

ジャケット式護岸の開発

Development of Jacket Trestle Structure

太田 英美^{*(1)} 小松 章^{*(2)} 川本 正規^{*(2)}
Hidemi Ohta Akira Komatsu Masaki Kawamoto

抄 録

鋼管トラス構造と杭基礎の一体構造であるジャケット構造は、杭構造物の一般的な特性に加え、特に水平力に対し合理的に杭の耐力を発揮でき、大水深構造物として優れた構造特性を有している。又、ジャケットがプレファブ加工されるため、厳しい波浪環境での建設が可能である施工特性を有している。これらの特性を生かして新日本製鐵ではジャケット式護岸の開発を進め、東京湾横断道路川崎人工島で初めて採用された。その開発の経緯を示し、東京湾横断道路川崎人工島への適用について、計画、設計並びに施工技術の面から述べた。

Abstract

The jacket structure in which the steel pipe truss structure is integral with the pile foundation exhibits a high proof strength in a rational manner with respect to horizontal force in addition to the general characteristics of pile structure. Accordingly, this structure has excellent structural characteristics as a structure to be constructed at greater depths of the water. As jackets are prefabricated, this structure can be built even under such site conditions where waves are very severe. Nippon Steel Corporation has developed a jacket trestle structure through the maximum use of these characteristics. This structure has found its first application to the Kawasaki Man-made Island which is now under construction as part of the Trans-Tokyo Bay Highway. The background of the development of this structure, and the planning, design and application of this structure to the Kawasaki Man-made Island are described.

1. 緒 言

海底石油生産プラットフォームとして発展してきたジャケット構造物が、海洋構造物として極めて優れた構造特性と施工特性を有することに着目し、一般港湾構造物への適用拡大を計るべく、ジャケット式護岸構造を開発した。

本報は、東京湾横断道路川崎人工島への適用事例を中心に、ジャケット式護岸の概念を紹介する。

2. ジャケット式護岸の開発

2.1 ジャケット構造の概要

2.1.1 概要

ジャケット構造は鋼管で製作された平面又は立体トラス構造を据付け、その脚柱内(レグと称す)に鋼管杭を打込んで海底地盤に固定し、杭とレグを溶接及びセメントグラウト等により一体化させて外力に抵抗する構造型式である。

ジャケット構造は1930年ごろより米国で海洋石油掘削プラットフォームとして使用され始め、現在では世界各地に多数建設されている。国内でも1970年から日本道路公団大島大橋多柱基礎棧台として本格的に使用され、以来海洋石油掘削プラットフォーム、シーバー、棧台等として数多く建設されている。

2.1.2 特徴

ジャケット構造は水深が深く、水平外力が大きい場合に有利な構造形式である。

ジャケットの構造的な特徴としては、水中部がトラス構造で剛性が高いため杭に生じる曲げモーメント及び変位を減じることができ、水平力に対して合理的な杭設計ができる。更に、杭により支持されるため、地盤沈下の影響がない。又、もう一つの大きな特徴は、加工ヤードで立体トラス構造物として完成されたものを現地へ輸送して据付けるため、海洋の苛酷な条件下でも短時間で建設が可能であり、極めて施工性に優れていることである。

2.2 護岸への適用

2.2.1 概要

我が国は四面を海に囲まれており、社会、経済の発展のためには新しい海洋空間の創出が必至であり、エネルギー基地や海上空港等の沖合人工島構想が数多く打ち出されている。埋立や人工島の外周を構成する鋼製の護岸形式としては、鋼矢板、鋼管矢板を用いた矢板式やセル式等があるが、いずれも水深が大きく、波浪の厳しい海域では構造的にも施工的にも適用が難しい。これに対して、ジャケット構造を大水深、高波浪海域対象の護岸構造に適應させる概念を創出し、その設計技術並びに据え付け施工技術を開発したものである。

