

とう曲変位に対する鋼管矢板基礎の 安全性検討手法の一提案

服部 駿佑¹・杉山 裕樹²・佐藤 彰紀³・谷口 惺¹・豊島 孝之⁴・後閑 勇⁵

- ¹正会員 阪神高速道路株式会社 建設事業本部 神戸建設部 湾岸西伸第一建設事業所
(〒650-0023 神戸市中央区栄町通1-2-10)
- ²正会員 阪神高速道路株式会社 建設事業本部 神戸建設部 技術統括課
(〒650-0023 神戸市中央区栄町通1-2-10)
- ³正会員 阪神高速道路株式会社 管理本部 管理企画部 保全技術課
(〒552-0006 大阪市港区石田3-1-25)
- ⁴大日本コンサルタント株式会社 関東支社 構造保全技術部 構造保全計画室
(〒330-6011 埼玉県さいたま市中央区新都心11-2)
- ⁵正会員 大日本コンサルタント株式会社 構造耐震技術センター 特殊橋梁技術室
(〒330-6011 埼玉県さいたま市中央区新都心11-2)

1. はじめに

大阪湾岸道路西伸部の新港・灘浜航路部は、大阪湾断層帯によって生じた摩耶とう曲上に位置する(図-1)。橋梁の計画・設計においては、とう曲の影響を適切に考慮する必要があるため、ボーリング調査や反射法探査等の現地調査に基づく検討により、とう曲位置および変位量の推定が行われている¹⁾。とう曲変位により変形が直接基礎に作用することで、部材に生じる応力や変位が大きいことが予想され、

とう曲変位に対し慎重を期した設計が必要となる。また、とう曲影響を適切に考慮するためには、摩耶とう曲と合わせて発生する大規模地震も想定する必要があるが、その基礎への影響を確かめる手法は確立されていない。そこで本稿では、とう曲変位が新港・灘浜航路部の鋼管矢板基礎に与える影響への対応として、とう曲変位と大阪湾断層に起因する大規模地震の影響を静的に足し合わせた作用外力を想定した立体骨組解析を用いた基礎の安全性検討を提案する。

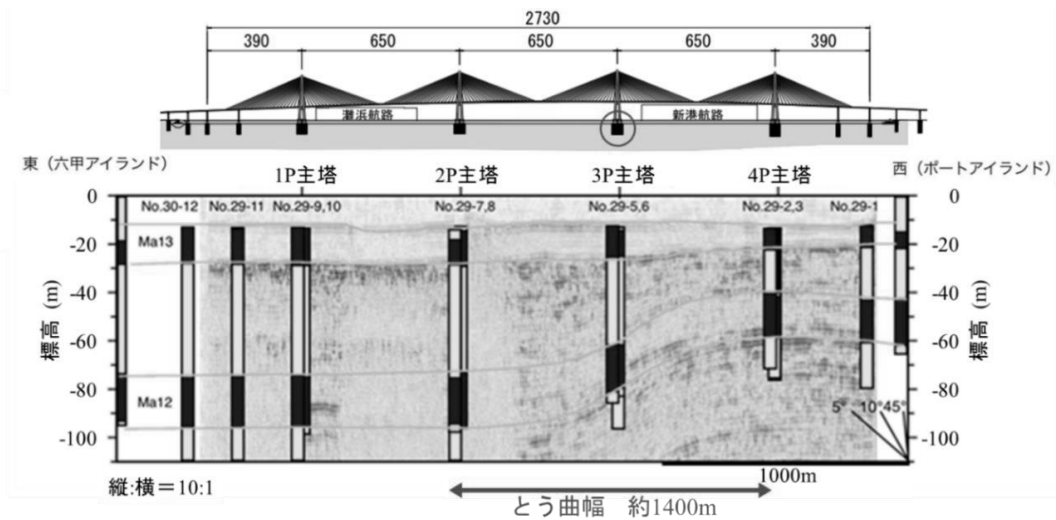


図-1 新港・灘浜航路部のボーリング情報と反射法探査結果を合わせた断面図

表-1 部材の限界状態照査（限界状態1）

照査項目		照査の考え方	備考
①	変位	上部工慣性力作用位置（頂版上端）の変位急増点が発生しないか照査	道路橋示方書と同様の照査
②	押し込み支持力	4分の1以上の鋼管矢板の先端において鉛直応力が鋼管矢板先端の極限押し込み支持力に達していないか照査	
③	引抜き力・底面浮上り	鋼管矢板の先端において、鉛直力が鋼管矢板先端の極限押し込み支持力に達したものと浮き上がりが生じたものとの合計が、全鋼管矢板の60%に達していないか照査	
④	杭体曲げ	外周鋼管矢板において、押し込み側の4分の1範囲の鋼管矢板の縁応力度が降伏応力度に達していないか照査	
⑤	杭-頂版接合部	せん断降伏耐力以下であることを照査	
⑥	(参考) 継手管	鉛直相対ずれ変位量が10mm以下であることを確認 ※限界状態照査としては扱わない	道路橋示方書の照査に含まれない

