

PC 栈橋技術マニュアル (2010 年版)

— PC 栈橋技術研究委員会報告 —

関 博*1・金正 富雄*2・村井 伸康*3・合田 和哉*4・松本 正之*5

近年プレストレスコンクリート（以下、PCと記す）技術を港湾構造物へ導入している事例も増加傾向にある。その代表的な構造物がPC栈橋である。栈橋に用いるプレキャストPC桁は通常、工場で製作されるため高品質であり、プレストレスを導入することで、プレキャストPC桁のひび割れの発生が抑制され、厳しい海洋環境下においても優れた耐久性を発揮する。また、型枠・支保工やコンクリート工などの現地施工が短縮されるため、施工中の気象海象の影響を受けることも少なく、急速施工が可能で安全面でも優れた特徴がある。このたび、PC栈橋の設計が容易に理解できるように、「PC栈橋技術マニュアル 2010年版」を発刊し、実務者に役立つように2例の計算例を掲載した。

キーワード：PC 栈橋，性能規定，プレキャストPC桁，耐震性能，維持管理

1. はじめに

PC栈橋は、わが国では1962年より建造され、以来半世紀にわたり数百件の実績を重ね、大型の客船バース、コンテナ栈橋や耐震強化岸壁にも適用されている。栈橋に用いるプレキャストPC桁は通常、工場で製作されるため高品質であり、プレストレスを導入することで、プレキャストPC桁のひび割れの発生が抑制され、厳しい海洋環境下においても優れた耐久性を発揮する。また、型枠・支保工やコンクリート工などの現地施工が短縮されるため、施工中の気象海象の影響を受けることも少なく、急速施工が可能で安全面でも優れた特徴がある。海洋立国を目指す日本において、良質な社会資本を整備し後世に残すためにも、PC栈橋のさらなる普及が望まれる。

平成19年4月に施行された「港湾の施設の技術上の基準・同解説」¹⁾（以下では、技術基準・同解説と記す）では、設計体系が仕様規定型から性能規定型に大きく改定された。性能は供用期間中すべてにおいて規定されるため、構造物の維持管理の重要性も強調された。平成15年10月刊行の「PC栈橋技術マニュアル」²⁾は一部、性能規定を取入れているが、このたび、全面的に上記技術基準に準拠するように改訂することとした。維持管理に関しても詳述し、さらに、資料編では設計実務者に役立つように2例の計算例を掲載し、技術基準に準拠した設計法が容易に理解できるように記述した。

また、PC栈橋の製作・施工に関しても、新たな知見や施工事例を追加した。

本マニュアルの構成を表-1に示す。本報告では、本マニュアルの内容について概説するとともに、計算例やPC栈橋の施工事例について紹介する。

表-1 マニュアルの目次

第1編	総 則
第2編	設 計
第3編	施 工
第4編	維持管理
参考資料 1	法線平行方向にPC桁を配置した横栈橋（耐震強化施設以外）の計算例（概要版）
参考資料 2	法線直角方向にPC桁を配置した横栈橋（耐震強化施設栈橋）の計算例
参考資料 3	PC栈橋用ホロー桁参考断面
参考資料 4	PC栈橋施工例及び施工実績
付属 CD	法線平行方向にPC桁を配置した横栈橋（耐震強化施設以外）の計算例（詳細版）

2. PC 栈橋技術マニュアル

2.1 PC 栈橋の定義と適用範囲

PC栈橋とは、各径間に並列架設されたプレキャストPC桁を間詰めコンクリートと横方向プレストレスによって一体構築とし、これを基礎杭で支持された受梁上で連結した構造と定義する。PC栈橋の施工例を写真-1に示す。本マニュアルは、栈橋の中でも主として写真-1に示すような横栈橋および突堤式栈橋を対象としているが、構造形式が同様であるもの、たとえば連絡橋および渡橋、ドルフィン、デタッチドピア、海上空港、ヘリポート等にPC構造を用いる場合にも、これを参考にしてもよい。

2.2 性能照査

(1) 性能規定への移行

今回のマニュアル改訂の主目的は、従来の仕様規定型から性能規定型への設計体系の改訂である。第2編では、

*1 Hiroshi SEKI：早稲田大学 理工学術院 社会環境工学科 教授

*2 Tomio KINSHO：(財)沿岸技術研究センター 調査役

*3 Nobuyasu MURAI：前 (財)沿岸技術研究センター 調査部

*4 Kazuya GODA：東洋建設(株) 土木事業本部 土木技術部

*5 Masayuki MATSUMOTO：(株)日本ピーエス 技術施工部 土木設計課



写真 - 1 PC 栈橋の施工例

PC 栈橋に対する要求性能，性能規定について記述し，それぞれの性能規定に対する具体的な性能照査法について示している。

また，旧マニュアル²⁾が発刊されて以来，技術基準・同解説，「コンクリート標準示方書」^{3~5)}，「港湾の施設の維持管理技術マニュアル」⁶⁾等が改訂，発刊された。マニュアルの内容は，基本的にこれら基準に準拠した内容となっている。

以下，具体的な改訂項目について述べる。

(2) 断面力の算出

本マニュアルでは，技術基準・同解説に基づき，PC 栈橋の性能規定を明確にし，それに対して，それぞれ具体的な照査項目と照査方法を記述している。

図 - 1 に PC 栈橋の一般的な設計手順を示す。設計手順自体は，一般の栈橋と大きな差異はない。しかし，次のような施工過程を考慮した照査が必要であるため，PC 構造の設計に不慣れな実務者にとっては，理解が難しい内容となっていた。

PC 栈橋の施工は，プレキャスト PC 桁の架設，間詰めコンクリートの打設，横締めケーブルの緊張，連結部の施工という手順をとる。間詰めコンクリート打設時までは，プレキャスト PC 桁の断面性能のみで支えられた単純梁とみなせるが，横締めケーブルの緊張によって単純版構造となる。さらに，連結部の施工によって下部構造と連結され

た後はラーメン構造となる。このように PC 栈橋の断面力の算定においては，施工段階ごとの構造モデルを適切に設定することが重要である。

したがって，今回のマニュアル改訂では設計実務者にとって解りやすい内容とすることを念頭に，施工順序図を追加し，断面力算定モデルや算出フローについての詳細な説明を加えた。

また，技術基準・同解説の改訂に伴い，照査用震度の算出方法が従来の方法から大きく変わっている。上部工の地震時設計断面力は，照査用震度の特性値を用いて求めた断面力に，コンクリート部材の荷重係数を考慮して算出する点に注意が必要である。

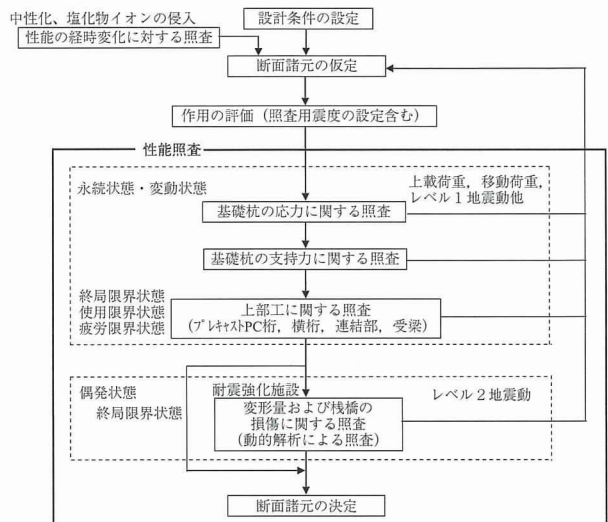


図 - 1 PC 栈橋の設計手順

(3) 作用の組合せと設計状態

PC 栈橋のそれぞれの性能規定と設計状態に対して，これまでの実績も考慮に入れた作用の組合せ例と標準的な荷重係数を示した。紙面の都合上，本稿での掲載は割愛するが，実務者にとっては参考になる情報であると思われる。ただし，あくまでも組合せの例を示したものであるため，これに限定されることなく，個々の設計条件に応じて適切な作用の組合せを設定する必要がある点については，ご注意願いたい。

(4) 使用限界状態の照査

プレキャスト PC 桁の使用限界状態に対する検討は，これまでと同様に，曲げモーメントおよび軸方向力に対する検討（コンクリートの曲げ圧縮応力度と曲げ引張応力度，PC 鋼材の応力度）と，せん断に対する検討を実施する。

ただし，曲げ引張応力度の限界値は，永続状態で 0 N/mm^2 （フルプレストレス），変動状態では曲げびび割れ強度の値とした。また，活荷重による桁のたわみに対する照査項目を新たに追加した。

(5) 性能の経時変化に対する検討

構造部材の保有する性能は，設計供用期間に生じる材料劣化等により，要求される性能を下回ってはならない。こ

のような観点から、性能の経時変化に対する検討を新たに追加した。検討項目は、PC 栈橋の置かれた環境に応じて選定する必要があるが、一般的な海洋環境にある港湾施設であれば、塩化物イオンの侵入による鋼材腐食に関して検討すればよい。なお、鋼材腐食発生限界濃度は、次項に示すかぶりが確保されている場合には、一般に 2.0 kg/m^3 とすることができる。

(6) 鋼材の最小かぶり

これまで、プレキャスト PC 桁における鋼材の最小かぶりを 50 mm とした例が多いが、部材劣化はほとんど報告されていないことから、最小かぶりについての規定は明確にされていない。しかし、今回の改訂においては、技術基準・同解説に従い、プレキャスト PC 桁下面のように、とくに厳しい腐食性環境にある部分については 70 mm 、一般の環境にある場合には 50 mm を標準とした。

(7) 耐震性能の照査

旧マニュアルでは、レベル 1 地震動およびレベル 2 地震動に対して、簡便法、弾塑性解析、あるいは非線形動的解析法のいずれかの方法により、耐震性能の照査を行うこととしていた。この場合のプレキャスト PC 桁の限界値は、通常栈橋の場合にはレベル 1 地震動に対して終局限界状態

に至らないこと、耐震強化施設の場合にはレベル 1 地震動に対して最外縁の鋼材が設計降伏強度に至らず、かつレベル 2 地震動に対しては終局限界に至らないこととされていた。

今回の改訂では、レベル 1 地震動は変動状態として取り扱い、基礎杭は技術基準・同解説の部分係数法により照査し、プレキャスト PC 桁は終局限界状態に至らないことを照査することとした。また、レベル 2 地震動は偶発状態として取り扱い、動的解析法により基礎杭の損傷程度と変形量を照査するとともに、プレキャスト PC 桁が終局限界状態に至らないことを照査することとした。

なお、耐震強化施設に対する具体的な照査方法やモデル化については、計算例 - 2 に示した。

2.3 施 工

施工については、現在の技術水準を考慮し、内容の見直しを図った。追加・改訂項目は、グラウトの材料・試験方法・配合例、連結工における PC 鋼より線の端部加工例、舗装下の防水工等である。