*⁽¹⁾ 鉄構海洋事業部 海洋エンジニアリング部 室長

*⁽²⁾ 鉄構海洋事業部 海洋エンジニアリング部 部長代理

2.2.2 設計法の開発

石油プラットフォームとして使われて来た従来のジャケット構造を護岸に適用するには、以下の課題を克服する必要がある。

- (1)従来のジャケットの荷重（波力、地震力等）と形態が全く異なる盛土による土圧、残留水圧の作用形態の解明
 - (2)土留壁、ジャケット、杭、地盤で構成される護岸構造の支持力機構の解明
 - (3)盛土を含めた複合構造としての設計体系の確立と設計基準の確立
- 本報では設計体系の詳述はしないが、従来のジャケットの設計との相異を示す一例として杭の横抵抗を取り上げる。

ジャケット本体に作用する水平力は、最終的に杭の横抵抗によって支持されるが、護岸ジャケットの場合、土留壁を介した土圧の作用によって地盤が塑性化していることを考慮しなければならない（図1参照）。

護岸としてのジャケットは、東京湾横断道路川崎人工島に初めて

採用され、新日本製鐵は、実施設計、製作及び現地施工を担当した。川崎人工島護岸への適用事例を通して、具体的にジャケット式護岸の設計、施工法を説明する。

3. 東京湾横断道路川崎人工島への適用

3.1 全体概要

3.1.1 東京湾横断道路プロジェクトの概要

東京湾横断道路は、東京湾中央部を横断し、川崎市と木更津市を結ぶ全長15kmの有料道路で、船舶航行の多い川崎側10kmはシールド工法による海底トンネル、比較的船舶航行の少ない木更津側5kmは橋梁となる。トンネルの中央部には川崎人工島、トンネルと橋梁の接続部には木更津人工島がつくられる。又、海底トンネルの両端の浮島と木更津人工島には、トンネルが海底から地上にアプローチするための斜路部が設けられる（図2参照）。

