

三宝 JCT 土工部の性能に基づくレベル 2 地震対策

阪神高速道路(株)建設事業本部堺建設部設計課 山村 清
阪神高速道路(株)建設事業本部堺建設部設計課 小林 寛
阪神高速道路(株)建設事業本部堺建設部設計課 佐藤 彰紀

要 旨

現在建設中の大和川線三宝ジャンクションにおける道路土工について、性能に基づくレベル 2 地震対策の検討を行った。要求性能の設定においては、建設地が埋立地盤であることから、液状化による地盤沈下に伴って生じる路面の段差および縦断勾配の変化に着目し、既往の研究成果より許容値を決定した。無対策時の液状化による沈下量を解析的に照査した結果、段差および縦断勾配は許容値を超えることが確認された。これより、地盤沈下量の低減を目的とした液状化層の改良について、解析によって合理的な対策範囲を決定した。

キーワード: レベル 2 地震, 盛土, 埋立地盤, 液状化, 性能設計

はじめに

現在建設中の 6 号大和川線と 4 号湾岸線を接続する三宝ジャンクションは、既存の 4 号湾岸線の大阪市内方面対応の三宝出入路を改築・移設し、新たに湾岸線泉佐野方面への出入路を付加することで、図-1 に示すとおりフルジャンクションとして整備計画される。

建設地周辺には、隣接する堺浜に西日本で初めてとなる基幹的広域防災拠点整備されており、当ジャンクションは緊急輸送路ネットワークの重要な役割を担うこととなる。そのため大地震発生直後においても速やかに緊急車両等の走行が可能となることが期待される。一方、当該ジャンクション建設地の大部分は昭和 30 年代までに埋立てられた軟弱地盤であり、東日本大震災等での被災事例等から、このような条件に建設される擁壁・盛土区間についても、圧密沈下対策および耐震対

策の十分な検討が必要となる。

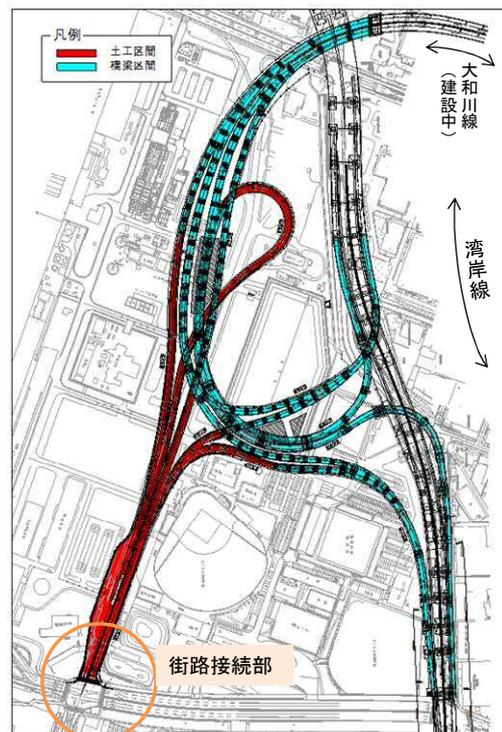


図-1 三宝ジャンクション

道路土工要領(平成 21 年度版) ¹⁾では、性能規定型指針を指向した改訂がなされており、地震作用として道路橋示方書 ²⁾に規定されるレベル 2 地震動までを想定することを基本とするとある。本ジャンクションのような重要度の高い構造物に対しては「性能 2：想定する作用による損傷が限定的なものにとどまり、土工構造物としての機能の回復が速やかに行い得る性能」を要求している。

要求する性能に対する照査については、道路土工-盛土工指針 ³⁾では基礎地盤及び盛土の変形照査を、道路土工-擁壁工指針 ⁴⁾では擁壁、基礎地盤及び背面盛土では変形照査、擁壁を構成する部材については断面力照査及び変形照査を行うこととされているが、照査方法や許容値について具体的な記述はない。

