

1 はじめに

島根県隠岐諸島の知夫里島^{ちぶり}住民の長年の願いであった多沢地区臨港道路^{たたく}が完成し、本年4月23日に開通式が挙行されました（写真1、道路の概要は5頁の表3）。



この道路は、用地事情等から漁港の港口を横切る海上ルートとなったため、港口部分は汐見橋と命名された橋梁形式の道路として漁港機能の維持を図りました。そして橋梁の基礎は、コスト削減と併せて漁港の海水交換を促進する構造であって、道路建設で喪失する藻場の代替藻場が形成されるように配慮した設計とすべく、漁港事業では本邦初の「多柱式杭基礎捨石併用方式」の橋脚が採用されました。

当センターは、事業主体の島根県からこの橋梁の基礎構造の選定を含めた設計を受託するとともに、橋梁工事の施工管理業務を受託しましたので、以下に汐見橋の設計経過と施工管理の留意点等について紹介します。

2. 臨港道路建設の経緯

島根県の知夫里島は、図1のように隠岐諸島の最南端の島であり、島の産業活動は、知夫漁港の本港がある「郡・大江地区」を中心に、知夫漁港の分区がある「仁夫里地区」と「多沢地区」によって構成されています。

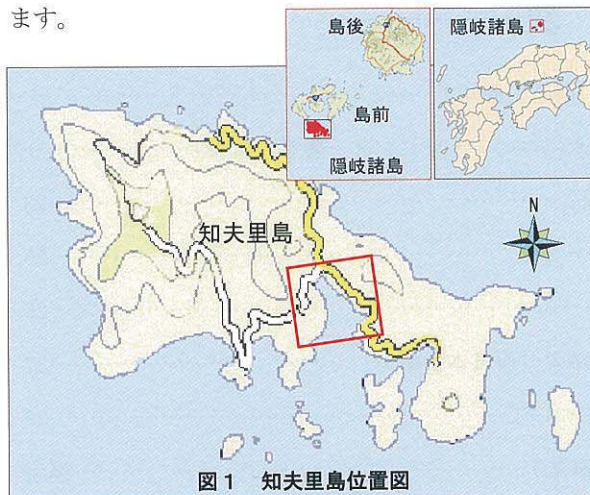


図1 知夫里島位置図

このうち多沢地区^{たたく}と本港のある郡・大江地区を結ぶ道路（県道知夫島線）は、極めて狭隘で蛇行しており、大型車両が円滑に通行できないため、島の産業活動を妨げるとともに、知夫漁港の総合的一体的な活動を妨げる一因にもなっていました。このため地元住民は勿論、漁業者にとっても道路の拡張整備が長年の懸案事項でした。

3. 臨港道路のルート選定

道路の拡張整備の長年の障害になっていたのが用地問題でした。写真2のように急傾斜が海に落ち込んでいる地形で海岸線沿いの猫の額のような狭い場所に民家と細い道路があるため、以前から計画されていた既存道路の拡張整備計画は代替用地がないため前を進みませんでした。

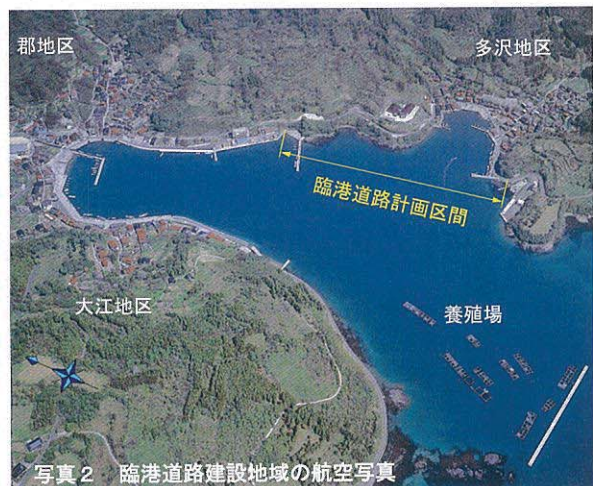


写真2 臨港道路建設地域の航空写真

このような状況を打破したのが島根県漁港課の新しい思考による海上ルート案でした。この案の問題点は、知夫漁港多沢地区の港口対策とルートが藻場と重なっていることでした。港口対策は、橋梁を設けることで解決し、喪失する藻場については、代替藻場の造成にも配慮することで円滑に海上ルートは決まりました。