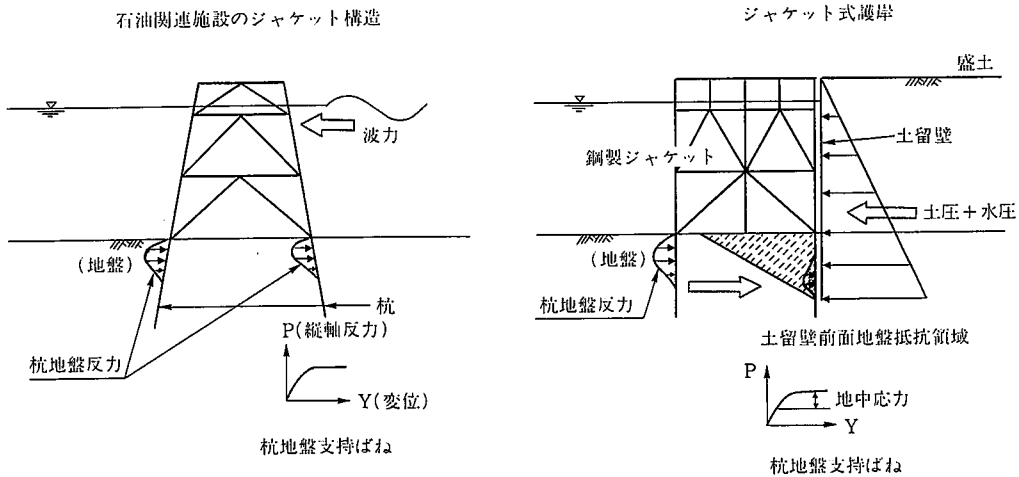


図1 ジャケット構造とジャケット式護岸の荷重と抵抗機構概念図

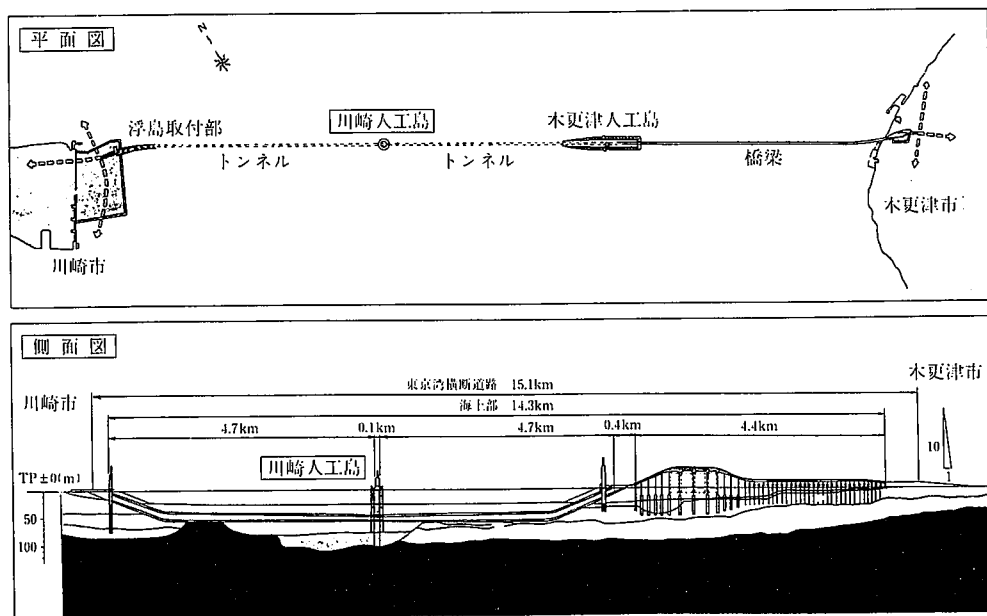


図2 東京湾横断道路の一般図

3.1.2 川崎人工島の構造概要

川崎人工島は、トンネル施工時にはシールド4基の発進基地、完成時には換気立坑の機能を果たし、直径193m、底版厚6m、側壁厚4m、底版レベル海底面下4m、換気塔の高さ海面上40mに達するコンクリート構造の人工島である。人工島の建設地点は水深が28mもあり、しかも海底地盤は約25mの軟弱軟土層を有しており、又、一般航行船舶のさくそうする海域である。

3.2 川崎人工島築島方法の検討

3.2.1 川崎人工島の計画要件

計画にあたって、以下の三つの要件を満たす必要があった。

- (1)トンネル発進基地となるため、有害な沈下があってはならない。
- (2)横断道路全体工期が逼迫しており、人工島は2年程度で完成させなければならない。
- (3)航行船舶への影響を考慮し、出来るだけ占有面積を小さくする事。

3.2.2 築島方法（土留護岸形式）の選定

上記の要件を満たす土留護岸形式として、次の長所を有するジャケット式護岸が適用された。

- (1)杭基礎により支持されるため、護岸自体による地盤沈下がない。
- (2)大水深での直立護岸が成立可能である。
- (3)急速施工が可能となる。
- (4)据付け時に波浪の影響があっても精度良く据付けが可能である。

3.2.3 築島形式の選定

ジャケット式護岸を用いた人工島築島形式として、表1に示すように全面築島案と部分築島案の2ケースが比較検討された。部分築島案は、最小限必要な盛土を外側・内側ジャケットで支持する築島形式であり、基礎地盤への負荷を最小限にできる。両案を比較した結果、より工期、工費等で有利な部分築島案が採用された。

3.3 川崎人工島ジャケット式護岸の設計

護岸構造の概要図を図3に示す。

3.3.1 設計条件

(1)自然条件

- (i)水深：水深は28mである。
- (ii)土質：海底面から約25mはN値が0の沖積軟弱粘性土、その

下約35mはN値10~70の洪積砂質土の互層である。TP-約90m以深はN値70以上の極めて密に締まった砂層で、設計基盤と考えられる。なお、TP-112m及び-130m付近に粘性土層が存在し、不透水層を形成している。

