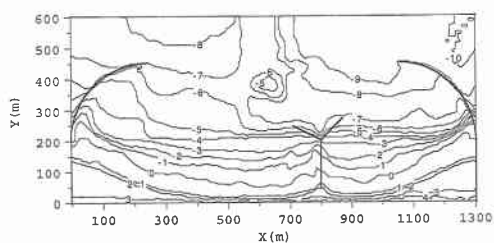


図-3 1999年の深浅図 (A.P.基準)

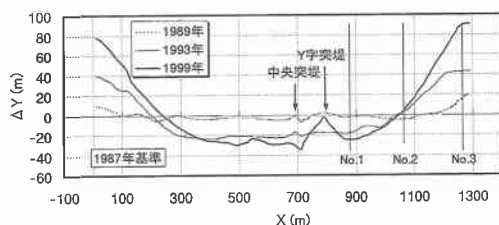


図-4 1987年を基準にした汀線変化量

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。

図-5 は、図-4 に示した侵食域の測線 No. 1, 中立位置の測線 No. 2, 堆積域の測線 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-5 に示したように侵食域での汀線後退と堆積域での汀線的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-5 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。

3.2 海浜測量による海浜地形特性の分析

2000 年 11 月 15 日, 海浜地形測量を行った。図-2a 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 50 m 等間隔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-4 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 の海浜縦断面を重ね合わせて表示したのが図-6 である。各断面の前浜勾配は約 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。検見川浜は当初沿岸方向に No. 2 に近い断面形状でほぼ一様に養浜されたことから, 測線 No. 1 では計画断面から約 30 m 陸側へ汀線が後退し, 堆積域の No. 3 では約 90 m 前進したことを示している。

図-7 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-8 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-7 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。

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

前浜勾配に関する従来の研究 (Bascom, 1951; Wiegell, 1964; King, 1972) 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, Sunamura (1984) 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。

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

ここに, H_b と T は碎波波高と周期である。式 (1) の関係は, 実海岸における主として沿岸方向の土砂移動の

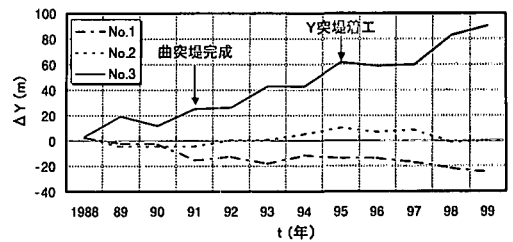


図-5 汀線変化量の経時変化

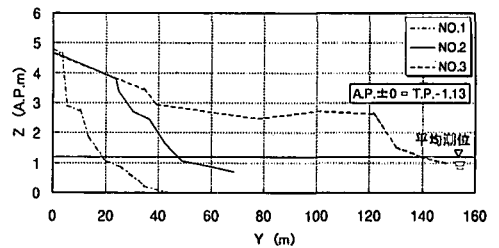


図-6 海浜縦断面の重ね合わせ

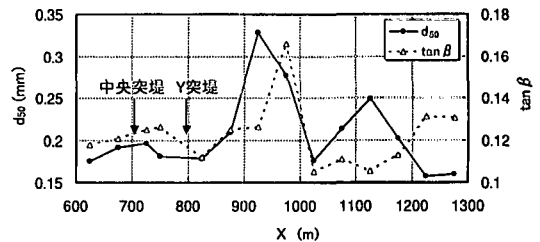


図-7 $\tan \beta$ と d_{50} の沿岸方向分布

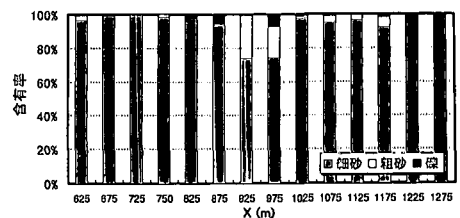


図-8 礫, 粗砂, 細砂の含有率

結果として求められたものである。これに対し式(2)は2次元水槽実験による岸沖方向の漂砂によって、汀線付近において侵食・堆積が起こる場合に得られた関係である。すなわち、式(2)は2次元の現象を対象とした式であるのに対し、式(1)は3次元の現象を考慮した特徴を有している。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、実海岸の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。結局、式(2)と比較して式(1)の方が、検見川浜の前浜勾配と養浜粒径の関係を適切に予測することができると考えられる。

4. Hsuモデルによる変化予測

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-5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えられる。そこで将来の海浜形状を予測した。

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モデルを使用した。また、3次元海浜形状の予測には、このHsuの方式と等深線変化モデルにおいて仮定されている沿岸漂砂量分布を考慮することにより突堤背後における3次元的な海浜変形を予測するHsuの3次元海浜変形モデルを使用した。

汀線形状の計算は、Y字突堤がない場合(ケース1)、Y字突堤を考慮した場合(ケース2)の2ケースを行い、3次元海浜形状の計算はケース2と同様の条件で1ケース行った。なお、3次元海浜変形モデルでは、等深線形状のオーバーハングを避けるため、突堤を簡易な鉤型形状とした。初期地形は、ケース1では1987年とし、ケース2では1999年とした。また3次元海浜形状の予測を行う場合の計算定数として、深浅図の海浜縦断面分析により、地形の移動限界水深(h_c)は-3m、バーム高(h_R)は2.5mとした。陸域、海域における限界勾配は、同様の分析により、それぞれ1/2、1/5とした。

ケース1の計算結果を図-9に示す。海浜両端部の汀線が冲向きに前進し、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-4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 $X=647$ mで98m、最大汀線前進量は $X=1,259$ 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、図-5の汀線変化

を外挿すれば現況汀線は約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。北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 $X=958$ m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北突堤方向に70m移動した。直立護岸より岸側まで後退した侵食域($X=900\sim 1,000$ m)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 $X=900\sim 1,000$ m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。

図-11は3次元的な等深線形状を予測した結果である。Y字突堤の右側区域では2m～2mの等深線が凹状となり、汀線付近では浜崖が形成されている。一方、北突堤付け根付近では土砂堆積によるバームの形成に伴い、2mの平坦面が形成されると同時に、海面下では土砂の落ち込みによって突堤の先端方向へと急勾配の海底斜面が形成されている。これらの状況は、図-3に示した現況の等深線形状を良く再現している。図-12に海浜縦断面形を示す。侵食域では $Z=1\sim 4$ mの範囲で浜崖が形成され、そこからの供給土砂が沿岸漂砂によって北突堤付近へと運ばれ、 $Z=3\sim 9.5$ mの範囲で堆積し、水深の深い場所まで土砂が落ち込んだことが分かる。図-13には

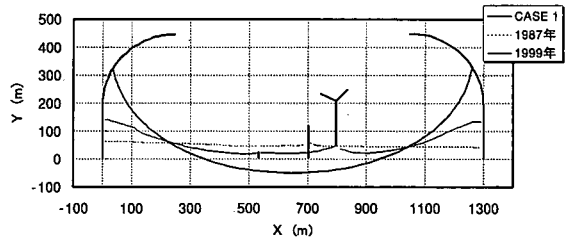


図-9 Y字突堤がない場合の安定汀線形状

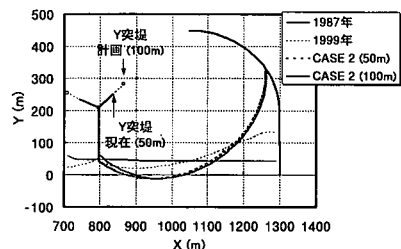


図-10 Y字突堤を考慮した場合の安定汀線形状

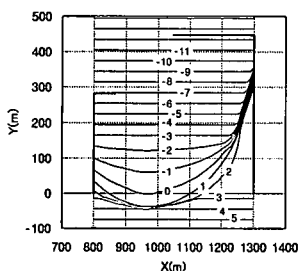


図-11 Y字突堤を考慮した場合の等深線形状 (A.P.基準)

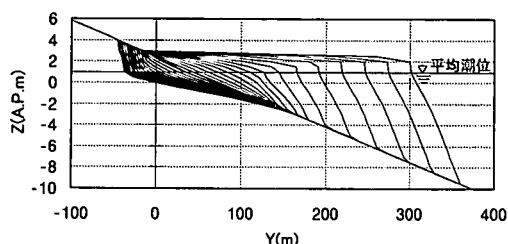


図-12 Y字突堤を考慮した場合の海浜縦断面形

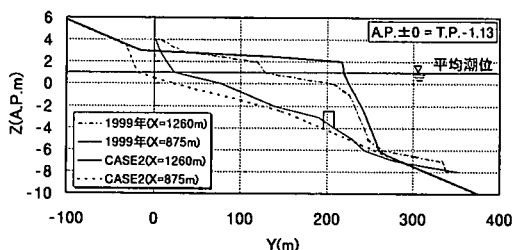


図-13 現況と計算の海浜縦断面形の比較

2断面における計算結果と現況の海浜縦断面形を示す。堆積・侵食域とも地形変化量がやや過大に予測されているが、これは計算結果が、安定汀線形状に対する海浜縦断面形であるのに対し、現況の海浜縦断面形は汀線が安定形状に達する以前のものに相当するためと考えられる。

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。北突堤付近で、現況で波の作用の及ばない植生範囲 ($X=1,050\sim 1,300$ m) の面積に陸上部の標高 1.5 m を乗じると少なくとも $1.4 \times 10^4 \text{ m}^3$ 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。

5. まとめ

本研究の結論は次のように要約される。

(1) 海浜測量結果によると、検見川浜の各測線の前浜勾配は約 1/8 とほぼ同一の値を示し、海浜縦断面は岸

沖方向にほぼ平行移動していること、また侵食域の汀線は建設当初より約 30 m 後退し、堆積域では約 90 m 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。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) 空中写真による汀線変化の解析結果によると、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。一方、養浜後 14 年が経過した現段階では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。

(4) 計算結果によると、海浜中央のY字突堤がない場合の汀線は 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 50 m 以上岸側に汀線が後退可能なスペースが必要であった。一方、Y字突堤の建設により最大汀線後退量はそれが無い場合よりも 40 m 前進するが、沿岸方向距離 $X=900\sim 1,000$ m において標高 4 m の浜崖を含む侵食域が形成された。Y字突堤が完成したとしても浜崖を含む侵食域は形成されるため、養浜土砂が更に必要となる。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である。

参考文献

- 熊田貴之・小林昭男・三波俊郎・宇多高明・芹沢真澄・古池鋼 (2001): 千葉県検見川人工海浜の変形機構について、海洋開発論文集, 第 17 巻, pp. 559-564.
- (財) 沿岸開発技術研究センター (1993): 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.
- 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼・神田康嗣 (1996): 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.
- 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼・神田康嗣 (2000): HSU モデルの 3 次元海浜変形予測モデルへの拡張, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 601-605.
- Bascom, W. N. (1951): The relationship between sand size and beach-face slope, Am. Geophys. Union Trans., Vol. 32, pp. 866-874.
- King, C. A. M. (1972): Beaches and Coasts, Edward Arnold, London, 570 p.
- Sunamura, T. (1984): Quantitative predictions of beach-face slopes, Geol. Soc. Am. Bull., Vol. 95, pp. 242-245.
- Wiegel, R. L. (1964): Oceanographical Engineering, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 532 p.