2. 立体骨組解析による安全性検討手法

図-2に立体骨組解析を用いたとう曲変位に対する基礎の安全性検討手法のフローを示す。初めに、鋼管矢板基礎がとう曲変位の影響を受けた場合の要求性能の設定を行う。続いて、とう曲変位の影響を評価可能な解析モデルの検討を行う。そして、解析に入力する値の算出として作用外力の検討を行い、解析を実施する。最後に、解析結果を最初に設定した要求性能と比較する。要求性能として設定された照査項目の制限値を基礎の各部材の応答値が下回ることを確認することで、とう曲変位に対する鋼管矢板基礎の安全性を確認するフローとしている。

本章において(1)~(4)の設定、検討を具体的に述べる。次章に解析の確認結果を示し、要求性能に基づく照査をどのように行うのか示す。

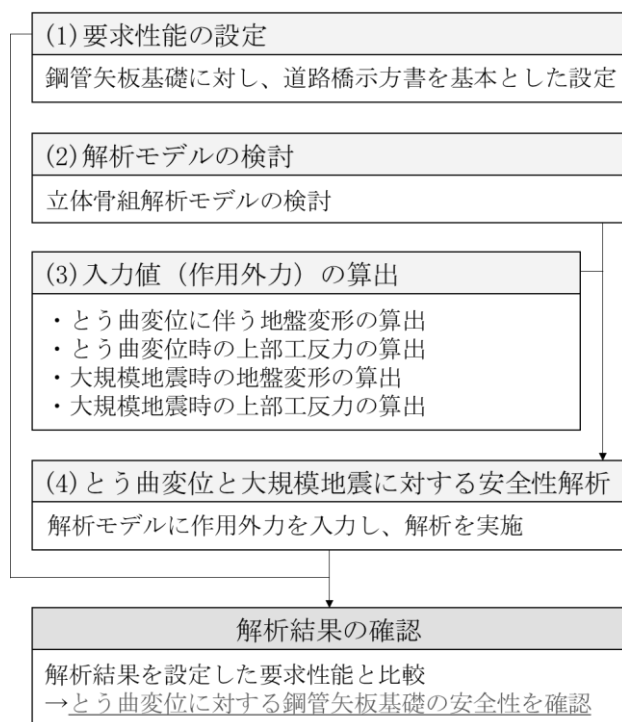


図-2 立体骨組解析を用いたとう曲変位に対する基礎の安全性検討手法フロー

(1) 要求性能

本稿では、とう曲変位と合わせて発生する大規模地震動としてレベル2地震動を仮定する。道路橋示方書・同解説IV下部構造編²⁾に基づき、基礎全体として降伏に至らないこと（限界状態1以下）を要求性能とし、表-1の通り照査する。道路橋示方書において、変動作用時の継手管鉛直方向ずれ変位量は、塑性化後の剛性低下を考慮した設計方針となっているため、照査項目に含まれていない。ただし、とう曲変位のように直接変形が基礎に作用する現象を考慮する場合、鋼管矢板の継手管が鉛直せん断変形することで基礎全体のせん断変形が過大となり、荷重を支持する能力に影響を与える恐れがある。よって、継手管の鉛直せん断変形量についても確認する。なお、表-1の継手のせん断ずれ量10 mmは、載荷試験結果³⁾において、せん断耐力が低下しはじめる変位量（特性値）に相当する。

(2) 解析モデル

本稿では、連続斜張橋において、とう曲中央部に設置される主塔基礎（図-1の3P主塔基礎）に着目し、解析検討を行う。道路橋示方書において、鋼管矢板基礎の設計に用いる解析モデルとして、仮想井筒梁モデルまたは立体骨組モデルを用いることが望ましいとされている。とう曲変位と大規模地震動に伴う地盤変形により鋼管矢板基礎の井筒部は断面保持されないと考え、井筒の平面保持を前提条件としている仮想井筒梁法ではなく、井筒断面の変形を考慮できる立体骨組解析を用いる。

鋼管矢板基礎は、図-3のようにモデル化した。図-2(a)の部材のモデル化概要に示すように、鋼管はファイバー要素、頂版は剛梁要素、継手は鋼管に適切な間隔で設けられた節点間を結ぶ仮想部材としてモデル化する（図-3(b)）。鋼管と頂版は鋼管杭の杭頭における充填コンクリートは再現していない。本検討の継手管は縞鋼管継手を想定し、鉛直方向せん断、引張、圧縮、水平方向せん断の剛性、耐力については、表-2に示す実験結果に基づくパラメータ⁴⁾を用いて、バイリニア型の弾塑性バネでモデル化

