

新港・灘浜航路部における 連続斜張橋に対するとう曲変位の影響検討

阪神高速道路(株)建設事業本部神戸建設部湾岸西伸第一建設事業所 安積 恭子
 阪神高速道路(株)建設事業本部神戸建設部湾岸西伸第一建設事業所 杉山 裕樹
 阪神高速道路(株)管理本部管理企画部保全技術課 佐藤 彰紀

要 旨



大阪湾岸道路西伸部の計画区間のうち、新港・灘浜航路部においては摩耶断層の存在が推定されており、摩耶断層による断層変位が生じる可能性がある。当該断層による変位は、深さ 2,000m に渡り堆積した地層にとう曲として現出するが、その位置やとう曲変位量に不明な点が多い。


橋梁の計画・設計においては、これらの断層（とう曲）の影響を適切に考慮する必要があることから、海上音波探査およびボーリング調査を実施してとう曲位置および変位量の推定を行い、推定した変位量を用いて新港・灘浜航路部に計画されている連続斜張橋への影響検討を行った。影響検討の一部として、単独斜張橋との比較も実施した。また、とう曲の推定変位量には不確実性を有するため、とう曲変位量、とう曲傾斜角についてパラメータスタディを行うことで不確実性の影響を考慮することとした。その結果、推定されたとう曲変位による上部構造への影響は、安全性に影響を与える程度ではなく、構造系の異なる単独斜張橋と比べても連続斜張橋がとう曲影響に対して優位であることを確認した。

本稿では、この一連の検討を報告する。

キーワード: 大阪湾岸道路西伸部、断層変位、とう曲、長大斜張橋、FEM 解析、漸増変位解析

はじめに

阪神臨海地域の交通渋滞の緩和による人流・物流の効率化を図るとともに、同地域の魅力を高め、将来の関西圏の飛躍を通じた国土の成長に貢献することを目的に、計画コンセプト  に基づき  に示す大阪湾岸道路西伸部（六甲アイランド～駒栄）全長 14.5km の道路整備を進めている。

そのうち、六甲アイランドとポートアイランドを結ぶ海上部においては長大斜張橋の検討を進めている。一方、本計画路線には  のように


大阪湾断層が分布しており、そのうち北端部である六甲アイランドとポートアイランドの間には  のように摩耶断層の存在が推定されている。



図-1 大阪湾岸道路西伸部位置図

これらの断層は、深さ 2,000m に渡り堆積した地層にとう曲として現出するが、その位置や変位量に不明な点が多い。

計画コンセプト 1) の1つとして「災害時においても、人流・物流ネットワーク機能を確保できる道路」を掲げていることから、摩耶断層が活動することによる断層変位が橋梁に与える影響を把握して、安全性を確認することが重要である。

こうした背景を受け、摩耶断層を跨ぐ新港・灘浜航路部の長大斜張橋においては、とう曲の影響を適切に考慮し、影響検討を行うことで長大斜張橋における安全性を確認することとした。図-4 に本論文の検討フローを示す。

1. 摩耶断層におけるとう曲変位量の推定

1995 年の兵庫県南部地震後に海上保安庁水路部、地質調査所（現：産業技術総合研究所）によって行われた調査結果 3),4) より、大阪湾の西側には淡路島に沿って大阪湾断層が分布することが明らかになった。全体として長さは約 39km で、北東-南西方向に延びており、断層帯の西側が東側に対して相対的に隆起する逆断層が卓越する（右横ずれ成分も含む）断層である。ほぼ直線上に分布する連続した断層から、全体が 1 区間として活動すると考えられている。

断層は深さ 2,000m に渡って堆積した地層にとう曲として現出するが、海底に存在するため、その分布状況は反射法地震探査側線の断面解析から得られる情報で推定されている。今回、架橋地点においてとう曲の位置や特性を精度よく確認・推定するために、ボーリング調査および音波探査を実施した。

1-1 地質調査

過去の断層活動により地層が変形を受けていると思われる場所をとう曲帯と考え、その分布を検討した。図-5 に今回実施した調査位置図を示す。海上音波探査については、海底下 100m 以浅を対象とし、ボーリング調査については、複数のボー