(iii)波浪：波浪条件を表2に示す。

(iv)地震：設計水平震度は、施工中0.12、完成後0.24である。

(2)荷重条件

以下の荷重を考慮する。

(i)上載荷重（施工中）：分布荷重として、

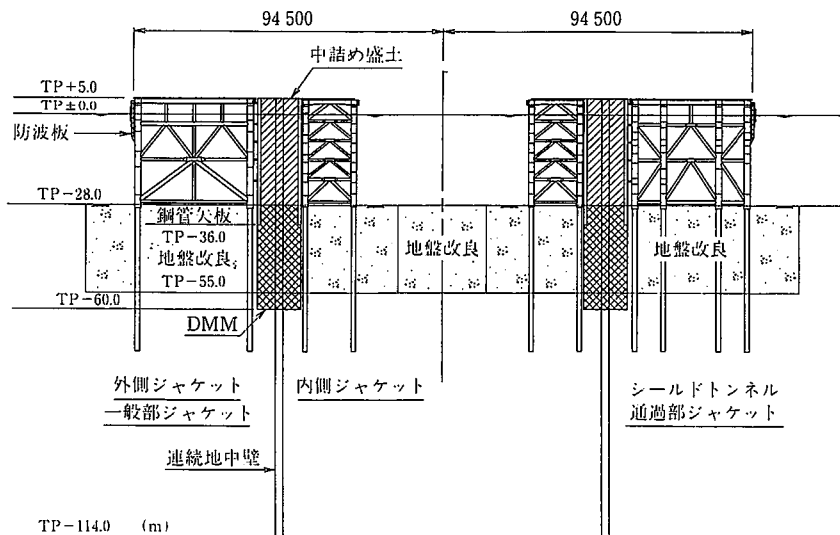
常時、波浪時：5.0tf/m²

地震時：2.5tf/m²

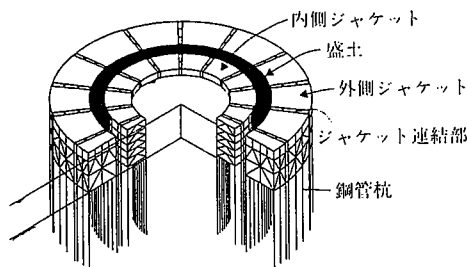
(ii)波浪荷重：円筒体に作用する重複波力として、ポテンシャル理論の円周方向分布を踏まえた合田式による波力を適用した。なお、防波板の透過率は、水理実験を踏まえ、Wiegelの式によった。又、揚圧力は水理実験に基づき算定した。

表1 築島形式の比較

	全面築島案	部分築島案
構造概要図		
構造特性	<ul style="list-style-type: none"> (a)ジャケット式護岸で囲まれた砂盛土築島 (b)盛土・地盤改良規模がより大きい (c)波浪に対する安定性はより高い 	<ul style="list-style-type: none"> (a)外側、内側のジャケット式護岸を用いて連壁施工に必要な範囲のみを部分的に築島する (b)盛土・地盤改良規模がより小さい (c)波浪により変形するか、連壁施工に有害な影響は与えない (d)護岸全体に作用する地盤力が小さく、合理的設計かできる



(a) 立面図



(b) ジャケット式護岸構造概念図

図3 ジャケット式護岸構造

表 2 波浪条件

	施 工 中		完 成 後
	常 時	波 浪 時	波 浪 時
波 高 $H_{1/3}$ (m)	1.2	3.5	4.3
最大波高 H_{max} (m)	2.2	6.3	7.7
周 期 (s)	4.0	6.1	6.7
基本風速 (m/s)	20	38	45

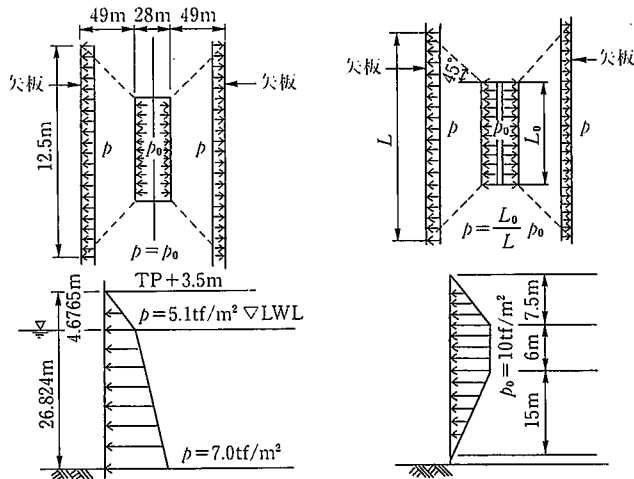


図 4 (a) 泥水圧分布

図 4 (b) コンクリート打設圧分布

(iii)泥水圧：図 4(a)