4. 漁港環境への配慮と橋梁の基礎構造形式

1) 多沢地区の現況

多沢地区の漁港は、写真2に示すように自然の入江を利用して整備された漁港であり、小型漁船の根拠地として利用されており、背後に70世帯の人家を抱えています。道路ルート上の海上には、水産生物の生産基盤として重要な藻場が存在し、図2に示すとおり、ホンダワラ類を中心とするガラモ場が海岸線に沿った水深1～3m帯にあり、藻場の周辺はナマコを中心とした漁場が形成されていました。

港内の水質は、水質調査が実施されていないことか

ら具体的な数字は不明ですが、目視では港内水は青くきれいな海水を湛えており、極めて良好な状況でした。港内の海水は、図2に示すように、湾の外側から流入する反時計回りの流れによって維持されており、流れの出口側に養殖場が配置されていることも、水質の保持に役立っていると思われます。

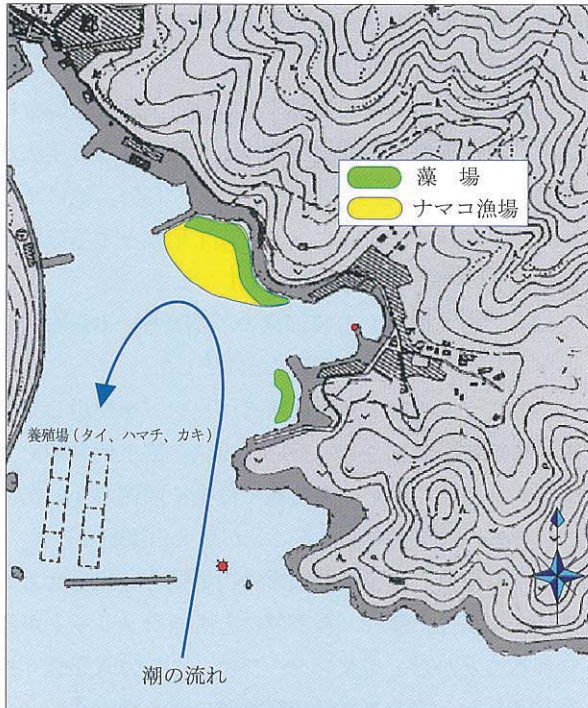


図2 臨港道路計画地周辺の現況

2) 橋梁の基礎構造形式の選定

橋梁の基礎構造形式は、多沢地区漁港内の海水交換を良好に保てることを前提条件としたうえで、①多柱式杭基礎（捨石マウンドなし）、②多柱式杭基礎捨石併用方式、③ケーソン式基礎（設置式）及び④重力式基礎の4形式の構造から選定することとし、現場の状況や地形条件（水深-1m～-11m）、地質構成（岩体露出～軟弱堆積土砂）を勘案のうえ、基礎構造の強度と安定性・施工性・経済性についての評価を行い、その比較検討の結果、次の結論を得ました。

① 多柱式杭基礎（捨石マウンドなし）

支持地盤より基礎杭を立ち上げ、杭体の横抵抗は支持地盤と杭体の剛性で負担する構造形式。

海水交換量は現況にほとんど影響を与えない。基礎構造の強度と安定性を確保する面からは、杭の地盤からの突出長が大きく、杭の変位が大きいので杭体本数が多くなる。このため施工性が低く、経済性も他の方式より劣る。

② 多柱式杭基礎捨石併用方式

杭は支持地盤より立ち上げ、捨石等人工地盤に橋脚の杭体の横抵抗を支持させる構造形式。

静穏時の海水交換は現況より劣るが、波浪があれば海水交換が促進され、代替藻場機能も期待できる。施工性に問題はなく、比較的安価な捨石材を橋脚の構造体の一部に利用するため、経済性は他の形式よりも優れている

③ ケーソン式基礎（設置式）

港口部の数ヶ所にケーソンを配置し、道路工を上部に築造する構造形式。

橋脚が大きくなり海水交換や漁船の航行に制約を与える。基礎構造の強度と安定性では確実性が高いが、大型起重機船が必要になるなど経済面で劣る。

④ 重力式基礎

橋脚部分に重力式護岸を築造し、内部を埋立てる構造形式。

橋脚が大きくなり海水交換や漁船の航行に制約を与える。堤体は無筋であるため施工性は良いが、堤体標高が高くマウンド高さも厚くなるため、経年沈下が発生する。維持管理面に問題を残すうえ、経済性は②よりも劣る。