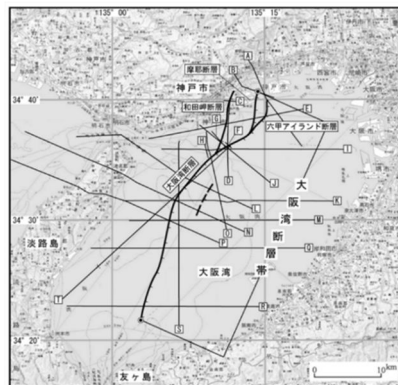


図-2 大阪湾における断層分布 2)

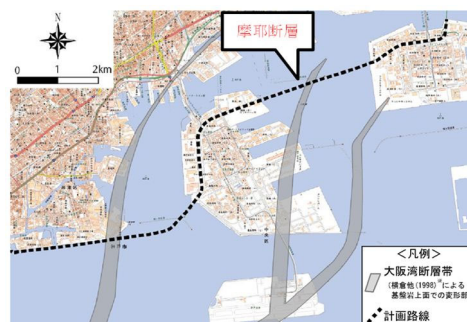


図-3 摩耶断層位置 3)

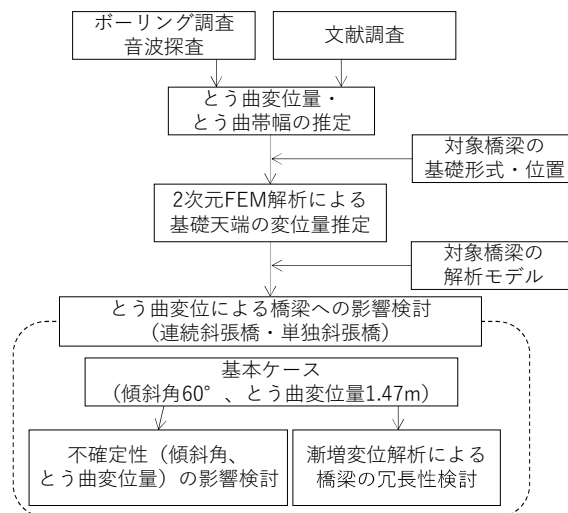


図-4 検討フロー

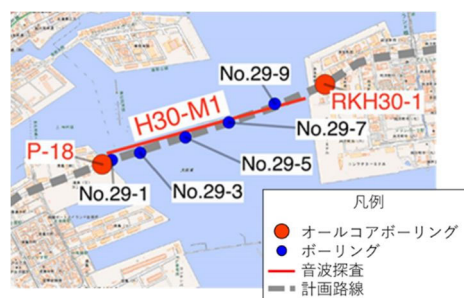


図-5 現地調査位置

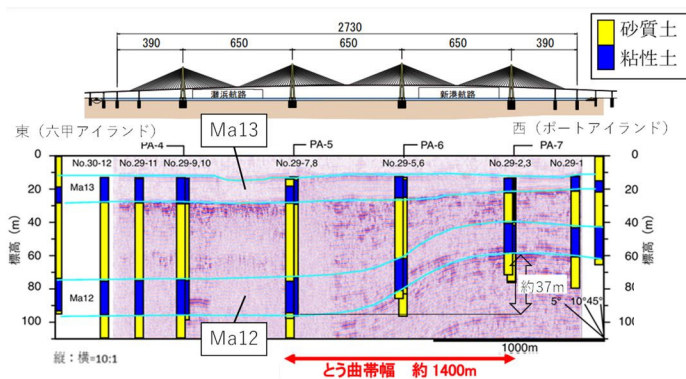


図-6 ボーリング情報と

海上音波探査結果を合わせた断面図

リングコア資料を用いて、とう曲の変形の有無や変形量の把握を行う。

1-2 調査結果

ボーリング分析結果を音波探査断面に投影した結果を図-6 に示す。図-6 より、とう曲変形幅は約 1400m と評価できる。また、Ma12 層は顕著なとう曲構造を確認できること等から、とう曲変位量の推定に利用できる情報は Ma12 層基底の落差が適切な情報であると考えられる。ここで、Ma12 層の落差推定方法を図-7 に示す。落差 D1 はとう曲変形幅以外の位置における標高差を、ボーリング調査結果から読み取ることで求める。これより Ma12 層の基底の落差は約 37m と読み取ることができる。