2.4 維持管理

PC 栈橋の維持管理に関して、維持管理計画、維持管理レベル、点検診断計画、総合評価、維持補修計画および維

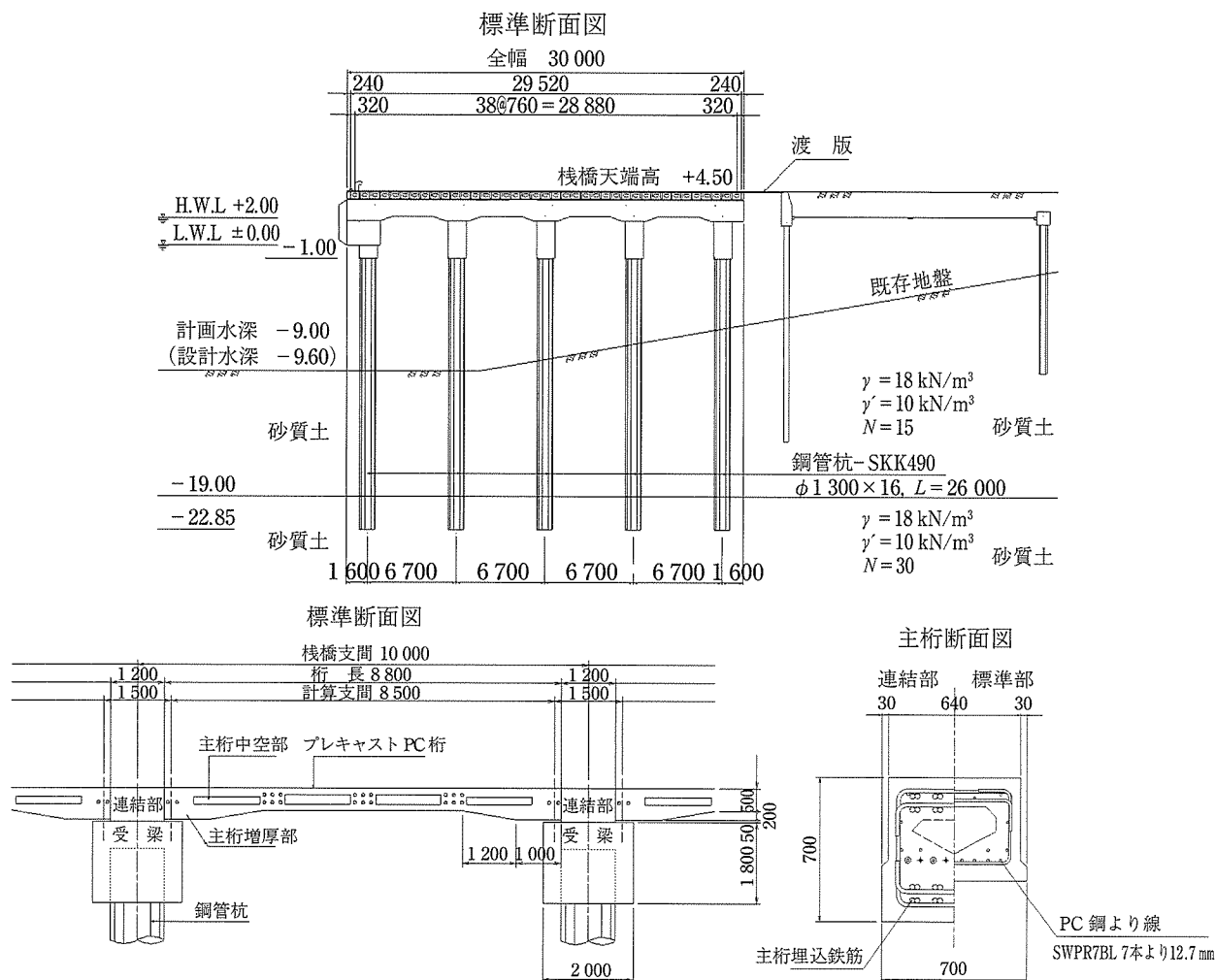


図 - 2 構造一般図

持管理の実施について記した。PC 栈橋の維持管理は、基本的には一般の栈橋と同様に、技術基準・同解説やコンクリート標準示方書〔維持管理編〕⁵⁾、港湾の施設の維持管理技術マニュアル⁶⁾、港湾の施設の維持管理計画書作成の手引き（増補改訂版）⁷⁾などを参考に実施することができる。

本マニュアルでは、維持管理レベルの設定例として、プレキャスト PC 桁を維持管理レベル I として示した。また、PC 栈橋の構成要素別の予想される変状や、補修補強工法の選定時の注意点等についても示した。

3. 計算例－1

3.1 条 件

プレキャスト PC 桁を法線平行方向に配置した直杭式横栈橋の計算例を示した。計算例－1で対象とするバースの形状および水深は、対象船舶を載貨重量 10 000 トン（以下、DWT と記す）貨物船として、延長 160 m、幅 30 m、計画水深 9.0 m とし、ブロック割りはバース長 160 m を 16 径間に分割し、40 m を 1 ブロックとした。栈橋構造は、プレキャスト PC 桁および受梁からなる上部工と、鋼管杭を用いた下部工を、受梁上で連結した上下部連結ラーメン構造である。図－2 に標準部の構造一般図を示す。

3.2 作用の組合せと荷重係数

目標性能に対応した作用の組合せと荷重係数（上部工）を表－2 に示す。

3.3 性能の経時変化に対する検討

主桁支間部下面、主桁と連結部の境界部下面および受梁下面について、塩化物イオンの侵入による鉄筋腐食に関する照査を行った。塩化物イオン濃度と経過年数との関係を図－3 に示す。

主桁においては、設計供用期間の 50 年以内に鉄筋腐食発生限界濃度に達することはなく安全である。

主桁と連結部の境界部下面においては、設計供用期間の 50 年を満足する「鉄筋応力度の増加量およびひび割れ幅」を繰返し計算により求めた。その結果、以下の値を目標とすることにより、耐久性を確保することが可能である。

- ・鉄筋応力度の増加量の上限目標値 75.0 N/mm²
- ・ひび割れ幅の上限目標値 0.186 mm

受梁の下面においては、鉄筋応力度の増加量を 0.0 N/mm²、ひび割れ幅を 0.000 mm と仮定した照査においても、20 年経過時に鉄筋腐食発生限界濃度に達した。このため、エポキシ樹脂塗装鉄筋等の使用を検討し、かつ適切な維持管理を行う必要がある。