以上の結果より、②の多柱式杭基礎捨石併用方式の基礎を採用したいとの結論となりました。

3) 橋梁建設による環境への影響

橋梁の基礎構造を多柱式杭基礎捨石併用方式を採用した場合、想定される影響を次のように推定しました。

① 開口部の海水通過断面積の狭小化

捨石マウンドの建設によって漁港の開口部の断面積は、約50%程度小さくなり、底層部の水塊が捨石マウンドで分断される。

② 砂泥の海底に階段状の捨石マウンドが出現

経済的なマウンド断面とするため、-1.0m、-3.5m、-5.5m、-8.5mの水深別に、法面勾配1:2で天端幅25mの階段状の捨石マウンドが造成され、砂泥の海底が岩場になる。

② 日射の変化

橋梁によって多沢地区の湾口部海面への日差しが帯状に遮られる。

4) 環境への配慮

橋梁としての機能を十分に保持するとともに、環境への影響を最小限に抑えた設計とするため、橋梁の設計及び捨石マウンドの設計では、次のような配慮を行いました。

① 港内の水質保全対策

透過堤として機能する捨石マウンドと橋脚杭の横方向の抗体として機能する捨石マウンドの両機能を満足させることが重要なため、次のように設計しました。

i 捨石マウンドの天端高

汐見橋の捨石マウンドの設計は、通常の消波堤の設計と異なり、海水交換機能を維持しながら橋脚杭の横方向の支持力の検討も必要のため、その天端高の設定には十分な検討が必要でした。

設計では、常時の海水交換をスムーズに行える天端レベルとしてL.W.Lより低く設定することとし、透過堤による閉塞面積を極力少なくするため、マウンド幅が広がっても高さが抑えられる構造を採用して、橋脚杭の安定が確保できる最低限の高さとしました。

ii 波エネルギー集中型のマウンド形状

V字型の捨石マウンド構造により、波エネルギーが集中して開口部や天端からの越流、捨石の間隙からの透過量を多くする効果を持たせました。

② 港内の消波対策

最も漁業者が困っている波浪の高さを現地で聞き取り、橋脚杭を剛結する底版の底面高さを+1.0 mに設定し、風波の港内打込み防止効果を副次的に期待する構造としました。

③ 藻場の復元対策（人工藻場として活用）

臨港道路のルート上には、ホンダワラ類などの藻場が多くありましたが、道路建設によって消滅しましたので、これを復元する場として、捨石マウンドを人工の藻場としても活用することとし、コスト削減効果も兼ねて階段状のマウンド形式として、水深帯別に適した藻場が形成されるように配慮しました（図3）。

4. 多柱式杭基礎捨石併用方式の採択経緯

当センターでは、多柱式杭基礎捨石併用方式が最も経済的で強度・安定性にも問題がないと判断しましたが、事例が少なく、漁港整備事業として採択されるまでには色々な検証が必要でした。

汐見橋に採用した橋脚の基礎は、捨石マウンドに橋脚杭の横抵抗を支持させる方式ですが、その着想の基は港湾構造物の栈橋です。

道路関係では、人工地盤（土砂盛土）に杭基礎を打込み、造成地盤に横抵抗を支持させて設計する手法が「道路公団第2東名の設計マニュアル（案）」他に示されていますが、捨石マウンドを人工地盤とする設計手法は、どのマニュアルにもありませんでした。

唯一の施工例は、名四国道の「港新橋」（愛知県名古屋市）という陸上の橋梁でだけでした。

このように橋脚の基礎に捨石マウンドを使用して橋脚の横抵抗を負担させるという方式の施工例が極めて少ないうに、海上の道路橋では全く前例がないため、この方式の採用認可を得ることが最大の課題でした。

しかし、捨石に橋脚の横方向の抵抗を分担させる方式は、施工性に優れ、経済的にも大きなメリットが得られることから、当センターでは、この方式を強く推進しました。そのため学識経験者による検討委員会を設置し、設計指導と設計の妥当性についての検討をしていただき、強度と安定性の理論的裏付けを行いました。