1-3 とう曲変位量の推定

1-2 の調査結果を用いて、変位量の推定を行う。

(1) 平均変位速度の推定

平均変位速度は Ma12 層の落差 D を地層の堆積年代で除して求める。Ma12 層の堆積年代は既往文献⁹⁾より約 12.7 万年前とすると、 $37\text{m} \div 12.7 \text{ 万年} = 0.294\text{m/千年}$ となる。

(2) 平均活動間隔の推定

大阪湾断層の平均活動間隔については既往の文献による推定が行われており、神戸空港建設時のボーリング調査⁶⁾では平均活動間隔を約 1500 年～4400 年としているが、活動間隔が長くなれば 1 回の変位量が大きくなることから、上記調査にて

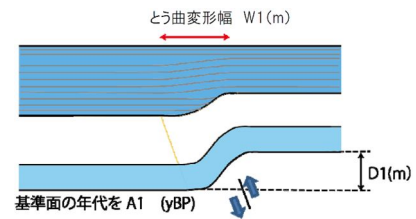


図-7 落差 (D1) 推定方法

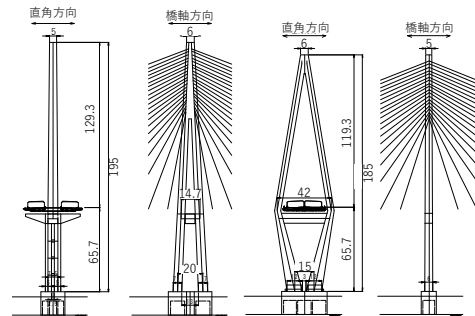


図-8 主塔の構造 (単位 : m)

(左 : 連続斜張橋, 右 : 単独斜張橋)

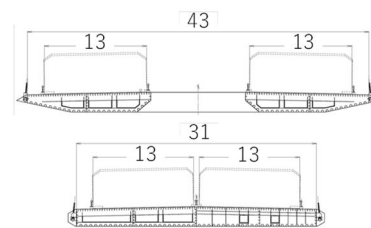


図-9 主桁の構造 (単位 : m)

(上 : 連続斜張橋, 下 : 単独斜張橋)

検討された複数の活動間隔の中から保守的な値を採用することが望ましいと考え、平均活動間隔は 5000 年と設定する。

(3) とう曲変位量の推定⁷⁾

(1) で求めた平均変位速度に (2) で設定した大阪湾断層の平均活動間隔 (千年/回) を乗じることで断層活動 1 回あたりのずれ量 (とう曲変位量) を算定すると、1.47m/回と推定できる。

2. 対象橋梁

検討対象とする橋梁形式は、「連続斜張橋」とその比較対象として「単独斜張橋」の 2 種類とした。図-8 および図-9 に示すように、連続斜張橋は主桁を鋼一箱桁×2 主桁、主塔を鋼製橋軸 A 型、橋脚を RC 橋脚とし、単独斜張橋は主桁を鋼一箱桁、主塔を鋼製ダイヤ型、橋脚を RC 橋脚とする。