(iv)コンクリート打設圧：図 4(b)

(v)地震時動水圧：円筒シェルに作用する動水圧分布としてポテンシャル理論(FEM)により算定し、円周方向 $\cos\phi$ 分布とする。

(vi)船舶衝突荷重：5000GT 船首衝突並びに2000GT 斜め船尾衝突荷重を考慮。

(vii)疲労設計耐用年数：40年

3.3.2 構造計画

本ジャケット式護岸は、外側、内側ジャケット式護岸、地盤改良並びに、中詰め盛土が主要構造要素となる。

(1)ジャケット式護岸

ジャケット式護岸は、図 3 に示したように内外二つの円形構造からなり、以後の地中連続壁構築のための盛土用護岸となる。盛土高は海底面上33mであり、13階建ビルに相当する大規模なものである。又、この護岸は設備用・作業用栈台、防波施設の役目を果たすと共に、完成後には大型船舶衝突時の緩衝工となる。

ジャケット式護岸は、内側、外側それぞれ14基のジャケットで構成され、円周方向の上部ボックス桁を現場連結することにより、円周方向に連結された一体構造として外力に抵抗する。ジャケットは、高さ33m、幅15m(内側ジャケット)及び35メートル(外側ジャケット)であり、レグが直径約1900mm、ブレースが同約600mmの鋼管を主体とする立体トラス構造である。鋼管杭は、同1600mmの(内側ジャケット)、1800mm(外側ジャケット)であり、計232本でジャケットを支持する。ジャケットの一基あたり重量は、内側ジャケット800t、外側ジャケット1600~2400tである。

ジャケットの盛土側に5段の腹起しが設けられ、それに沿って土留め用の鋼管矢板(直径1016mm)が打設される。又、外側ジャケットの

海側には深さ7mのコンクリート製の防波版が設けられる。

(2)地盤改良

(i)改良目的

地盤改良は、サンドコンパクション(SCP)及び深層混合処理(DMM)により行った。SCPはジャケットを支持する鋼管杭の横抵抗の確保、中詰め盛土下部のDMMは地中連続壁施工時の溝壁の安定、トンネル部のDMMはシールドの鏡開き部の切羽の安定性の確保を計るものである。

(ii)改良概要

SCPの改良率は、杭部78.5%、人工島中央部30.1%である。又、DMMの改良仕様は、盛土部 q_u (平均) = 17.5kgf/cm²、トンネル部 q_u (平均) = 10kgf/cm²である。

(3)中詰め盛土の設計

中詰め盛土の機能は、連壁掘削のために自硬性盛土を形成することである。盛土材としては経済性及び連壁掘削時の施工性等から、山砂に少量のセメント及び粘土成分を加えたものとなっている。盛土強度の必要一軸圧縮強度は8.4kgf/cm²である。

3.3.3 設計手法

ジャケット式護岸の盛土等からの外力に対する抵抗機構の概念図を図5に示す。現場連結桁は、隣接するジャケットのせん断力並びにフープ力を伝えるもので、ジャケット本体にとって重要な構造である。その構造を図6に示す。現場連結桁には大きな断面力が作用し、その断面力はレグを介して上部桁、ジャケットに伝達される。このため、レグの外周に補強構造を設けると共に、レグ上端に蓋板が現場溶接される。

連結された円形のジャケット式護岸の解析は次のように行われる。まず計算の省力化のために、図7に示すように約250節点のジャケット単体の詳細モデルを約20節点の等価簡易梁モデルに置き換える。