する。地盤バネについては、基礎前面水平方向，基礎外周面水平方向，基礎外周面及び内周面の鉛直方向（基礎底面から基礎平面の短辺長のみ考慮），基礎底面の鉛直方向をそれぞれバイリニア型の弾塑性バネ，基礎底面の水平方向は線形バネとしているが，内周面の水平方向は地盤バネをモデル化しておらず，内部土の影響を考慮していない，地盤バネに架橋地点における土質調査結果を反映するため，3P主塔位置にて得られた4つのボーリングデータにおける地層構成のうち，仮想井筒梁モデルを用いた基礎設計において，基礎平面形状が最大となったボーリング1本の地層構成でモデル化を行う。3P主塔位置における地層構成図を図-4に，解析に用いる3P主塔基礎の諸元を図-5に示す。

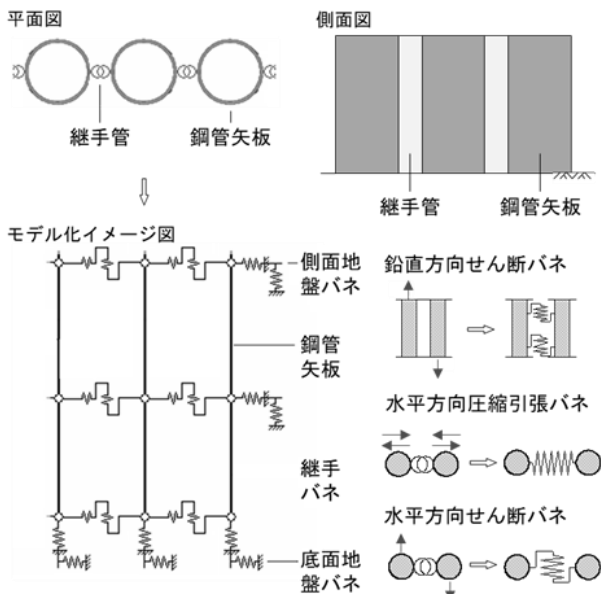


図-3(a) 鋼管矢板基礎部材のモデル化概要

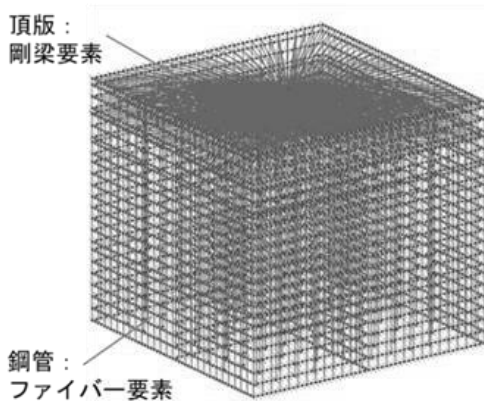


図-3(b) 3P主塔基礎モデル

表-2 継手管バネパラメータ

	鉛直方向せん断	引張/圧縮	水平方向せん断
剛性 [MN/m ²]	630	140/4500	150
耐力 [kN/m]	1150	130/4200	550

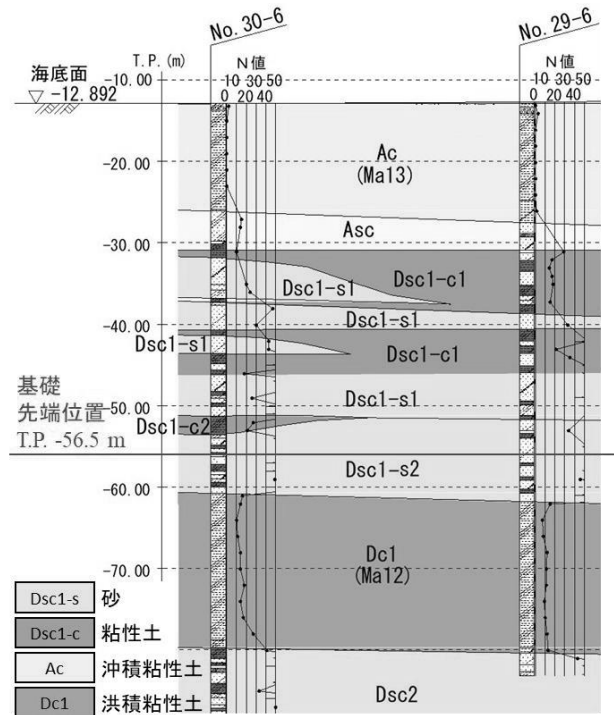


図-4 3P主塔位置地層構成図

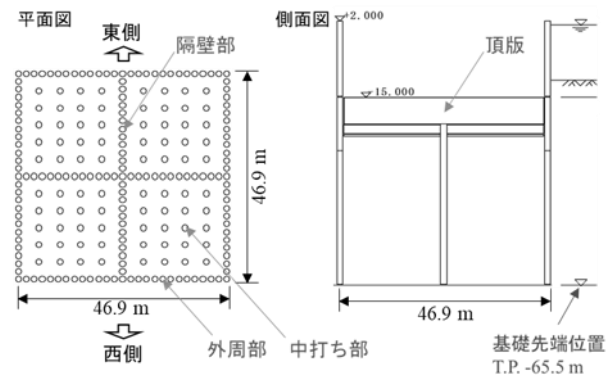


図-5 3P主塔基礎諸元

(3) 入力値

とう曲変位による作用外力として，基礎天端に上部工反力を，基礎底面，側面にとう曲変位に伴う地盤変形を地盤バネを介して基礎に考慮し，地震の影響も同様に考慮する。

a) とう曲変位による作用外力

地盤変形について，既往の検討¹⁾では，とう曲傾斜角が60°（最大鉛直変位1.47 m，最大水平変位0.85 m）と80°（最大鉛直変位1.47 m，最大水平変位0.26 m）の逆断層となる2ケースを検討することとしている。本稿では，地盤の水平方向変形量の大きいとう曲傾斜角60°を対象とし，2次元線形FEM解析により3P主塔周辺地盤の変形量を求めた。図-6に地盤変形概要図を，表-3に節点番号1~4の地盤変形量を示しており，地盤全体が鉛直上方向かつ東方向（図-6を参照）に移動するような挙動となっている。代表点として節点番号1~4を示しているが，その間の各節点にもそれぞれ地盤変形量を入力する。

上部工反力については，地盤変形による橋梁全体