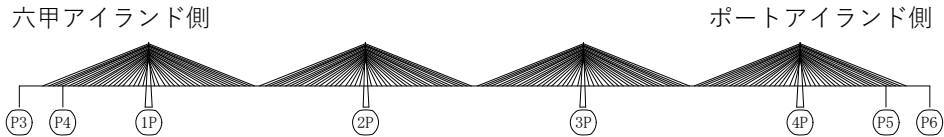


図-10 対象橋梁一般図（連続斜張橋）

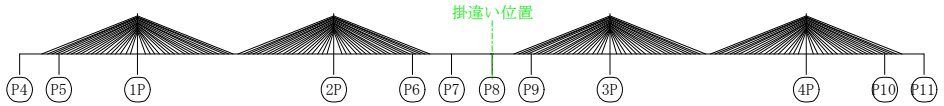


図-11 対象橋梁一般図（単独斜張橋）

連続斜張橋の一般図を図-10 に示す。連続斜張橋の主桁は P3 橋脚～P6 橋脚まで連続している。主桁は上下線分離の 2 主桁であり、主桁同士は 15m 間隔の横梁で連結されている。単独斜張橋の一般図を図-11 に示す。単独斜張橋は P3 橋脚～P8 橋脚、P8 橋脚～P11 橋脚が連続しており、P8 橋脚で掛違いとなっている。

両モデルとも、隣接径間との桁遊間は L2 地震動時の桁移動量から 1,000mm に設定する。

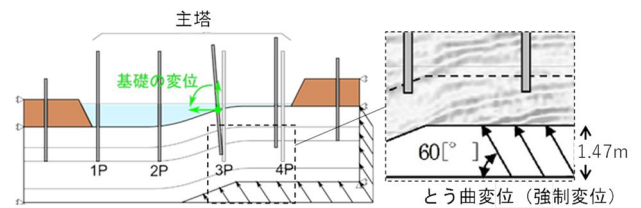


図-12 FEM 解析による
基礎変位の算出（概略図）

3. とう曲変位時の橋梁基礎天端変位量の推定

新港・灘浜航路部の地盤を対象に、前章で設定したとう曲変位量を Ma12 層下面に強制変位として作用させる 2 次元線形 FEM 解析を実施した。強制変位は図-12 のように鉛直方向には 1.47m とし、水平方向には解析で用いる傾斜角の値に応じて設定する。変形幅については、とう曲帯幅より設定する。また、橋梁については、基礎と主塔、橋脚のみをモデル化している。

3-1 解析条件

FEM に用いる土質パラメータについては、周辺部で実施している原位置試験結果や室内土質試験結果、既往の文献などから設定する。これにより、橋梁の各主塔および橋脚基礎天端位置での鉛直変位量、水平変位量、回転角（いずれも橋軸方向）を算定する。

(1) 傾斜角

強制変位を Ma12 層下面に入力する際には、断

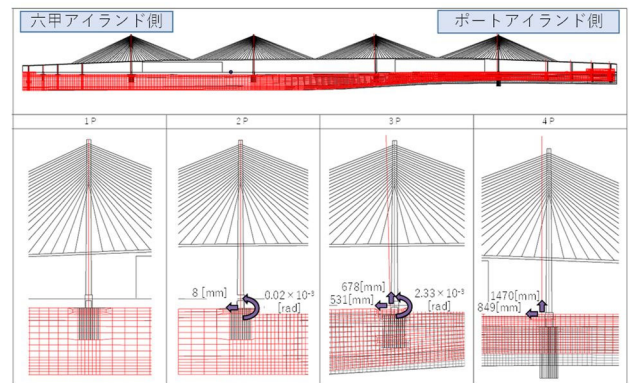


図-13 橋梁基礎天端変位量
（橋梁形式：連続斜張橋、
とう曲傾斜角：60° のケース）

層の傾斜角を考慮する。地震調査研究推進本部による「大阪湾断層帯の評価」では地質構造、反射法音波探査結果より傾斜角を 60～80°（地下 3km 以浅）と推定していることから、本検討では、とう曲帯における断層変形の角度を 60° と 80° を基本とし、不確定性による変動を考慮したケースとして、水平方向の変位が大きくなる 45° のケースも実施した。

(2) 傾斜角およびとう曲変位量を踏まえた強制変位量

断層活動 1 回あたりのとう曲変位量は活動間隔

表-3 漸増変位解析モデルの条件

部材	モデル化	使用材料	
		連続斜張橋	単独斜張橋
主桁	線形はり要素	SM490Y	SM490Y
主塔	ファイバー要素	SM400 SM490Y SM570	SM490Y
橋脚	線形はり要素	$\Sigma ck = 30N/mm^2$, SD490	
ケーブル	非抗圧トラス要素	引張強度1570N/mm ² 以上	
支承	バイリニア要素	免震支承	免震支承
弾性拘束ケーブル	バイリニア要素	主塔位置	-
基礎-地盤系	線形バネ要素 (S-R)		