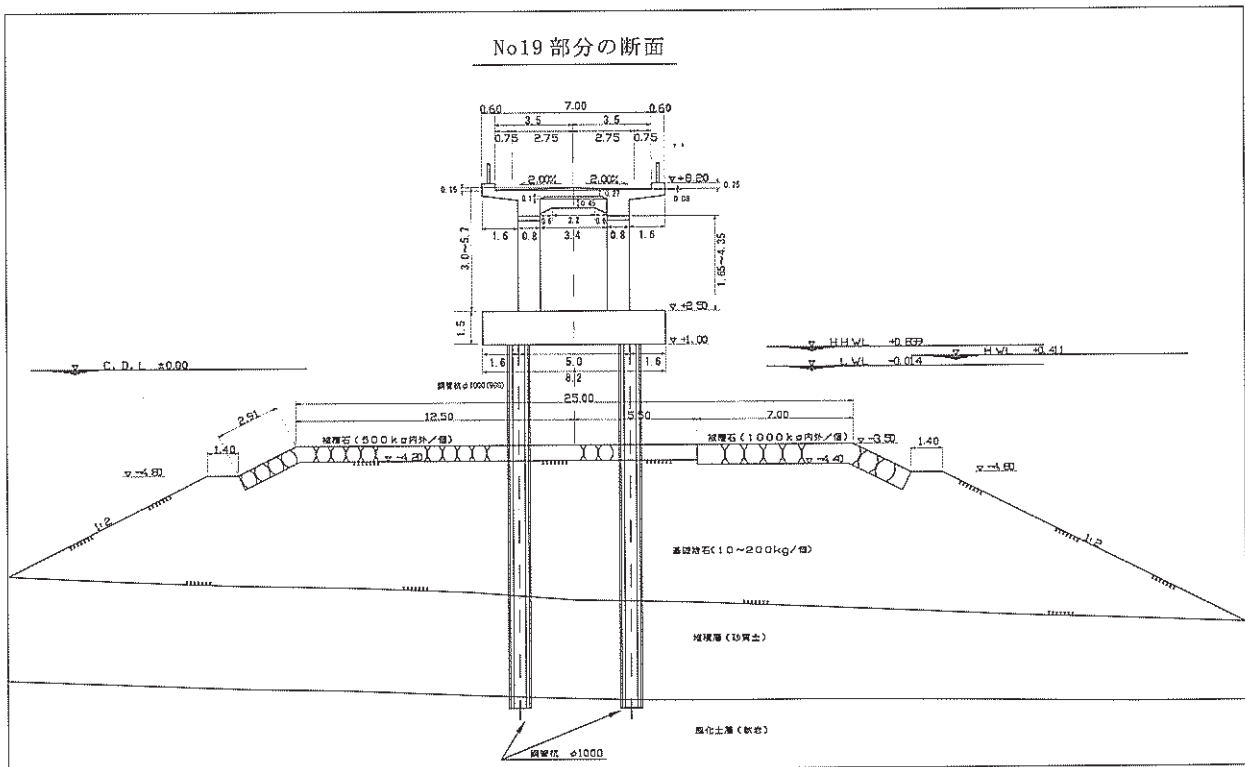


図3 汐見橋の断面図

その結果、この方式の橋脚は認可が得られ、経済性と施工性に優れ、港内の水質保全、静穏度向上及び藻場の復元にも配慮した設計を行うことができました。（設計図は、図3：3頁、図4：6頁）

5. 多柱式杭基礎捨石併用方式の設計課題

水面上の橋脚構造は、図3、図4に示すとおり多柱式杭基礎（捨石マウンド併用）を底版で剛結し、その底版から6本の柱を立て、これを橋梁の床版で連結するという構造となっています。

そのため底版上の重量を軽くすれば経済性が高まるので、底版を極力軽くする設計をしたところ、形状が複雑になってしまいました。今後はもっとシンプルな形状で軽い構造とする工夫が課題です。

設計で最も難しかったのが、橋脚の構造計算でした。平成8年度に阪神淡路大震災をきっかけに見直された土木・建築構造物の耐震設計他にかかわる示方書・指針等が、検討を経て改訂されていましたので、これを適用しました。指針等では、地震時保有水平耐力法による耐震設計が適用されていました。つまりプレート境界型の大規模地震（タイプⅠ）及び内陸直下型地震（タイプⅡ）に対して致命的な被害を受けないことを目標として耐震設計をおこなうこととされていました。

しかし、設計業務実施時（平成9年度より）では、複雑な構造物（連続した骨組み構造）への計算手法が確立されていませんでしたので、構造解析手法としては、底版の剛度が大きい場合に適用できる分割解析を行いました。即ち、底版上面（柱基部）を固定端とするラーメン構造として上部を解析し、杭については底版下面から上方にある全ての荷重を作用させ杭頭を固定として解析、更に柱基部ならびに杭頭部に生じる断面力と底版に作用する荷重を設計外力（梁構造として解析するもの）として設計を行いました。

更に検証する意味で杭先端から構造物の頂部までを一体としたラーメン構造として立体フレームで一体解析し、傾向を調べました。

このことについても、学識経験者の考察をいただき、妥当であるとの評価を受け、設計を完了させましたが、試行的計算方式でしたので、多柱式杭基礎捨石併用方式にも適用できる構造計算方式の確立が課題でした。