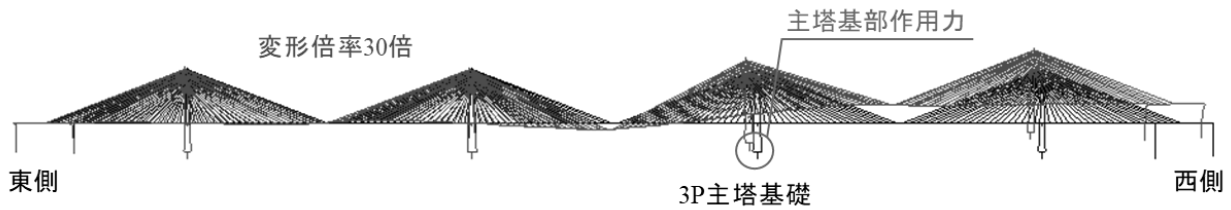


図-7 橋梁全体系影響解析変形図（変形倍率 30 倍）

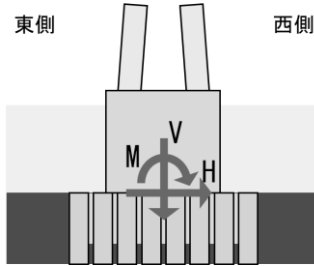


表-4 主塔基部作用力

	とう曲変位時	道路橋示方書標準波 (レベル2, タイプI, III種地盤)
軸力 V [kN]	393,169	417,158
せん断力 H [kN]	18,166	103,366
橋軸曲げ M [kN・m]	2,009,976	12,186,716

系への影響解析⁵⁾より、地盤変形に対する橋梁側の抵抗として、主塔基部作用力（基礎天端の作用力）を考慮する。図-7に橋梁全体系影響解析変形図を、表-4に主塔基部作用力を示している。図-7に示す通り、とう曲変位により、3P、4P主塔が持ち上がり東側に移動するため、橋梁全体が西側から東側に圧縮されるような挙動となっている。

モデル化しているため地表面波を使用し、地盤変形算出時は基礎からの波形入力を行うため地表面波の引き戻し解析を行う。

地盤変形量は地盤地震応答解析プログラムのSHAKEを用いて算出する。支持層であるDsc1層の下方に平均せん断弾性波速度 $V_s = 300$ [m/s]を下回るDc1層を含むため、その下層にあたるDsc2層 ($V_s = 439$ [m/s])を基礎層としモデル化を行う。安全側の検討を行うため、適用する変位量は、時刻歴において基礎が最も変形する時刻の変形挙動を取り出して適用する必要がある。杭先端と頂版下面の相対変位量が最も大きくなる時刻の変位量を用いる。タイプI-III-1,2,3を比較した結果、タイプI-III-2の値が最も大きく、その変位量を採用することとした(図-8)。とう曲変位による地盤変形と併せて大規模地震時の地盤閉経量を図-5、表-3に示している。大規模地震時の地盤変形は、T.P. -27 m付近から海底面にかけて、基礎を水平方向に変形させるような挙動となっている。

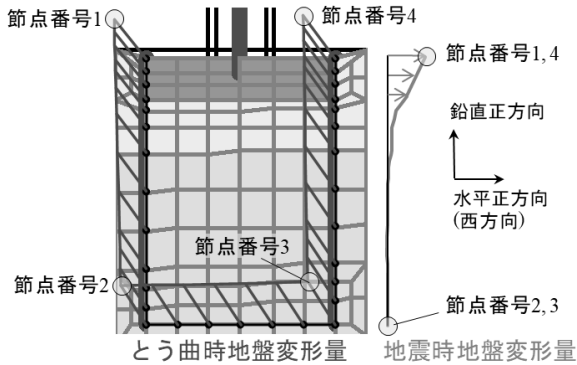


図-6 地盤変形概要図（とう曲傾斜角 60° ，道路橋示方書標準波）

表-3 地盤変形量（とう曲傾斜角 60° ，道路橋示方書標準波）

節点番号	水平変位	鉛直変位
1	-0.531 m (+0.679 m)	0.649 m
2	-0.423 m (+0.000 m)	0.645 m
3	-0.457 m (+0.000 m)	0.710 m
4	-0.531 m (+0.679 m)	0.710 m

※ ()内は道路橋示方書標準波による地盤変形

b) 大規模地震（道路橋示方書標準波）による作用外力

今回対象としている摩耶とう曲は、大阪湾断層における断層変位により変形が生じることを想定していることから、大規模地震波として道路橋示方書標準波（レベル2地震III種地盤）について検討を行う。タイプIとタイプIIのうち、基部作用力の大きいタイプIを対象とした。上部工解析は基礎天端から上を

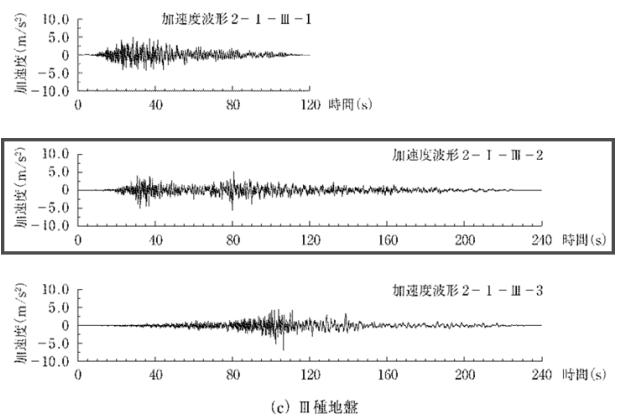


図-8 道路橋示方書標準波（レベル2地震動，タイプI，III種地盤）²⁾

上部工反力（基部作用力）は橋梁全体系解析を用いて算出する。橋梁全体系解析は3次元非線形骨組モデルを用いるが、基礎のモデルには、基礎形状を決定した仮想井筒梁モデルより算出したS-R連成バ

ネを用いる。地盤変形量算出と同様、道路橋示方書標準波のタイプI-III-2を入力して解析する。表-4にとう曲変位時と併せて主塔基部作用力を示す。基部作用力の抽出においては、地盤変形最大時と基部作用力最大時の時刻歴同時性を考慮することが考えられるが、本検討は手法の一提案としての感度分析位置付けであるため、便宜上最大地盤変形量と最大基部作用力を同時に考慮し算出する。

c) とう曲変位と組合せる大規模地震作用方向

図-9(a)のとう曲変位時の作用外力方向図から分かるように、とう曲変位は地盤変形方向（東方向）と上部工反力方向（西方向）が相反する。それに対し、地震は地盤変形方向と上部工反力方向が同一方向かつ東西方向に交互にかかる荷重（図-9(b)）であるため、とう曲変位時の作用外力と組み合わせる際の地震時の作用外力の方向をどちらとしたら安全側となるか検証を行う必要がある。大規模地震作用方向を東西変え、Case1. とう曲変位時の地盤変位方向、Case2. とう曲変位時の基部作用力方向の2ケースについて、検討を行うこととした。

表-4に示している道路橋示方書標準波による主塔基部作用力は、とう曲変位時の基部作用力方向（西方向）に作用する場合の値を示しており、とう曲変位時の地盤変形方向（東方向）に作用する場合は、せん断力Hと橋軸曲げMの値が負となる。

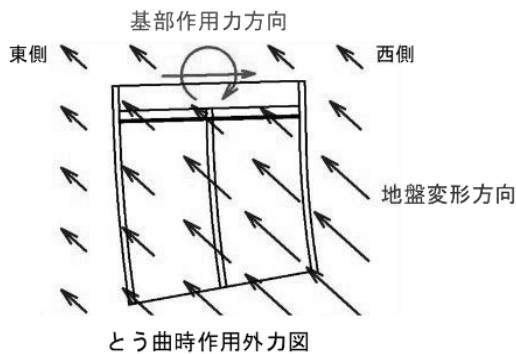
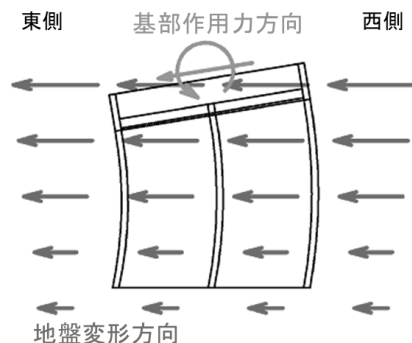
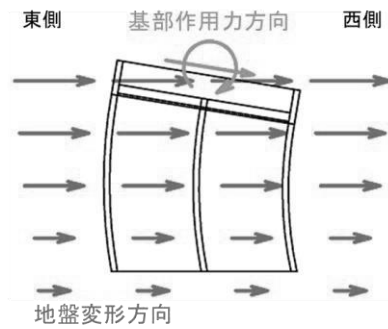


図-9(a) とう曲変位時の作用外力方向図



Case1. とう曲変位時の地盤変位方向

図-9(b-1) とう曲変位と組合せる大規模地震作用方向図 (Case1)



Case2. とう曲変位時の基部作用力方向

図-9(b-2) とう曲変位と組合せる大規模地震作用方向図 (Case2)

3. 解析結果

2. (2)にて検討した立体骨組解析モデルに、2. (3)で検討した作用外力2ケースを入力し解析を行った。結果として、図-10に鋼管矢板基礎変形図を示す。

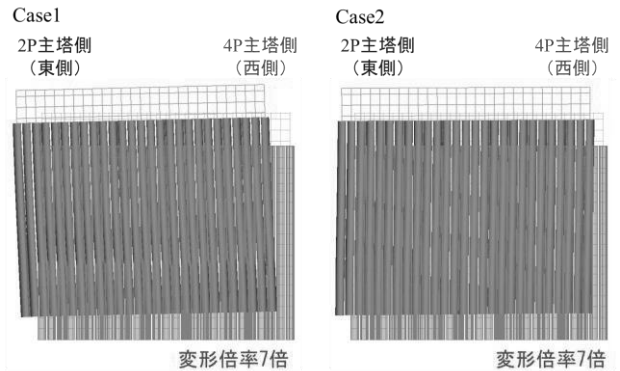


図-10(a) 変形図 (側面図)

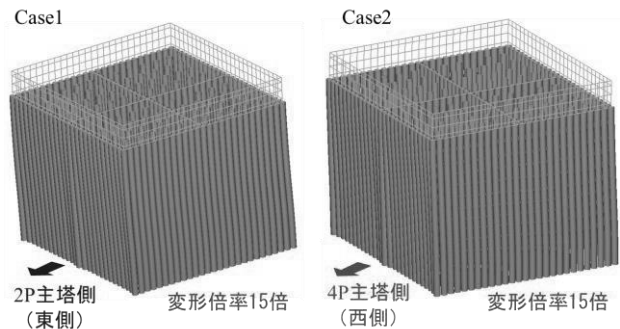


図-10(b) 変形図 (俯瞰図)

作用方向により鋼管矢板基礎の変形方向がCase1, Case2それぞれ東西逆となった。この要因としては、とう曲変位と大規模地震それぞれによる基部作用力を比較すると、特にせん断力と曲げモーメントにおいて、大規模地震の方が大きいことから、基礎全体の変形方向においては、大規模地震の作用方向の影響が大きいことが挙げられる。地盤変形と基部作用力の組み合わせに着目すると、図-8に示す通り、Case1はとう曲変位と大規模地震それぞれによる基

部作用力が相反するため打ち消し合う傾向にあり、地盤変形は東方向に増幅される傾向にあるため、図-10のように基礎全体が東方向に変形していると考えられる。それに対しCase2は、とう曲変位と大規模地震それぞれによる基部作用力が西方向と一致しているため増幅される傾向にあり、地盤変形は作用方向がそれぞれ相反するため打ち消し合い、基礎全体が西方向に変形していると考えられる。

表-1の部材の限界状態照査において、道路橋示方書の照査項目①～⑤について、各応答値、作用断面力を確認した結果を図-10～13に示す。

照査項目①について、上部工慣性力作用位置の変位は、Case2の方が若干大きいですが、2ケースともに基礎降伏の疑われるような変位量の急変は見られなかった(図-11)。

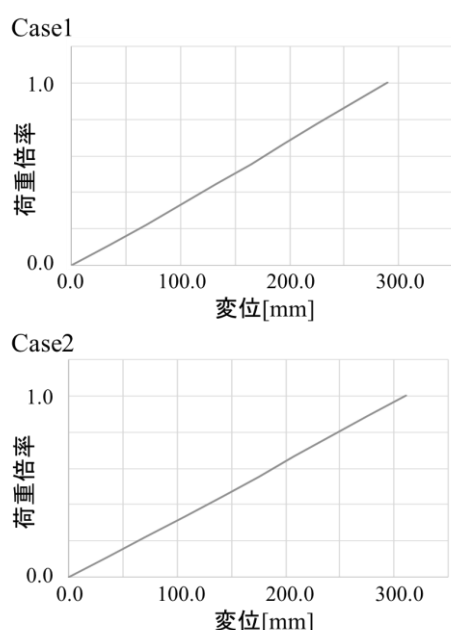


図-11 上部工慣性力作用位置の変位 (照査項目①)

照査項目②、③について、図-12は基礎底面支持状況として、極限支持杭と浮き上がり杭の分布を平面図で示している。極限支持力に至る押し込み杭は2ケースともに0本であるが、底面の浮上り範囲は地震作用方向により発生箇所が東西反転する。これは前述したように、とう曲変位と大規模地震それぞれによる基部作用力を比較すると、大規模地震の基部作用力が大きいことが原因と考えられる。浮上り率はCase1が35.6%、Case2が38.2%と、Case2がわずかに上回るものの、その割合は制限値60%を下回っていることが確認された。

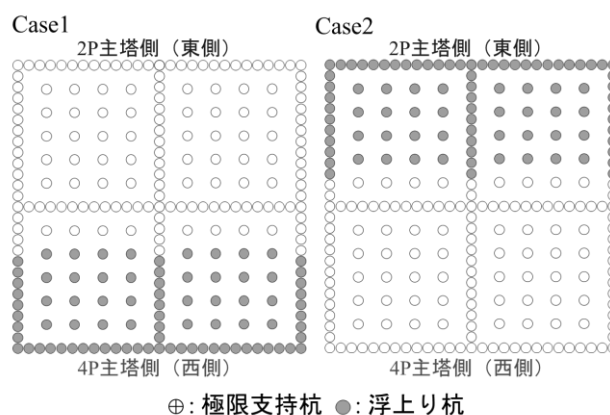


図-12 基礎底面支持状況平面図 (照査項目②、③)

照査項目④について、図-13は外周部の杭のうち、杭頭部の曲げ圧縮応力が最も大きい鋼管杭、1/4番目に大きい杭、そして降伏杭の分布を平面図で示している。Case1の地盤変位はとう曲変位と地震時変位方向が一致しているが、基部作用力方向は相反しているため、杭体応力度は降伏を超える杭は見られない。それに対し、Case2の基部作用力はとう曲変位時と地震時作用力方向が一致していることから、Case1に比べ杭体応力度は厳しく、19.2%の外周部の杭が降伏する。ただしその割合は基礎が降伏したと判定する基準である25%には至らないことが確認された。

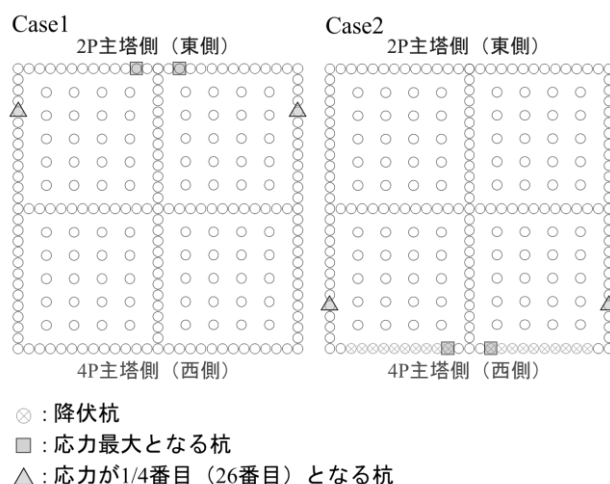


図-13 杭頭部の曲げ圧縮応力の平面分布 (照査項目④)

照査項目⑤について、図-14に示す通り、杭-頂版の接合部に発生するせん断力の最大値を確認したところ、Case1が8946.9 kN、Case2が10957.2 kNとCase2の方が大きいですが、2ケースともにせん断力の制限値11148kNを下回っている。必要スタッド本数はこのせん断力の最大値より求まるが、Case1が129本、Case2が158本と最大設置可能本数160本を下回っており、通常のスタッド接合で必要な耐力を確保できる程度である。

表-5 限界状態照査結果一覧

照査項目				照査結果 (降伏比)		制限値
				Case-1 とう曲変位時の 地盤変位方向	Case-2 とう曲変位時の 基部作用力方向	
①	上部工慣性力 作用位置	変位量	[mm]	289.9 (-)	310.7 (-)	制限値なし
		変位急増点	-	なし (-)	なし (-)	基礎降伏が疑われる変位 急増点の有無
②	極限支持		[%]	0.0 (0.00)	0.00 (0.00)	25%以上で降伏
③	支持+浮上り		[%]	35.6 (0.59)	38.2 (0.64)	60%以上で降伏
④	杭体直応力	杭体降伏率	[%]	0.0 (0.00)	19.2 (0.77)	25%以上で降伏
⑤	杭-頂版接合部 (杭1本に対し)	せん断力	[kN]	8946.9 (0.80)	10957.2 (0.98)	11148 [kN]
		必要スタッド本数	[本]	129 (-)	158 (-)	D22 スタッド 最大設置可能本数 160 本
⑥	継手管降伏	相対ずれ最大量	[mm]	7.16 (0.72)	6.65 (0.67)	特性値 10mm

道路橋示方書の照査に含まれない照査項目⑥について、継手管の相対ずれ最大量を確認した、図-15に継手管せん断ずれ分布を示しており、最大鉛直ずれが生じている箇所と継手管の降伏範囲（1.83 mm以上のずれ）を示している。最大鉛直ずれ量は、Case1は7.16 mm、Case2は6.65 mm程度である。以上より、どちらのケースも最大鉛直ずれが鉛直せん断変形量がせん断耐力が低下しはじめる変位量（特性値）に相当する10 mm以下に収まっていることを確認した。

以上の結果をまとめた限界状態照査結果の一覧を表-5に示す。いずれの照査項目に対しても限界状態以下に収まっており、要求性能を満足している。

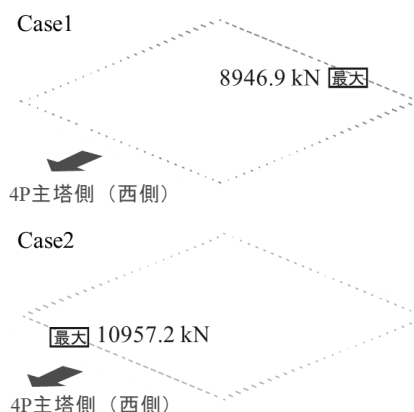


図-14 杭-頂版接合部作用せん断力 (照査項目⑤)

4. まとめ

大阪湾岸道路西伸部の橋梁設計において、とう曲変位に対する基礎の安全性検討手法の一提案を行った。とう曲影響を適切に考慮するために、どのような作用外力が考えられるか、図-2のフローのように検討し、とう曲変位時に発生する地震動の影響と、とう曲変位による影響を静的に足し合せて解析を行うことで、基礎に対すとう曲影響を適切に考慮可能と考えた。とう曲変位と大規模地震動に伴う地盤変形により鋼管矢板基礎の井筒部は断面保持されないと考え、井筒断面の変形を考慮できる立体骨組解析を用いる。また、本検討手法を今後用いる場合の留意点として下記を記す、

- 1) とう曲変位と組合せる大規模地震の作用方向の検討の結果、とう曲変位時の基部作用力方向に大規模地震による作用外力を作用させるべきと考える。しかし、この傾向は本検討における入力値の条件に依存する可能性があるため、異なる解析条件において、本稿で提案する手法を用いる場合は、とう曲変位と組合せる大規模地震の作用方向の検討の実施が必要と考えられる。
- 2) 大規模地震による基部作用力の抽出においては、地盤変形最大時と基部作用力最大時の時刻歴同時性を考慮する。

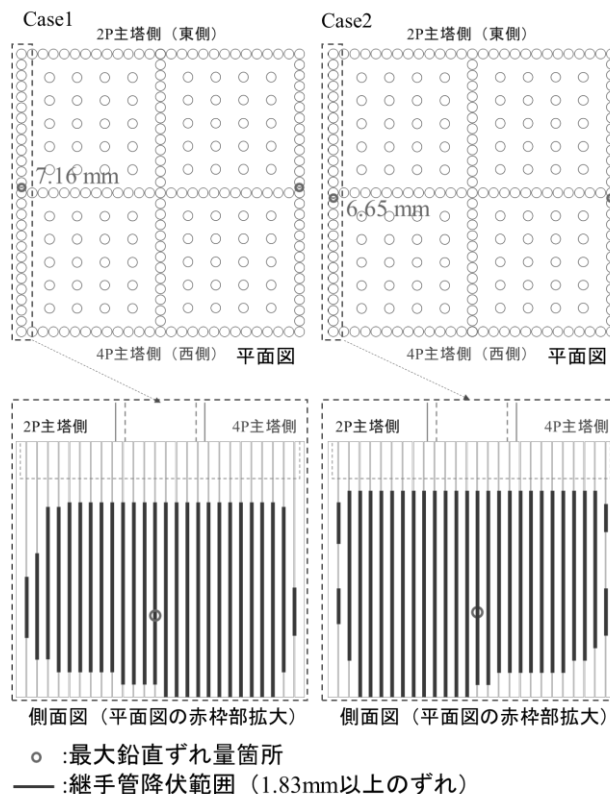


図-15 継手管せん断ずれ分布 (照査項目⑥)

謝辞：本検討にあたっては、大阪湾岸道路西伸部技術検討委員会（委員長：横浜国立大学藤野陽三上席特別教授）の委員の方々、並びに共同事業者である国土交通省の方々に貴重なご意見をいただいた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 安積恭子，岡上政史，杉山裕樹，井上直人，北田奈緒子：大阪湾岸道路西伸部の橋梁設計において考慮する断層変位量の検討，土木学会第76回年次学術講演会，2021
- 2) （社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，2017
- 3) 鋼管杭協会道路・橋梁委員会：縞鋼管継手を用いた鋼管矢板基礎，テクニカルノート，2006
- 4) 服部匡洋，西原知彦，小坂崇，宮崎祐輔，澤村康生，木村亮：縞鋼管工耐力継手の水平せん断及び圧縮・引張試験と鋼管矢板基礎設計への適用，第23回橋梁等の耐震設計シンポジウム，2020
- 5) 佐藤彰紀・杉山裕樹・吉澤努・後閑勇：大阪湾岸道路西伸部の長大斜張橋（新港・灘浜航路部）に対するとう曲変位の影響検討，第24回橋梁等の耐震設計シンポジウム，2021