連続斜張橋では、断層変位の影響が構造物全体に及ぶため、主桁の曲げ応力などの変動が単独斜張橋よりやや大きい。始点側及び終点側の桁遊間は断層変位によりやや減少するが 900mm 近くが残されている。一方、単独斜張橋の掛違い部の桁遊間は、断層変位の影響で 398mm まで狭くなり、桁遊間の観点では連続斜張橋が優位な結果となる。ただ、いずれの橋梁形式においても各部材は弾性範囲内に収まり、致命的な状態には至らない結果となった。

(3) 不確定性の影響（とう曲変位量）¹¹⁾

変位倍率と掛違い部の遊間の関係を図-16 に示す。連続斜張橋においては、設定した不確定性の影響が顕著にみられるものはなかった。一方、単独斜張橋のとう曲 60° のケースでは航路間の掛違い部において変位倍率 $\alpha=1.6$ 程度で桁衝突が生じるため、とう曲変位量を推定する際の活動間隔が想定より長い場合は桁衝突の可能性があると考えられる。

(4) 不確定性の影響（傾斜角）¹¹⁾

とう曲角度と掛違い部の遊間の関係を図-17 に示す。連続斜張橋においては、設定した不確定性の影響が顕著にみられるものはなかった。一方、単独斜張橋では 45° のケースでは、掛違い部の遊間が 1000mm から 35mm まで減少し、桁衝突に近い状態となっている。これより、傾斜角がより小さい状態でとう曲変位が生じた場合は桁衝突の可能性があると考えられる。

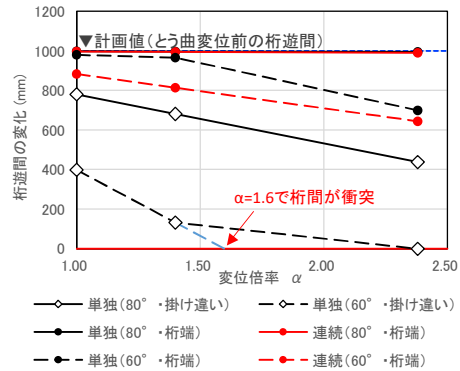


図-16 変位倍率と桁遊間

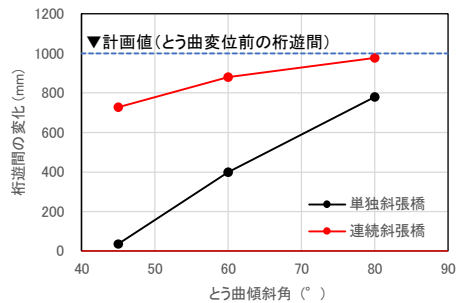


図-17 とう曲傾斜角と桁遊間

4-2 漸増変位解析による橋梁の冗長性の検討

(1) 橋梁モデルおよび解析方法

各部材の降伏後の挙動を確認することを目的として、とう曲変位量を倍加させる漸増変位解析を幾何学非線形性および材料非線形性を考慮できる複合非線形解析にて行う。表-3 にモデル化の条件と材料強度を示す。

軸力と曲げの作用が連成する主塔については、降伏後の影響を確認するためにファイバー要素でモデル化を行う。なお、橋脚については支承の破壊（せん断ひずみ 300%で支承破断を想定）が先行する耐力の階層となるよう設計することを想定し、ここでは塑性化には着目しないこととした。

(2) 解析結果¹²⁾

橋梁全体系の冗長性の検討として、とう曲変位量（とう曲角度 60°）を漸増させ、連続斜張橋と単独斜張橋の各部の損傷順序を整理した結果を表-4 に示す。単独斜張橋において掛違い部（P8 橋脚）の桁衝突が変位倍率 1.6 倍で発生しており、さらに斜張橋の安全性に最も重要な主塔の降伏についても連続斜張橋に比べて小さい変位倍率で生じる。なお、両形式とも、変位倍率 7~9 倍程度