6. 施工管理

臨港道路の建設工事は平成10年度より開始され、漁港開口部の橋梁工事は平成12年度より施工されました。当センターは、前述した設計背景を十分施工者に伝えながら施工管理が行える者として、橋梁工事部分の施工管理の委託を受け実施しました。施工中に地震時保

有水平耐力法が改定され、複雑な構造物の構造計算方式が確立されましたので、汐見橋の照査を行い、基準を満たしているという結果をました。そこで照査計算結果と施工管理の留意事項について説明します。

1) 地震時保有水平耐力法による照査計算

工事開始時点では、先述した複雑な構造物に対する地震時保有水平耐力法による計算手法が確立されていなかったことから、前述した計算手法で行いましたが、島根県からの依頼により、平成13年に地震時保有水平耐力法による耐震設計の照査を行いました。

手法としては、プッシュオーバーアナリシスによる地震時保有水平耐力法で、非線形の構造系を対象に荷重漸増法で構造系全体の崩壊過程を求める解析手法です。更に、本橋脚の基礎が、特殊な形状・複雑な構造であることから、非線形時刻歴応答解析も行い地震時耐力の評価をしました。その結果を以下に示します。

① 断面力の比較

橋軸方向の結果についてのみ比較をしました。7頁の表1に示すとおり、タイプⅠ、タイプⅡともに非線形時刻歴応答解析の結果が、非線形静的解析での結果の30～100%程度と小さめになっています。これは非線形時刻歴応答解析での結果が線形応答範囲内であるためです。また、タイプⅠの応答よりもタイプⅡの地震波の方がより整合が取れた結果となっています。

② 杭基礎塑性率の比較

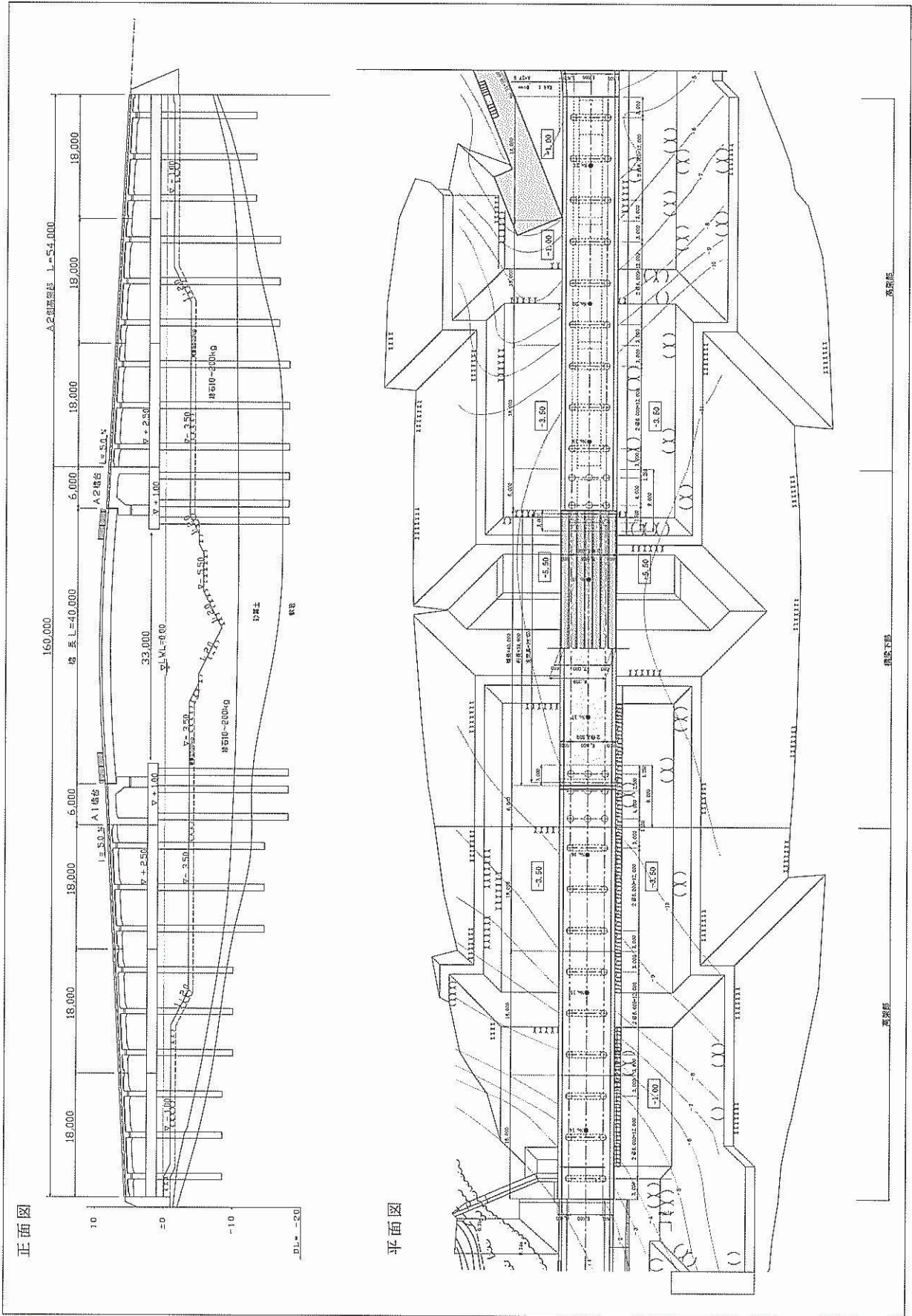
非線形静的解析結果よりエネルギー一定則に基づいて算出した塑性率と、非線形時刻歴応答解析での応答塑性率を比較しました。7頁の表2のとおり、非線形時刻歴応答解析での結果は非線形静的解析に対して、タイプⅠの地震動に対しては時刻歴応答解析が大きめに評価しているのに対して、タイプⅡの地震動では時刻歴応答解析の場合の塑性率が20%程度小さく評価されました。これは、想定されるタイプⅡの地震動に対して構造物の耐力が十分であることを示しています。

2) 施工管理の重要事項

多柱式杭基礎捨石併用方式の施工に際しては、施工者が、捨石マウンドで橋脚杭の横方向の抵抗を支持させる方式であるということを理解したうえで、正しい施工手順で工事を行うことが、橋梁の安全・安定性にとって極めて重要なため、現場の責任者達に、橋脚の基礎構造形式について十分に理解してもらうための説明が重要です。

実際の施工に際しては、杭の打設方法と捨石の投入手順が重要であり、手順を間違えれば、設計で期待した結果が得られず安定性を欠いた構造物となります。

図4 汐見橋の正面図と平面図



タイプIの地震動：プレート境界型の大規模な地震を想定
 タイプIIの地震動：兵庫県南部地震のような内陸直下型地震を想定

- 1) 地震時保有水平耐力法 (プッシュオーバーアナリシス)
- | | | |
|--------------|-------|--------|
| 固有周期 | 橋軸方向 | 橋軸直角方向 |
| 非線形静的解析 (2D) | 0.478 | 0.572 |
- 固有周期より設計水平震度の標準値(khc0)を算出し、地域別補正係数により補正し設計水平震度(khc)を算出
 設計水平震度：タイプI＝橋軸方向 0.72 khc、タイプII＝橋軸方向 1.49 khc

- 2) 非線形時刻歴応答解析 (直接積分法)
- 地震波形は、II種地盤用タイプI波形3波、タイプII波形3波計6波を使用
- | | | |
|--------------|-------|--------|
| 固有周期 | 橋軸方向 | 橋軸直角方向 |
| 時刻歴応答解析 (3D) | 0.473 | 0.586 |
- 固有値解析により固有周期等を算出し、時刻歴応答解析に用いる減衰としてレリー減衰を設定
 線形微分方程式として表された運動方程式の解を直接積分法で求める

表-1 断面力比較

橋軸方向	タイプI			タイプII		
	プッシュオーバー	時刻歴	時刻歴/プッシュオーバー	プッシュオーバー	時刻歴	時刻歴/プッシュオーバー
P1上端	847.41	347.22	0.41	846.85	675.83	0.80
	1355.29	529.26	0.39	1354.50	1024.14	0.76
P1下端	920.58	373.41	0.41	920.02	714.57	0.78
	1367.43	581.15	0.42	1366.47	1124.37	0.82
P2上端	363.02	185.68	0.51	364.10	363.61	1.00
	674.49	335.48	0.50	676.05	653.51	0.97
P2下端	443.32	214.50	0.48	444.40	407.86	0.92
	688.23	342.13	0.50	690.31	660.57	0.96
P3上端	696.69	214.63	0.31	696.22	409.25	0.59
	1355.34	404.07	0.30	1354.48	760.28	0.56
P3下端	784.12	245.59	0.31	783.64	456.30	0.58
	1369.37	444.40	0.32	1368.40	844.04	0.62