類似の盛土構造物である河川堤防では、地震に対する安全性を、堤防の沈下に伴う浸水等による二次災害の可能性の有無により照査することとしており、沈下量の推定方法や許容値について指針 ⁶⁾に示している。地震時沈下量の推定については、以前は過剰間隙水圧のみを考慮した安定計算や慣性力のみを考慮した安定計算から算定した最小安

全率から沈下量を経験的に推定する方法が採られていた ⁶⁾が、現在では有限要素法を用いた自重変形解析法や流体力学に基づく永久変形解析法を用いることができるとされている ⁵⁾。

三宝ジャンクション土工部の設計に於いて、道路土工要領 ¹⁾に示される耐震性能 2 を満たすべく全国に先駆けて性能規定型設計を試みた。照査項目は変形照査であるが、従来は変形の許容値も定められていないことから、道路面の変形をさせないために液状化を許容しないことを基本とし、莫大な費用をもって液状化層の全層改良をしていたところ、今回は既往の研究成果から許容沈下量の設定を行い、一定の液状化を許容することとし、その結果大幅なコスト縮減が可能となった。

1. 道路土工部構造概要と土質条件

三宝ジャンクションの道路土工区間は、**図- 1**に示すとおり街路に接続する出入口から橋台背面への擦り付け区間である。地質縦断図は**図- 2**に示すとおりであり、地表面から約 20m 深に埋立土層および沖積層の軟弱地盤が分布している。

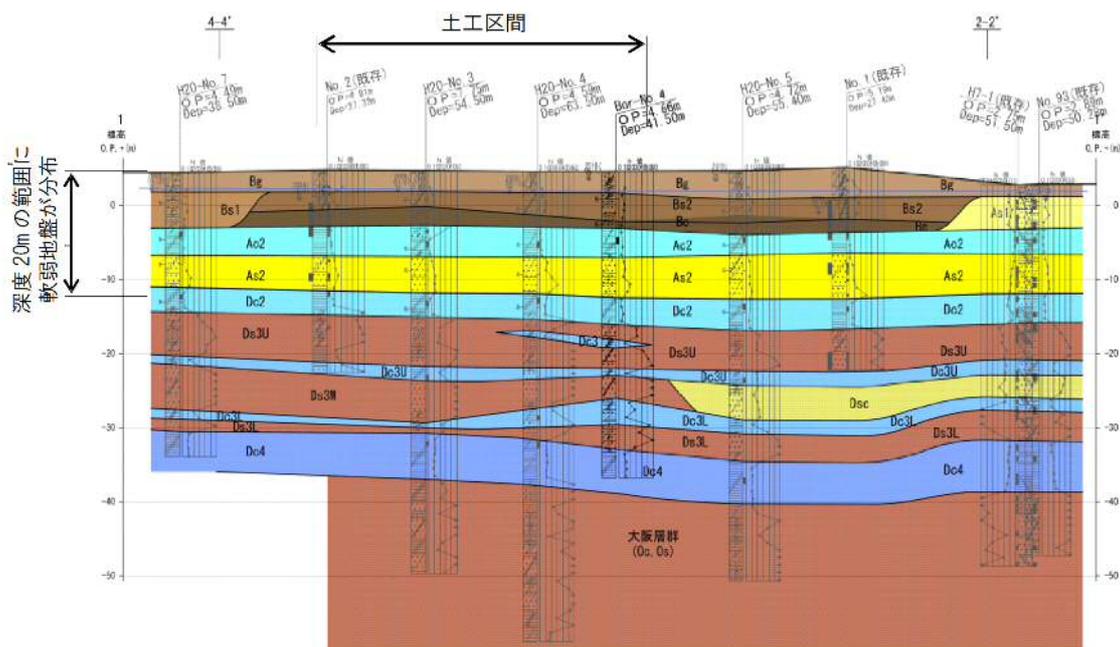


図- 2 ジャンクション部地質縦断図

Bg 層, