

砕波帯内の合理的設計水深の設定手法 -Box-Cox変換を用いた海浜地形解析-

A Rational Design Method for Setting Water Depth in Breaker Zone - Beach
Topography Analysis Using Box-Cox Transformation

川浪輝恵¹・赤川嘉幸²・鷺田正樹³

Terue KAWANAMI, Yoshiyuki AKAGAWA, Masaki WASHIDA

¹修(工) セントラルコンサルタント株式会社 環境水工部 (〒104-0042 東京都中央区入船1-4-10)

²正会員 修(工) セントラルコンサルタント株式会社 環境水工部 (同上)

³正会員 セントラルコンサルタント株式会社 環境水工部 (同上)

This research relates to the examination of a rational method for setting the beach topography and design construction surface (seabed excavation level) when designing a shore structure to be constructed in a breaker zone with drastic beach changes. Conventionally, the beach topography and design construction surface are set based on superposition of the results of a bathymetric survey and the average cross-section data. With this setting method, it is impossible to reflect the shore characteristics and coastal sand bar changes in the design and construction of such beach topography, resulting in cases of excessive and unrealistic designs. To improve these problems, digital analysis and statistical methods were introduced to evaluate the beach changes, which can be reflected in the design and construction. In this research, seven breakwaters on the Kochi Coast were selected to make the verification calculations using Box-Cox transformation. As a result, it has been verified that the cross-section of the beach to be designed and constructed can be set in a rational way.

Key Words : *Shore structure, beach topography, design construction surface, breaker zone, seabed excavation level coastal sand bar, Box-Cox transformation*

1. はじめに

高知海岸は、土佐湾の湾奥部にあたる高知県の中央部に位置し、西は萩岬から東は手結岬に至る30kmの砂浜海岸で、その中央部には月の名所として“よさこい節”に歌われる桂浜がある。高知海岸は、かつて豊かな砂浜が広がる白砂青松の海岸として知られ、台風や津波などから沿岸地域を守り続けてきた。

しかし、昭和21年の南海大地震による地盤沈下や、その後の海岸侵食によって、美しい砂浜も消滅の脅威にさらされるようになったことから、昭和44年には物部川河口から高知港東境界に至る8.15km(南国工区)が直轄海岸に指定され、直轄事業が着手された。その後、高知港西境界から新居に至る9.8km(長浜～新居工区)についても、著しい海岸侵食が進行したため、平成6年度に直轄海岸に指定された。

長浜・戸原・仁ノ・新居工区の海岸整備に関する計画としては、「伊勢湾台風規模の高潮・波浪に対して安全性を確保すると共に、自然環境との調和を図る。」ことを目標として、ヘッドランドと養浜を

主体とする計画が検討されている。しかし、海岸保全施設は大規模なものであり、外洋に面し、海象条件が厳しく、計画の実施に当たっては、高度な技術を要するため、当面は第一段階の事業計画を実施しながら、突堤工等の整備による影響把握や施工途中の侵食対策などについて調査・検討を進めながら海岸保全を図っているところである。

現在は、7基のヘッドランドの基部にあたる突堤、4基の離岸堤及び養浜による海岸事業を実施している。図-1に高知海岸全体図を示す。

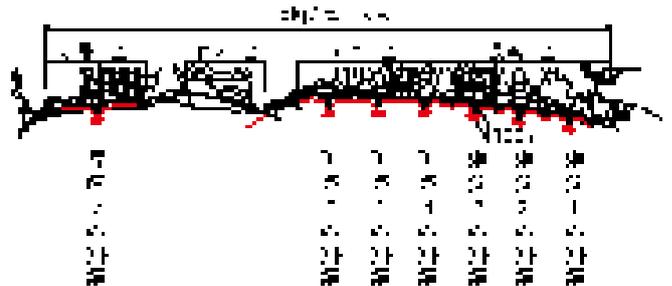


図-1 高知海岸全体図

高知海岸の突堤は、海岸堤防から150m沖合まで建設する不透過構造の漂砂制御構造物である。

沿岸方向に約1km間隔で突堤を7基設置することで、砂浜を分断し、砂浜の変動を抑止することで、防災上必要な砂浜幅を確保しようとする計画である。

高知海岸の海岸保全を実現する上で、漂砂の動きを制御する唯一の構造物であり、計画上最も重要な要素のひとつである¹⁾。反面、最も建設コストを要しており、コスト縮減も解決すべき重要な課題である。

特に、突堤の設計・施工の対象とする海底面の設定については、突堤の機能、規模、コストを支配する最も重要な条件である。

しかし、海岸保全施設の技術上の基準・同解説²⁾や今まで設計に用いられてきた書籍など^{3) 4)}では、「設計においては、標準的な海底地形、海浜地形の断面形状を設定することが一般的であり、断面地形の設定では、平面的及び時間的に変化する断面形状の重ね合わせを行い、平均的あるいは侵食された断面地形などを選定すること」と記載されているに過ぎない。実務上、設計・施工の基準となる高さについて適切に設定することが困難であり、その都度、様々な手法により設定してきたのが実情である。

特に、高知海岸のように、砕波帯内に位置し、海浜変動量が大きい場合は、基準に示されているような単純な海浜断面の重ね合わせや、平均断面による断面・水深設定では、波浪算定の基準となる水深の設定や、床掘面を設定する際、危険側の設定や過剰な床掘が発生するなどの問題点が発生していた。

このような背景を踏まえ、本研究は、砕波帯内に位置する海岸構造物を対象に、合理的で過不足のない設計波浪を設定する水深（以下設計基準線と呼ぶ）と、過剰な床掘を抑止し、経済的で安定となる床掘面（以下施工基盤面と呼ぶ）を海浜断面の変遷から適切に設定する手法を開発することを目的としている。

高知海岸戸原4号突堤の平面図、縦断面図、標準断面図を図-2、図-3、図-4に示す。

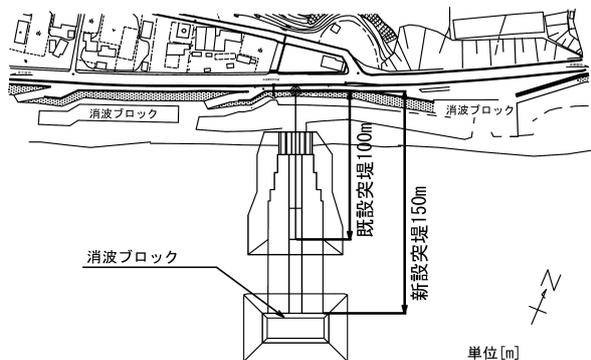


図-2 高知海岸戸原4号突堤 平面図

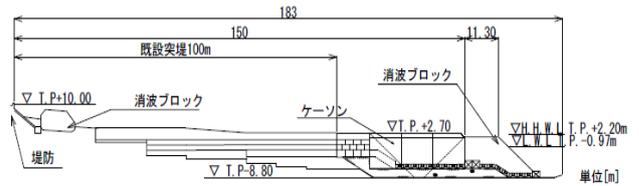


図-3 高知海岸戸原4号突堤 縦断面図

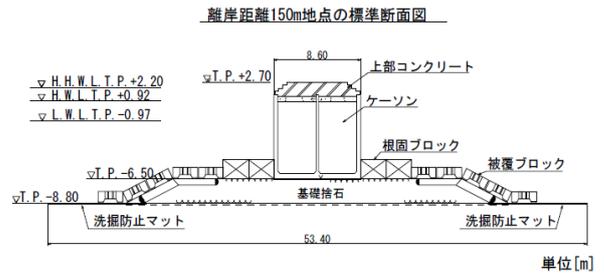


図-4 高知海岸戸原4号突堤 標準断面図

2. 高知海岸の特徴

(1) 面的な海浜変動量の特徴

平面的な位置が異なれば、海岸堤防から同じ 150m 地点であっても、海浜変動量は異なる。高知海岸は 9.8km の延長があり、場所別に異なった漂砂環境下にあることから、図-5 に示すように、海浜断面は大きく異なっている。そのため、海岸全体を対象として平均的な海浜地形の設定や、侵食された地形を設定することは困難である。

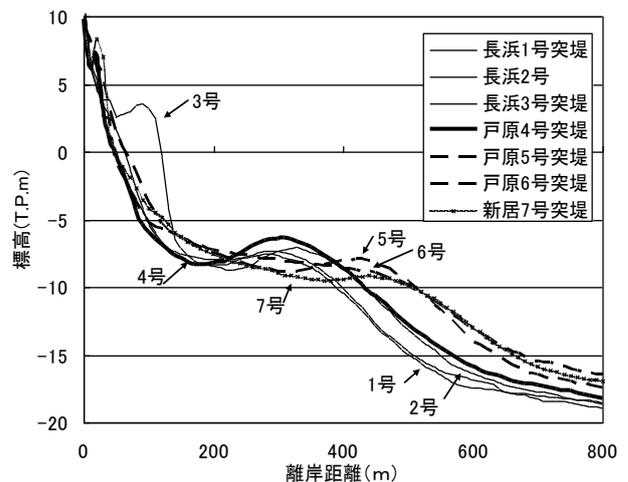


図-5 突堤設計地点の海浜断面

(2) 沿岸砂州の発達

高知海岸の海浜地形は、海岸堤防から沖合100～120m付近、標高T.P. -5m程度の位置に勾配変化点がある。勾配変化点の岸側の海浜勾配は1/10程度、沖

側は1/30～1/50程度である。

平成16年度には大型の台風が多数上陸し、平成17年度に過去最大規模の台風が来襲したことにより、変化点の沖側、180～330m付近にT.P. -3.5mを頂部高とする沿岸砂州が発達した。

図-6に戸原4号突堤地点を対象に、平成7年度から平成21年の深淺測量結果をもとに、海岸堤防を起点とした離岸距離500mの範囲について、海浜断面の変化と平均断面、侵食断面（最深包絡線）を示す。この図から、近年沿岸砂州の発達し、砕波帯内の海浜変動量が增大していることが分かる。

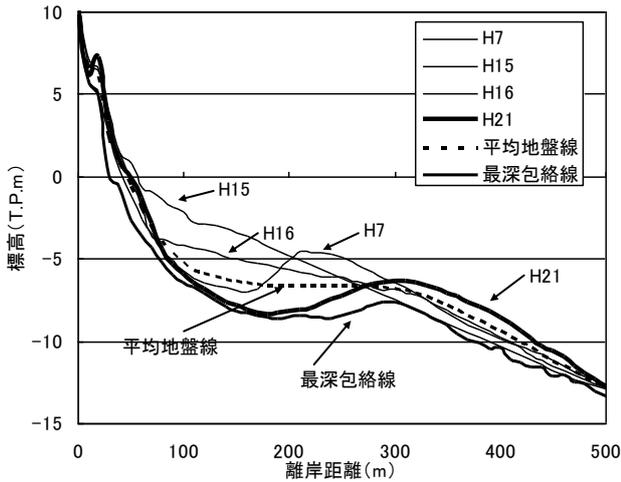


図-6 戸原4号突堤地点の断面変化等

3. 今までの設計手法の課題と問題点

(1) 用語の定義

検討に先立ち、次のように用語を定義した。

- ① 現地盤
突堤位置で行われた最も新しい深淺測量結果
- ② 平均地盤線
突堤位置で行われた過去の深淺測量結果の平均値
- ③ 海浜変動量
突堤等海岸構造物の影響を受けずに、波浪によって発生する海浜断面の変動量
- ④ 仮想施工基盤面
平均地盤線に海浜変動量を加味して作成した面を仮想施工基盤面とする。
- ⑤ 設計基準線
設計外力を算定する基準線で、検討測線における最深包絡線、または仮想施工基盤面のうち、水深の深いほうを設計基準線とする。本研究での最深包絡線の範囲は、5波高沖までの範囲を想定し、海岸堤防から離岸距離200m地点までとした。

(2) 設計基準による算定

高知海岸を例に、設計基準による「平面的及び時間的に変化する断面形状の重ね合わせを行い、平均

的あるいは侵食された断面地形などを選定する」方法により、設計基準線及び施工基盤面を算出した。

表-1は、長浜1号突堤から新居7号突堤を対象に、平成6年度から平成21年度の深淺測量結果をもとに、海岸堤防を起点とした離岸距離150mの範囲について、海浜断面の変化と平均断面、侵食断面（最深包絡線）について示したものである。

図-5に示す通り、平面的な位置が異なれば、海岸堤防から同じ150m地点であっても、海浜変動量は大きく異なる。データ数112個の平均地盤高は、T.P. -5.8mである。最深値は平成19年度の戸原4号突堤のT.P. -8.2m、最浅値は平成15年度の戸原6号突堤のT.P. -2.5mであり、その差は5.7mである。

戸原4号突堤と6号突堤の平面的な距離は、600m程であるのに対し、わずか4年間で5.7mの海浜変動がある。従って、これらの値を基に設計や施工に関する水深を設定することは、現実的に困難であり、経済性、施工性、安全性の観点からも問題である。

表-1 海岸堤防から150m地点の海浜諸元

項目	諸元	備考
データ数	112 個	H6 年度～H21 年度
平均地盤高	T.P. -5.8m	H6 年度～H21 年度
最深地盤高	T.P. -8.2m	H19 年度 戸原 4 号
最浅地盤高	T.P. -2.5m	H15 年度 戸原 6 号
変動量	5.7m	最深値-最浅値

図-7に戸原4号突堤を対象とした、平成7年度から平成21年度の海岸堤防を起点とした離岸距離150mの範囲について、海浜断面の変化と平均断面、侵食断面（最深値）について示す。

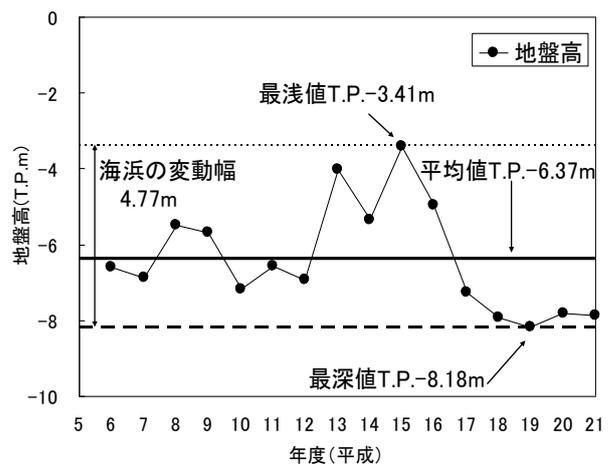


図-7 海岸堤防から150m地点の地盤高の変遷 (戸原4号突堤)

平成15年度では、海岸堤防から150m地点において

T.P. -3.5m程度であった。しかし、平成19年度にはT.P. -8.2m程度まで侵食された。変動幅は4.8mである。平成21年度の地形は、沖合150mまでは、ほぼ侵食断面と同じである。この地形を対象に設計、施工面を考えると、侵食断面により設定するのが妥当であり、平均断面を対象に設定すると、設計外力の過小評価、盛土の発生など、設計、施工上の問題が生じる。

ただし、これは現在の断面が侵食傾向である場合に成立する考え方である。今後、堆積傾向に転じ、仮に平成15年度の地形まで堆積したとすると、平均断面を対象に施工すると約3.0m、侵食断面まで考えて施工面を設定すると4.8mもの床堀が発生する。砕波帯内で掘削する床堀として、現実的ではない。

このように、単純な平均断面や侵食断面を対象に、設計外力や施工面を設定する手法では、侵食・堆積を繰り返す変動の大きな海岸に対しては、現状の海浜が平均断面に対して堆積した状態か侵食した状態かによって、設計・施工の対象とする面を変更する必要があり、考え方に不合理が生じる。

4. 海浜変動量に着目した算出方法

(1) 平均地盤線と海浜変動量による算定方法

高知海岸の場合、空間的、時間的な海浜変動量が大きく、変化する断面形状の重ね合わせによる手法では、波高の過小評価、盛土の発生など、設計、施工上の不合理が生じる。これを解消するために、突堤設計地点の断面形状を対象に、平均地盤高に対して海浜変動量を考慮して施工基盤面の設定を試みた。海浜変動量は、突堤設計地点における平成6年度から平成21年度の最深値と最浅値との差とした。

その結果を図-8に示す。海浜の変動量は4.8mと大きく、これを平均地盤高T.P. -6.4mに加えた仮想施工基盤面は、T.P. -11.2mとなった。現在の地盤高はT.P. -7.9mであり、床堀深は3.3mにも及ぶ。

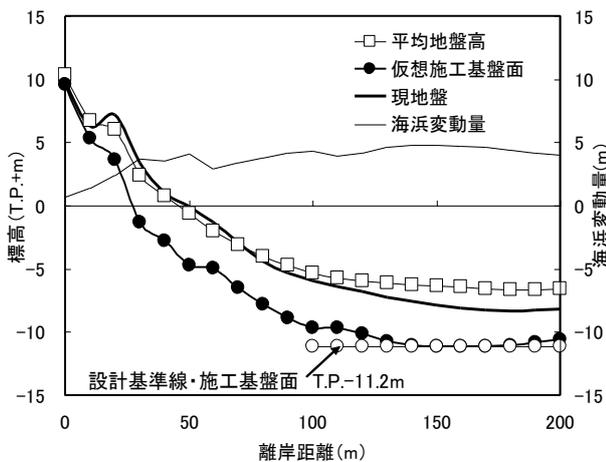


図-8 海浜変動量による仮想施工基盤面の設定

戸原4号突堤の離岸距離150m地点の最深値と最浅値の差が4.8mにもおよぶ主たる要因は、平成16年度

と17年度に来襲した大型台風であると考えられる。

平成16年度の台風上陸数は、日本全体で19個と昭和31年度、41年度に並ぶ歴代最多記録である。また、平成17年度に来襲した台風は、高知海岸の観測が開始された平成6年度以降、最大規模であった。2年連続して来襲した大型台風により、離岸距離180～330m付近の沿岸砂州は急激に発達した。

ここで、平成16年度、17年度の大型台風を異常気象とみなし、データ集団から除外して、設計水深および施工基盤面を設定することも考えられる。しかし、異常気象による海浜変動量を分離することが困難なこと、データ集団から使用するべきデータを区分する際に、任意性が介在することになり、手法としては適切でないと考えられる。

(2) 正規分布を仮定した標準偏差による算出

単純な重ね合わせによる方法を改善すべく、標準偏差を取り入れ、改善を図った。ここでは、データを正規分布と仮定し、分布の約96%を含む、 2σ の範囲を対象として検討を行い、仮想施工基盤面、設計基準線の設定を試みた。その結果を図-9に示す。海浜変動量は2.9mと算出され、平均地盤高に加えると、仮想施工基盤面は、T.P. -9.3mとなった。現在の海底地盤高がT.P. -7.9mであり、床堀は1.4mである。基準による単純な方法で算出した床堀に比べ、およそ1.5mから3.0m程低減できた。また、5波高沖までの範囲を対象として算定した設計基準線はT.P. -9.9mと算定された。

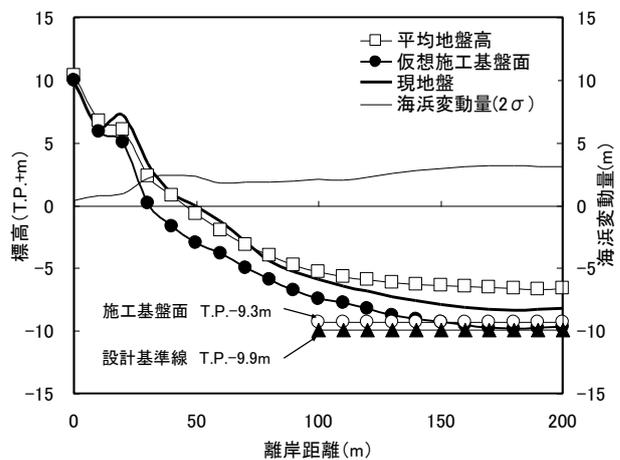


図-9 標準偏差による仮想施工基盤面の設定

5. 正規分布に補正した標準偏差による算出

(1) 海浜地形の分布形

戸原4号突堤の離岸距離150m地点における海底地盤高を、ヒストグラムで表したものが図-10である。この地点での平均水深はT.P. -6.4mであるが、正規分布とは著しく異なり、分布がT.P. -7～-8mに偏っていることが分かる。このような分布に偏りがあるデータ集団を対象に、標準偏差を算出すると大きく

算出され、平均値も分布のピークとは一致しない。
正規分布と異なったデータの分布形状の場合でも適切な補正を加え、全データを用いて適切に算出する手法を模索した。

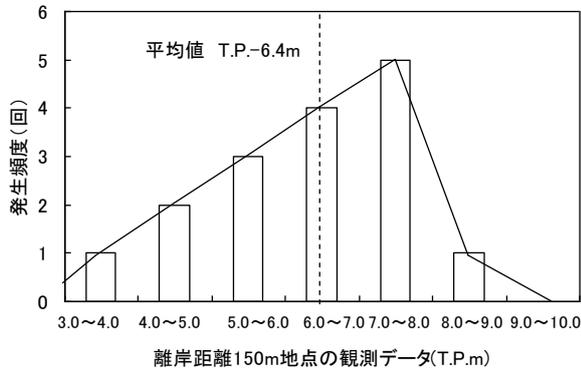


図-10 離岸距離150m地点での海底地形の分布

(2) Box-Cox変換

偏差が大きく、分布が偏っているデータでも、対数変換することにより、周辺分布を正規分布に近い形状に組み替えることができる手法がいくつか存在する。ここでは、Box-Cox変換による変換を用いた。Box-Cox変換は、対数変換を含むデータ変換であり、 Y_n を源データ、変換されたデータを Z_n とすると変換式は式(1)で表される。ここで使用されている、 λ はデータ集団に適したパラメータであり、Box-Cox変換は定数を見捨てると $\lambda=0$ のときには対数、 $\lambda=-1$ のときには逆数、 $\lambda=0.5$ のときは平方根をとる変換となり、さらに $\lambda=1.0$ のときは、実測値と一致する。

$$Z_n = \begin{cases} \lambda^{-1}(Y_n^\lambda - 1), & \lambda \neq 0 \\ \log Y_n & \lambda = 0 \end{cases} \quad (1)$$

λ ; データに適した変換パラメータ
 Z_n ; Box-Cox変換によって得られたデータ
 Y_n ; Box-Cox変換前のデータ

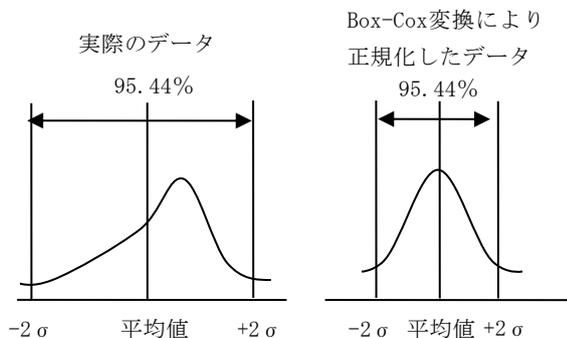


図-11 Box-Cox 変換イメージ図

分布に偏りがあるデータ集団に着目し、補正することができるBox-Cox変換を用いて、平均海浜断面に、変動量を組み合わせ、仮想施工基盤面の設定を行った。なお、海浜変動量は、正規分布を仮定した場合と同様にデータのばらつきを考慮し、 2σ とした。

海岸堤防から150m地点について平成6年度から平成21年度のデータを用いて、Box-Cox変換を使用して計算した結果、平均地盤高はT.P. -5.6m、海浜変動量は3.2mとなり、仮想施工基盤面はT.P. -8.8mと算定された。表-2に戸原4号突堤150m地点を対象に各手法により算出した、平均地盤高、海浜変動量、仮想施工基盤面、床堀量を示す。技術上の基準による方法および分布に偏りのあるデータでは、海浜変動量が大きく設定されたが、Box-Cox変換を用いてデータ集団を正規化したことにより、分布の偏りが補正され、適切な仮想施工基盤面、設計基準線を設定することができた。なお、戸原4号突堤では、最深包絡線と仮想施工基盤面を比較した結果、仮想施工基盤面の方が深いため、設計基準線も同値のT.P. -8.8mを採用している。

表-2 手法ごとによる算定諸元の比較
(戸原4号突堤150m地点)

	技術上の基準 ²⁾	海浜変動量 勘案手法	
		補正なし	Box-Cox
現地盤高	T.P. -7.9m	T.P. -7.9m	T.P. -7.9m
平均地盤高	T.P. -5.8 m	T.P. -6.4 m	T.P. -5.6m
海浜変動量	4.8m (最浅値-最深値)	2.9m (2σ)	3.2m (2σ)
仮想施工基盤	T.P. -5.8 m (平均断面)	T.P. -9.9m	T.P. -8.8m
設計基準	T.P. -9.2 m (最深値)	T.P. -9.9m	T.P. -8.8m
床堀量	-1.36m (盛土)	1.4m (床堀)	0.9m (床堀)

6. 結果

Box-Cox変換による海浜地形解析を用いて、長浜1号突堤から新居7号突堤の7つの突堤に対して150m地点の仮想施工基盤面および設計基準線を算出した。その結果を表-3(a)~(e)に示す。

7つの突堤で、補正しない仮想施工基盤面と、Box-Cox変換を用いて補正した仮想施工基盤面との差が最も大きかったのは、戸原4号突堤の0.46mである。これは、戸原4号突堤のデータ集団のばらつきが正規分布と著しく異なるためである。

離岸距離150m地点の最深値と最浅値の差が、最も大きいのは、戸原6号突堤の5.04mである。しかし、戸原6号突堤のデータ集団は、正規分布に近いデータ集団であり、補正した値と補正しない値との差は、

戸原4号突堤より小さく0.3mであった。

新居7号突堤は、最深値と最浅値の差が2.53m、海浜変動量1.66mであるが、補正した値と補正しない値との差は、0.03mであった。データ集団の分布形状が正規分布に近い場合は、Box-Cox変換による補正を行う必要は無く、平均地盤高に海浜変動量を見込んだ仮想施工基盤面の設定方法で問題は無い。

このように、高知海岸のように、地形データの分布に偏りがあり、Box-Cox変換によるデータ補正を行うことにより、経済的に無駄のない設計・施工が可能であると言える。

表-3(a)各手法による平均地盤高の比較

	技術上の基準 ²⁾ (T.P.m)	平均地盤高 (T.P.m)	
		補正なし	Box-Cox
長浜1号	-5.78	-5.78	-5.17
長浜2号		-6.28	-5.93
長浜3号		-6.56	-6.48
戸原4号		-6.37	-5.58
戸原5号		-5.00	-4.28
戸原6号		-5.18	-4.53
新居7号		-5.34	-5.30

表-3(b)各手法による海浜変動量の比較

	技術上の基準 ²⁾	海浜変動量 (2σ) (m)	
		補正なし	Box-Cox
長浜1号	4.8m (最浅-最深)	2.54	2.86
長浜2号		2.30	2.44
長浜3号		1.39	1.42
戸原4号		2.86	3.21
戸原5号		2.32	2.65
戸原6号		2.89	3.23
新居7号		1.66	1.67

表-3(c)各手法による仮想施工基盤面の比較

	技術上の基準 ²⁾ (T.P.m)	仮想施工基盤面 (T.P.m)	
		補正なし	Box-Cox
長浜1号	-5.78	-8.32	-8.03
長浜2号		-8.58	-8.36
長浜3号		-7.95	-7.90
戸原4号		-9.33	-8.77
戸原5号		-7.32	-6.93
戸原6号		-8.06	-7.76
新居7号		-7.00	-6.97

表-3(d)各手法による設計基準線の比較

	技術上の基準 ²⁾ (T.P.m)	設計基準線 (T.P.m)	
		補正なし	Box-Cox
長浜1号	-9.22	-8.56	-8.12
長浜2号		-8.96	-8.57
長浜3号		-9.38	-8.60
戸原4号		-9.90	-8.77
戸原5号		-7.90	-7.42
戸原6号		-9.16	-8.51
新居7号		-7.79	-7.57

表-3(e)各手法による床堀 (-) 盛土 (+) 高の比較

	技術上の基準 ²⁾ (m)	床堀盛土高 (m)	
		補正なし	Box-Cox
長浜1号	+1.76	-0.78	-0.49
長浜2号		-0.77	-0.55
長浜3号		-0.79	-0.74
戸原4号		-1.36	-0.90
戸原5号		-0.99	-0.60
戸原6号		-1.77	-1.47
新居7号		-0.74	-0.71

6. 考察

砕波帯内に位置し、沿岸砂州の変動の影響を強く受ける海岸では、海浜変動が大きく、その分布に偏りがある場合がある。このような場所では、技術上の基準等に準拠した単純平均をもとにした算出方法では、海岸の特性を反映した、合理的な設計は困難であった。

本研究では、次の成果があった。

(1) 設計基準線と施工基盤面の分離

設計の対象とする水深と、施工の対象とすべき海底面を分離して扱うことで、安全側の設計ができるようにした。また、施工基盤面を設定することにより、設計の考え方とは別に、施工の対象とすべき海底面を独自に設定することができるようにした。

(2) Box-Cox変換によるデータの偏りの補正

海浜の特性を反映して、海浜変動量や標準偏差に着目することで、適切に設計、施工の対象とすべき標高(水深)を算定しようとしたものである。特に、分布形状に偏りがある場合についても、統計解析手法の一つであるBox-Cox変換を用いることにより、合理的に設計基準線、施工基盤面を設定することができた。

謝辞：本研究をとりまとめるにあたり、国土交通省四国地方整備局高知河川国道事務所のご担当者より数々のご指導を頂いた。ここに記して深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 森本精郎・久藤勝明・矢野慎二・鷺田正樹・赤川嘉幸：直轄高知海岸の土砂動態解析と土砂管理計画，海岸工学論文集 第53巻，pp.516-520，2006。
- 2) 土木学会：海岸保全施設技術研究会：海岸保全施設の技術上の基準・同解説。
- 3) 土木学会：海岸施設設計便覧，pp.424-425，2000。
- 4) 橋本宏・野田英明：漂砂と海岸保全施設，社団法人土木学会，1981。
- 5) Box, G.E.P. and Cox, D.R. An Analysis of Transformations. Journal of the Royal Statistics Society, B-26, 211 - 252, 1964.

第 2 次査読における指摘事項の対応（第 3 次投稿時に添付）
【論文 ID: C110】

査読者	指摘事項	筆者の対応
査読者1	<ul style="list-style-type: none"> ・参考文献と本文の対応を明らかにしてください。 ・図題, 表題は見出し(表-1, 図-1)はゴシック体9pt ですが, それ以外は和文の場合明朝体9ptです. 修正してください. ・第2 レベルの見出しはゴシック体10pt です. 修正してください. ・数式は10pt で表示されるよう努めてください. ・本文中(p.4)にゴシック体となっている箇所があります. 修正してください. 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 番号を論文中に振って対応 ・ 明朝体 9pt に修正 ・ 修正 ・ サイズを変更し努めた ・ 「海浜の」修正
査読者2	<ul style="list-style-type: none"> ・ 図のタイトルの書体が明朝体になっていないのが散見されます ・ 各章の前後の空行が無い箇所が散見されます ・ BOX-COX 変換の参考文献が記載してください ・ 指摘事項の査読者2に対する対応の表—4がありません 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 修正 ・ 空行挿入 ・ Box, G.E.P. and Cox, D.R. An Analysis of Transformations. Journal of the Royal Statistics Society, B-26, 211 – 252, 1964. ・ 表-4 は誤りで, 表-3 (a) ~ (e) が該当します.
査読者3	<p>図面の修正があるため, 「B. 条件付掲載可」としました.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 頁右段 図-1 と文章の間を1 行空けてください. 2 頁左段 図-2 を明瞭な図面へ変更ください. 単位を記入ください. 2 頁右段 図-3 を明瞭な図面へ変更ください. 単位を記入ください. 2 頁右段 図-4 を明瞭な図面へ変更ください. 単位を記入ください. 2 頁右段 図-5 と文章の間を1 行空けてください. 4 頁左段18~20 行目 「、」, 「。」を「, 」, 「. 」へ変更ください. 4 頁左段下から4 行目 「海浜の」のフォントを確認ください. 4 頁左段下から1 行目 「3, 27」を修正ください. 5 頁左段 式(1)の書式を確認ください. 5 頁左段 図-11 を明瞭な図面へ変更ください. 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 空行挿入 ・ 図面変更, 単位 (m) 記入 ・ 図面変更, 単位 (m) 記入 ・ 図面変更, 単位 (m) 記入 ・ 空行挿入 ・ 「, 」, 「. 」へ変更 ・ 明朝体に変更 ・ 3. 27 へ修正 ・ サイズ変更 ・ 図面変更