4. 計算例－2

4.1 条 件

プレキャスト PC 桁を法線直角方向に配置した横栈橋（耐震強化施設栈橋）の計算例を、レベル 2 地震動に関する偶発作用に対する照査内容を中心に示した。

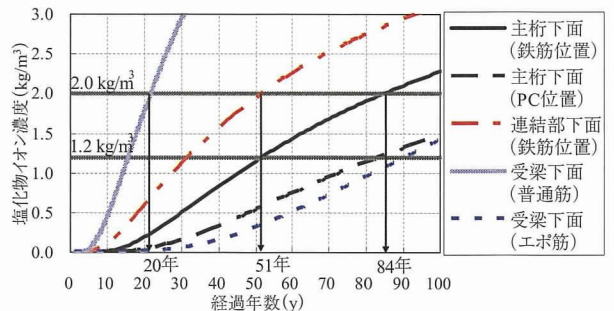
計算例－2で対象とした栈橋は、対象船舶が 60 000 DWT コンテナ船、計画水深が 15.0 m のコンテナ栈橋であ

り、耐震上の施設の位置づけとしては、耐震強化施設（特定、幹線貨物輸送対応）とした。栈橋上には総重量 1 100 tf 級のガントリークレーン（免震式）が載荷されるものとした。栈橋の上部工は、クレーン走行梁と中間梁を受梁としてプレキャスト PC 桁を法線直角方向に配置した構造とし、下部工は、中間部に斜杭を配置した斜杭式構造とした。図－4 に標準部の構造一般図を示す。

表－2 目標性能に対応した作用の組合せと荷重係数

性能	目標性能	作用の組合せ
使用限界状態	永続作用＋変動作用（積載荷重、自動車荷重または荷役機械荷重）（積載荷重＋船舶接岸力または牽引力）に対してコンクリートの曲げひび割れ強度以下または曲げひび割れ幅の制限値以下に制限	$1.1D+1.0P_s+1.0Q_u+0.5or1.0^*1S^*2(W_m)^*3$
		$1.1D+0.5S^*1+0.5H_b$
終局限界状態	永続作用＋変動作用（積載荷重、自動車荷重または荷役機械荷重）に対して断面破壊に至らない	$1.1D+1.0Q_u+1.2S^*2(W_m)^*3$
		$0.9D+1.0Q_u+1.2S^*2(W_m)^*3$
		$1.1D+1.0Q_u+0.8S^*2(W_m)^*3$
		$0.9D+1.0Q_u+0.8S^*2(W_m)^*3$
	永続作用＋変動作用（積載荷重＋レベル 1 地震動、船舶接岸力または牽引力）に対して断面破壊に至らない	$1.1D+1.0Q_u+1.2S^*2+1.2E_q(H_b)^*3$
		$0.9D+1.0Q_u+1.2S^*2+1.2E_q(H_b)^*3$
		$1.1D+1.0Q_u+0.8S^*2+1.2E_q(H_b)^*3$
		$1.1D+1.0Q_u+1.2S^*2+0.8E_q(H_b)^*3$
		$0.9D+1.0Q_u+0.8S^*2+1.2E_q(H_b)^*3$
		$0.9D+1.0Q_u+1.2S^*2+0.8E_q(H_b)^*3$
4	永続作用＋変動作用（揚圧力）に対して断面破壊に至らない	$1.1D+1.0Q_u+1.2W_u$
		$0.9D+1.0Q_u+1.2W_u$
疲労限界状態	変動作用（荷役機械荷重）の繰返し作用に対して疲労強度以下に制限	$1.0D+1.0P_s+1.0Q_u+1.0W_m$

D：自重 W_m：自動車荷重または荷役機械荷重
P_s：プレストレス H_b：船舶接岸力または牽引力
Q_u：不静定力 E_q：レベル 1 地震動
S：積載荷重 W_u：揚圧力
*1 荷重係数は RC 部材に対しては 0.5 を、PC 部材に対しては 1.0 をとる。
*2 性能 3 の積載荷重は性能 1、2 の積載荷重の 1/2 とする。
*3 () は、変動作用として危険となる作用を採用する。



図－3 塩化物イオン濃度と経過年数との関係

標準側面図

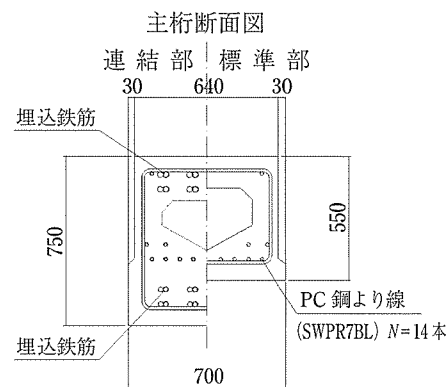
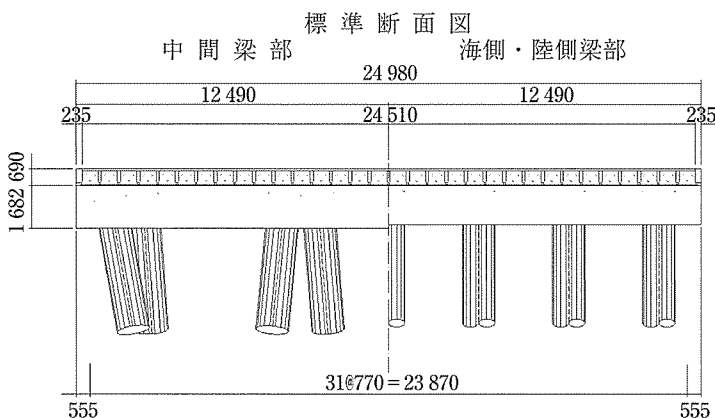
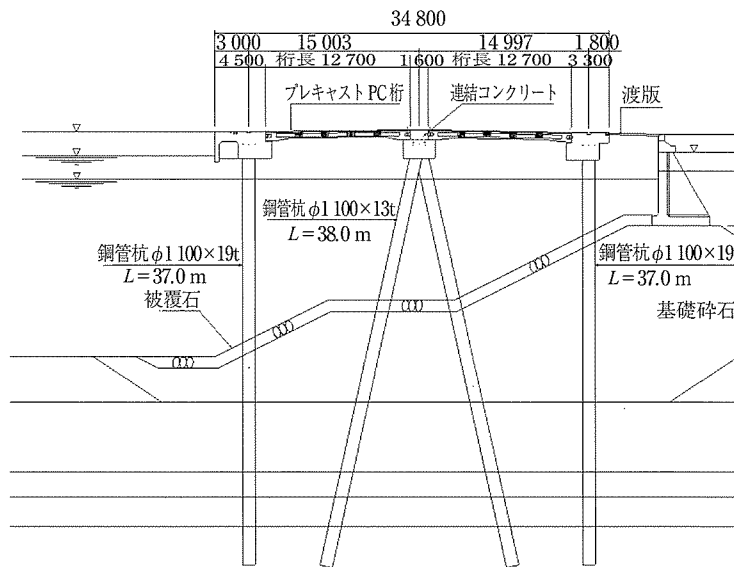


図 - 4 構造一般図

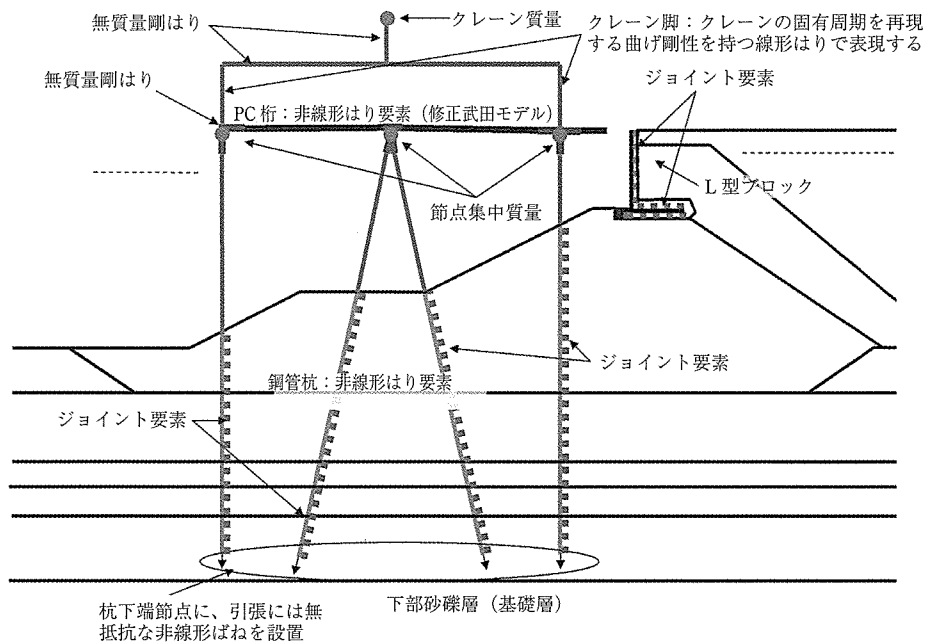


図 - 5 解析モデル

4.2 レベル2地震動に関する照査

レベル2地震動に関する照査は、地震応答解析プログラム“FLIP”を使用し、地盤・栈橋・クレーンを一体としてモデル化した2次元有効応力解析により実施した。

4.3 解析モデル

解析モデルを、図-5に示す。

鋼管杭は、バイリニア型の非線形はり要素とし、曲げモーメントと曲率の関係は軸力依存とした。プレキャストPC桁は、トリリニア型の非線形はり要素（修正武田モデル要素）とした。受梁と連結部は、無質量剛はりとし、梁の重量を節点集中質量として与えた。

クレーンについては、図-5に示すように質点モデルとしたが、クレーン脚の線形はり要素の曲げ剛性を調整することにより、その剛性と固有周期を再現した。

地盤については、「港湾構造物設計事例集」⁸⁾に記載の手法を参考に解析定数を設定した。

この解析モデルを用いて、以下に示す手順で段階的に解析を実施した。

- 1) 第1段階：地盤の初期自重解析

- 2) 第2段階：栈橋構造およびクレーンの初期自重解析

- 3) 第3段階：地震応答解析

4.4 照査結果

栈橋本体の最大応変変位量は300mm程度であり、適切な桁かかり長と遊間の設定により渡版の落版を防止できる解析結果となった。栈橋の残留変位量は200mm程度、残留傾斜角は1/4000程度であり、地震後の船舶の係留と速やかな荷役作業の再開は可能と考えられる。地震動によるクレーンの安定性も問題は生じなかった。

プレキャストPC桁のうち、陸側PC桁の曲げモーメント最大応答分布を図-6に示す。プレキャストPC桁に発生する曲げモーメントは全体的にひび割れモーメントを上回り、部分的に降伏値を超えているが、終局値には達していない。

鋼管杭のうち、陸側斜杭と陸側直杭の曲げモーメント最大応答分布図を図-7に示す。これによれば、陸側斜杭の地中部において、全塑性モーメントを上回る曲げモーメントが一部発生しているが、これ以外については曲げモーメントの応答値は全塑性モーメントを下回っている。耐震

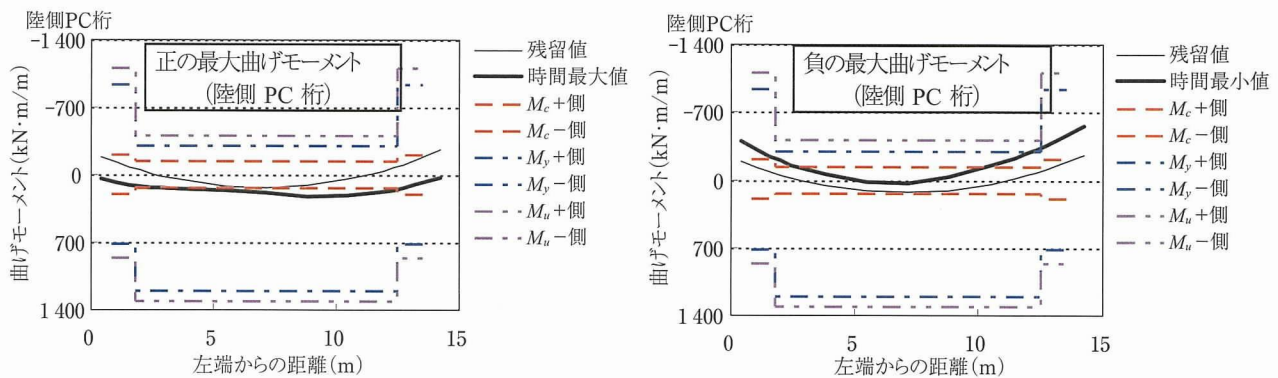


図-6 プレキャストPC桁の曲げモーメント分布図 (陸側PC桁)

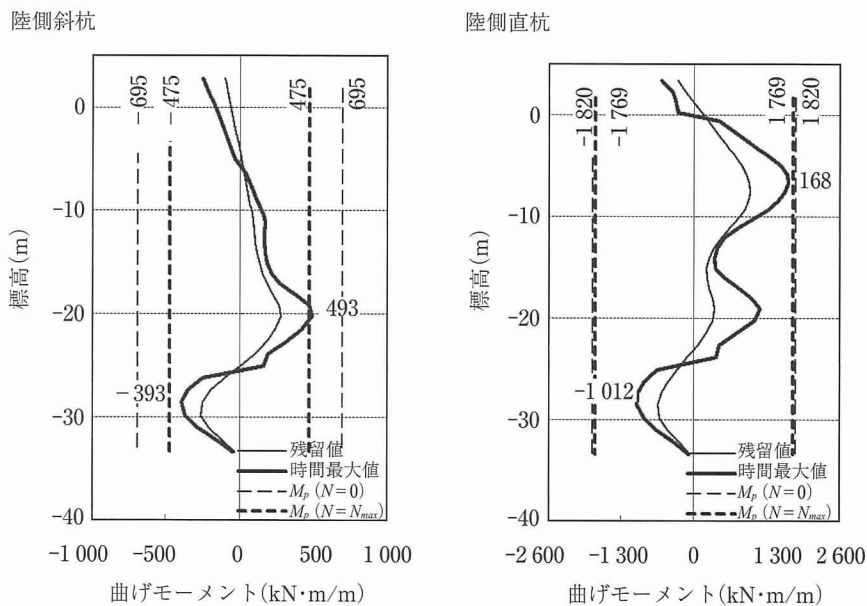


図-7 鋼管杭の曲げモーメント分布図

強化施設（特定、幹線貨物輸送対応）である本栈橋基礎杭に求められる L2 地震動に対する性能は“杭頭部及び地中部の双方で全塑性に達する杭が存在しないこと”であり、要求性能を満足する。

以上より、L2 地震動に関する偶発状態に対し、本栈橋は耐震強化施設（特定、幹線貨物輸送対応）としての所要の性能を有するといえる。

5. PC 栈橋施工例および施工実績

PC 栈橋の代表的な施工例や特殊な施工例、および 1992 年度以降に建設された PC 栈橋の主な施工実績を参考資料として掲載した。これまでの適用例や実績調査等の参考としていただければ幸いである。



写真 - 2 代表的な施工例
(四日市港霞ヶ浦北ふ頭 80 号岸壁)

6. おわりに

「PC 栈橋技術マニュアル 2010 年版」は、新しい港湾の技術基準に基づく栈橋の設計について、「港湾構造物設計事例集」よりも詳述しているところもあり、両書をあわせて有効に活用されることを期待する。本マニュアルは、沿岸技術研究センターホームページより購入申込みできる。

謝 辞

本マニュアルの改訂作業は、沿岸技術研究センターと港湾 PC 構造物研究会の共同研究として実施し、「PC 栈橋技術研究委員会」で熱心にご討議・ご検討いただきました。以下に PC 栈橋技術研究委員会、PC 栈橋マニュアル改訂 WG のメンバーを記すとともに、ご協力いただいた関係各位に心より御礼申し上げます。

PC 栈橋技術研究委員会（沿岸技術研究センター）

委員長：関 博

委員：大即信明、清宮 理、睦好宏史、長尾 毅、岩波光保、小濱英司、寺内 潔、常陸壯介

事務局：山本修司、金正富雄、村井伸康、井上博士、小野滋久、合田和哉、佐藤祐輔、立神久雄、諸橋克敏、渡辺 寛

PC 栈橋マニュアル改訂 WG（港湾 PC 構造物研究会）

マニュアル作成 WG

WG 長：合田和哉、副 WG 長：佐藤祐輔

委員：篠崎英二、立神久雄、松本正之、星野展洋、飯島基裕、森 晴夫、高橋 功（旧）、今川隆弘（旧）、八木秀樹（旧）、中積健一（旧）

試設計 WG

WG 長：諸橋克敏、副 WG 長：小野滋久

委員：横川勝則、井上博士、阪上徳行、三宅淳一郎（旧）

参考文献

- 1) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2007.7
- 2) 沿岸開発技術研究センター：PC 栈橋技術マニュアル，2003.10
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕，2008.3
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書〔施工編〕，2008.3
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書〔維持管理編〕，2008.3
- 6) 沿岸技術研究センター：港湾の施設の維持管理技術マニュアル，2007.10
- 7) 港湾空港建設技術サービスセンター：港湾の施設の維持管理計画書作成の手引き（増補改訂版），2008.12
- 8) 財 沿岸技術研究センター：港湾構造物設計事例集

【2010 年 7 月 1 日受付】