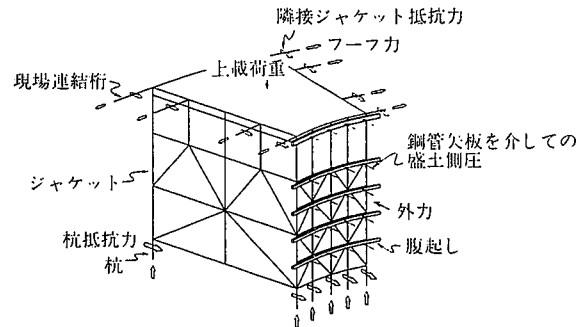


図 5 ジャケット式護岸の抵抗機構

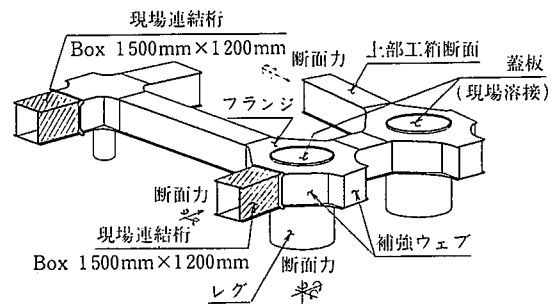


図 6 上部工現場連結構造

次に、簡易梁モデルを連結した全円のモデルを解析し、現場連結桁の発生断面力を求める。最後に、詳細モデルに境界力を加えることにより行われた。

3.4 施工

3.4.1 加工

(1)鋼材

ジャケット式護岸に使用された鋼材は、波による衝撃力と繰返し荷重及び人工島施工時の側圧を受けるため、この要求される品質も厳しいものとなり、多くの実績をもつ石油掘削プラットフォームと同様のものが選定され、使用された。

特に、鋼管格点部の継手部は溶接時強い拘束力が発生し、かつ板厚方向に応力が発生するため耐ラメラティア鋼 (WZ25) が使用された。又、ジャケット設置後のジャケット連結桁の現場溶接は、厳冬の洋上施工となるため、TMCP 鋼の内でも更に溶接割れ感受性が低い、新日本製鉄開発の Super Crack Free 鋼が適用された。その成分の一例を表 3 に示す。これにより、高品質の確保と溶接能率向上による工期短縮が可能となった。

(2)加工

鋼製護岸を構成する28基のジャケットの内14基が新日本製鉄若松鉄構海洋センターで加工された。加工の特徴は、ヤードでの高所作業を軽減するため、予め低所でブロック加工を行い、大型重機(650t クレーン)で一括組込む工法を採用した事である (図 8 参照)。

(3)出荷、輸送

輸送は、12000t 積み台船で 6 回に分けて行った。台船へ積込は、内側ジャケット (800t) は新日本製鉄の2000t 吊り全施回クレーン“第 1 くろしお号”で吊上げ出荷され、外側ジャケット (1500-2200t)

はウィンチと滑車を利用し、スキッド架台上を滑動させて台船に積込んだ。

3.4.2 施工

このジャケット式護岸は従来の施工と比べ次に示す特徴があり、高精度にジャケットを据付ける必要がある。

(1)外側、内側それぞれ14基のジャケットを連結し、円形に閉合させてリング効果を発揮させるため、水平方向誤差を10cm 以内におさえる必要がある。

(2)ジャケット背面に沿って土留用鋼管矢板を打設して高い止水性を確保するため、高い鉛直度1/500以内とする必要がある。

このため、以下のような三つの施工法を開発した。

(1)仮受け杭方式

従来のマッドマット方式では据付け精度が確保できないため、あらかじめ所定の高さに打設した受け杭の上にジャケットを据付ける方式を採用した。

(2)据付けガイド

水平方向の据付け精度を確保するため、既設ジャケットを利用

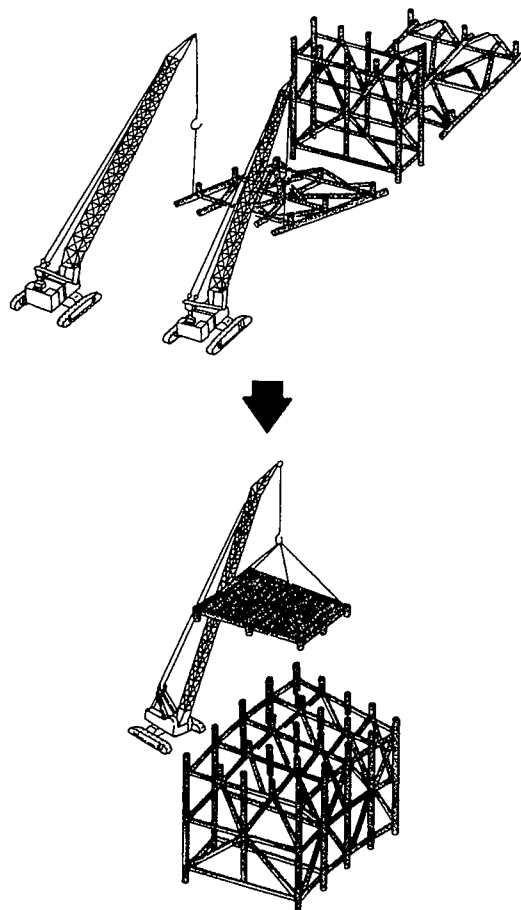
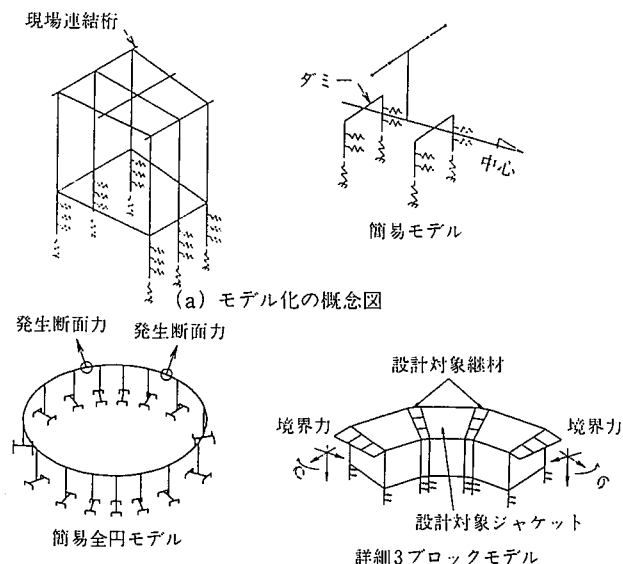


図 8 ブロック加工法の概要図



(b) 立体解析の概念図

図 7 リング状ジャケットの解析手法

表 3 目標成分

(Wt%)

板厚 t (mm)	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Mo	Nb	V	Ti	B	P _{cm}
t ≤ 38	0.04	0.25	1.30	≤ 0.015	≤ 0.002	0.025	0.23	0.20	0.025	0.035	0.011	≤ 3ppm	0.14
38 < t	0.06	0.25	1.30	≤ 0.015	≤ 0.002	0.025	0.23	0.20	0.025	0.035	0.011	≤ 3ppm	0.15

$$P_{cm} = C + Mn/20 + Si/30 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$$

して据付け位置を決められる据付けガイドを開発した（図9参照）。

(3)三次元リアルタイム測量システム

沖合で海象条件が厳しい場合に短時間で高精度な据付けを可能にするため、据付け作業、精度をリアルタイムで把握できるシステムを開発した。本システムは、光波測距儀のデータをパーソナルコンピュータを通して無線でクレーン船の制御室に送り、リアルタイムに三次元の据付け誤差情報を表示させるものである。

4. 結 言

東京湾横断道路川崎人工島への適用によって、ジャケット式護岸の設計・施工法は確立した。今後、従来の護岸構造では建設の難しい、大水深や高波浪海域での利用が期待される。

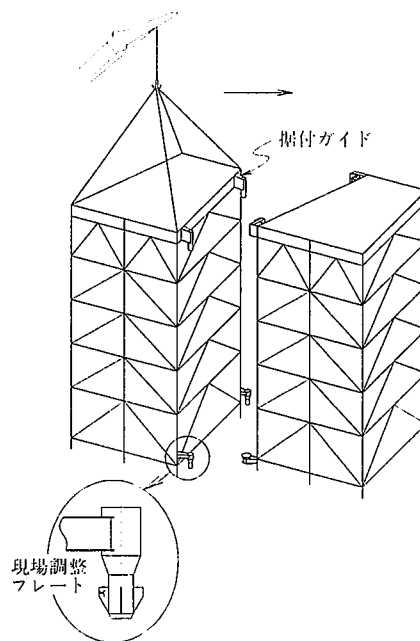


図 9 据付けガイド概要図