でポートアイランド側の高架橋の主桁が橋脚の桁かかりから落橋する。したがって、落橋という観点からは大差がない結果であるが、掛違い部の桁衝突や主塔の降伏の観点から、連続斜張橋は単独斜張橋に比べてとう曲変位に対する冗長性が高いと考えられる。

5. 連続斜張橋と単独斜張橋の緊急時の点検性および修復性

図-18のように、単独斜張橋の掛違い部は2つの航路に挟まれ、かつ防波堤や係留施設も近接する狭隘空間である。一方、連続斜張橋の桁端部は陸上部から近く、復旧が必要な場合も近接が比較的容易である。とう曲変位後の点検、補修あるいは復旧を行う場合、単独斜張橋の方が桁端部の点検性や復旧性が低いと考えられる。その他の箇所に関しては、単独斜張橋と連続斜張橋とで解析上明確な差はみられず、点検性、修復性は同程度と考えられる。以上より、総合的には連続斜張橋の方が緊急時の点検性および修復性に優れていると考えられる。

6. まとめ

大阪湾岸道路西伸部で計画されている長大斜張橋が跨ぐ摩耶断層において、文献調査や地質調査などからとう曲幅および断層活動1回あたりの

表-4 漸増変位解析による部材の損傷順序
(主塔、桁着目)

変位倍率	発生期間(年/回)	断層最大鉛直変位(m)	連続斜張橋		単独斜張橋	
			変位倍率	発生イベント	変位倍率	発生イベント
1	5,000	1.47			1.60	P8掛け違い部桁衝突
2	10,000	2.94				
3	15,000	4.41				
4	20,000	5.88				
5	25,000	7.35			5.20	ポーアイ側桁衝突
6	30,000	8.82	6.60	ポーアイ側桁衝突	5.36	3P主塔柱基部降伏
			6.80	4P主塔柱基部降伏		
			7.08	3P主塔柱基部降伏		
7	35,000	10.29			7.68	ポーアイ側隣接橋落橋
8	40,000	11.76			8.44	4P主塔柱基部降伏
9	45,000	13.23	9.00	ポーアイ側隣接橋落橋		
・						
・						
・						
20	100,000	29.40			20.18	掛け違い部桁落橋

ずれ量(とう曲変位量)を推定した。

上記を踏まえて設定した解析結果においては、連続斜張橋および単独斜張橋の構造安全性の致命的な差異はなかった。一方、とう曲の不確定性の影響によっては、単独斜張橋は桁衝突の可能性を有すること、また、単独斜張橋の掛違い部は狭隘空間にあり、点検性や復旧性が低いことがあげられる。これより、単独斜張橋は設計の想定と異なる状況に対して致命的な状態になる可能性を有している。

したがって、計画コンセプトの「災害時においても、人流・物流ネットワーク機能を確保できる道路」を踏まえると、連続斜張橋の方が比較対象である単独斜張橋よりも計画コンセプトへの適合性が高いと言える。

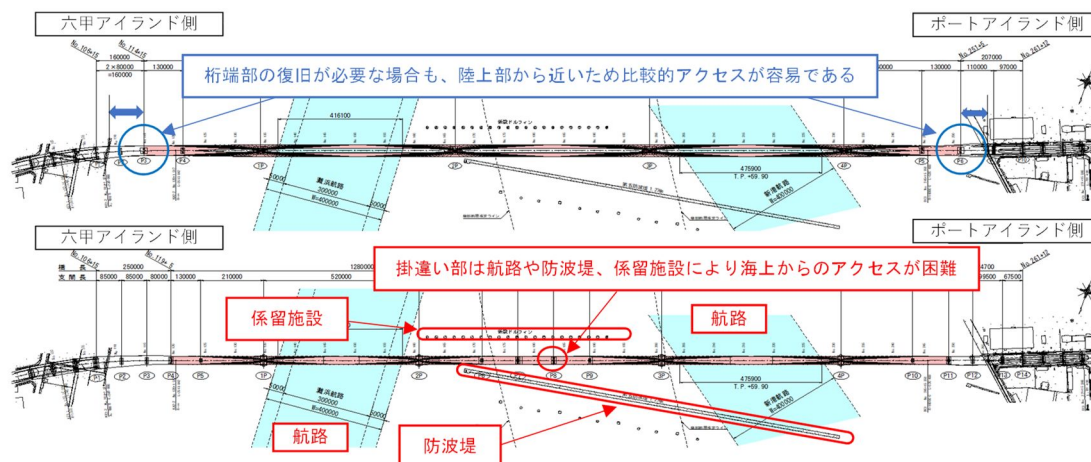


図-18 桁端部位置の比較(平面図)(上:連続斜張橋,下:単独斜張橋)

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：城西大学藤野陽三学長）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る。

参考文献

- 1) 杉山ほか：計画コンセプトと新港・灘浜航路部の橋梁計画，阪神高速道路技報第30号，2021
- 2) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：大阪湾断層帯の評価，平成17年1月，https://www.jishin.go.jp/main/chousa/katsudansou_pdf/98_osaka-wan.pdf
- 3) 横倉ほか：大阪湾における反射法深部構造探査，地質調査所月報，49，571-590，1998
- 4) 岩淵ほか：反射法音波探査に基づく大阪湾の基盤と活構造。海上保安庁水路部研究報告，36，1-23，2000
- 5) Itoh et al., H., Basin formation at a contractional bend of a large t ranscurrent fault: Plio-Pleistocene subsidence of the Kobe and nort han Osaka Basin, Japan, Tectonophysics, 321, 327-341, 2000.
- 6) 佐藤ほか：神戸空港建設プロジェクトにおける護岸と滑走路の耐震安全性の検討。土木学会論文集F Vol.62 No.3,502-512,2006.7
- 7) 安積ほか：大阪湾岸道路西伸部の橋梁設計において考慮するとう曲変位量の検討，土木学会第76回年次学術講演会，I-366, 2021
- 8) 七山ほか：大阪湾断層及び和田岬断層の完新世活動性調査，地質調査所速報，no.EQ/00/2（平成11年度活断層古地震研究調査概要報告書），179-193.
- 9) 佐藤ほか：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
- 10) 吉澤ほか：大阪湾岸道路西伸部の長大斜張橋（新港・灘浜航路部）に対すとう曲変位の影響検討（その1），土木学会第76回年次学術講演会，I-367. 2021
- 11) 佐藤ほか：大阪湾岸道路西伸部の長大斜張橋（新港・灘浜航路部）に対すとう曲変位の影響検討（その2），土木学会第76回年次学術講演会，I-368, 2021
- 12) 佐藤ほか：連続斜張橋の断層変位に対する構造冗長性検討～レジリエントな道路ネットワークを目指して～，阪神高速道路第52回技術発表会論文集，2020

STUDY ON STRUCTURAL REDUNDANCY AGAINST FLEXURAL DISPLACEMENT FOR A CONTINUOUS MULTI-SPAN CABLE-STAYED BRIDGE OVER THE SHINKO AND NADAHAMA SEA ROUTES

Kyoko AZUMI, Hiroki SUGIYAMA and Akinori SATO

The Osaka Bay Fault Zone exists beneath the area planned for the west extension of the Osaka Wangan Expressway. Flexure is expected to occur in the Shinko-Nadahama sea route area due to displacement at the Maya Fault. Since the position of the flexure and the amount of displacement are unknown, it is necessary to properly consider the effects of the fault in planning and designing a bridge for the area. An estimation was made for that purpose about the flexure position and displacement amount from marine sonic exploration and boring surveys. The study of the influence on the continuous multi-span cable-stayed bridge planned for the sea route area revealed that effects from the flexure would be only minor.

安積 恭子



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
Kyoko AZUMI

杉山 裕樹



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
Hiroki SUGIYAMA

佐藤 彰紀



阪神高速道路株式会社
管理本部 管理企画部
保全技術課
Akinori SATO