表-2 塑性率比較

橋軸方向	タイプI		タイプII	
	プッシュオーバー	時刻歴	プッシュオーバー	時刻歴
タイプ1-2-1	1.20	1.19	0.99	2.26
タイプ1-2-2		1.46	1.22	2.69
タイプ1-2-3		1.34	1.12	2.74
平均		1.33	1.11	2.56
直角方向				
タイプ2-2-1	1.03	1.56	1.51	2.82
タイプ2-2-2		1.56	1.51	2.41
タイプ2-2-3		1.56	1.51	2.71
平均		1.56	1.51	2.65

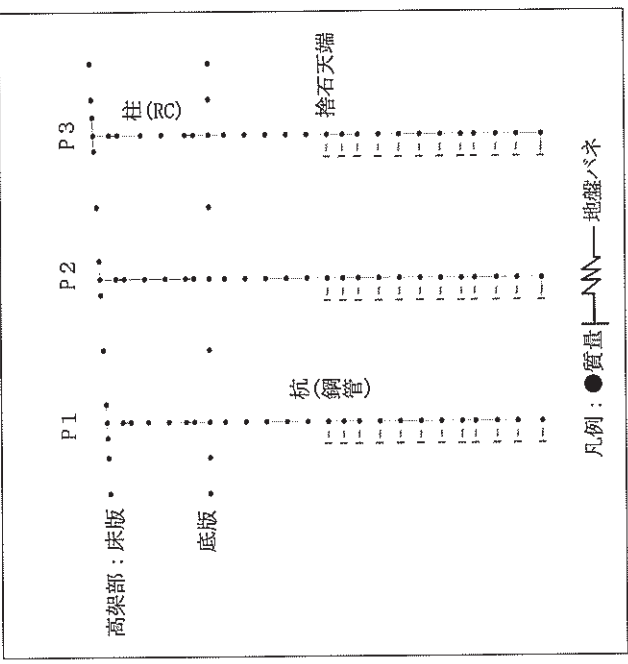


図-5 橋軸方向モデル

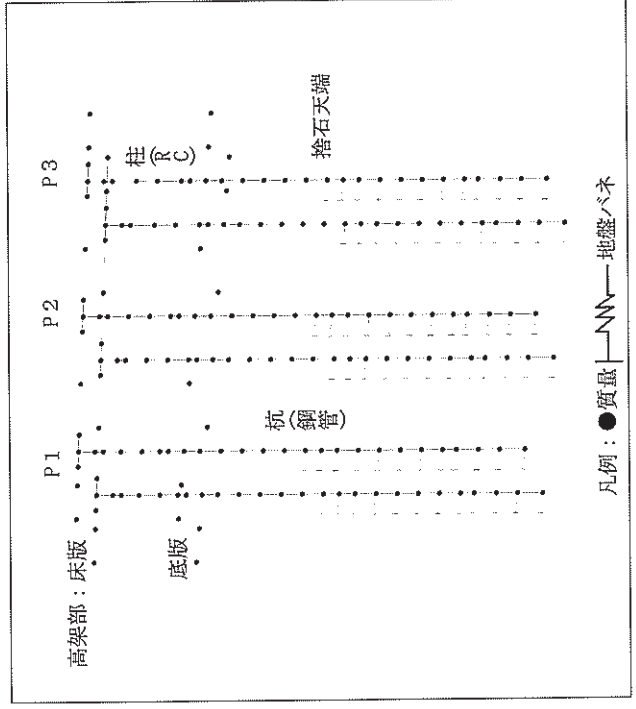
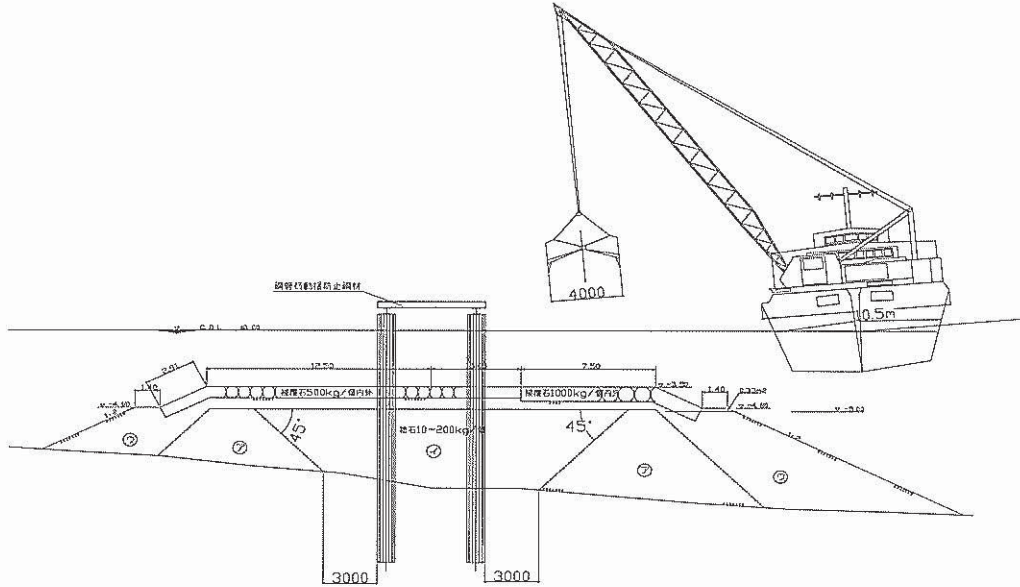


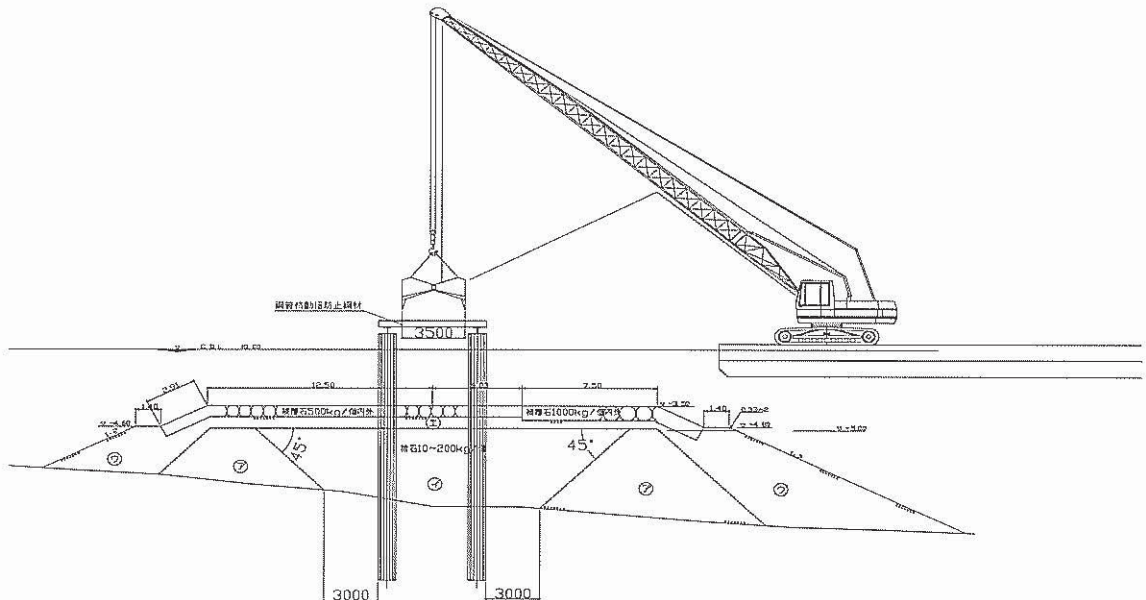
図-6 時刻歴応答解析モデル

図7 捨石マウンド式多柱基礎の捨石投入手順

- ① 造成しようとするマウンドの港内側と港外側の「ア」の位置に投入
杭体より3m程度控えて投入する。
- ② 杭体廻りの「イ」の位置に投入
「ア」の位置への投入でできた捨石の傾斜を利用して杭体を外側から杭周面に密着充填できるように投入する。
- ③ 外縁部の「ウ」の位置に投入
- ④ 捨石天端面の「エ」の位置に投入
投入した石は、潜水士の水中均しによって杭周面へ確実に充填する。



- ◎ 1次投入：ガット船により「ア」の位置に捨石を投入
※ 鋼管杭に捨石が接触しない範囲で投入する。
鋼管杭側に45°程度の勾配を持つ様に投入する。



- ◎ 2次投入：クレーン付台船により「イ」の位置に捨石を投入
※ 鋼管杭の両側に均等に投入していく。
捨石は、1次投入によって形成された捨石法面に沿って投入すると鋼管杭廻りに密に接触する。
- ◎ 3次投入：カッター船により「ウ」の位置に捨石を投入
※ 三次投入は仕上げ投入とし、港内外のマウンドを設計のとおり形造る。
鋼管杭廻りの仕上げ投入（「エ」の位置）は、約70cmの捨石厚を潜水士により確実に充填する。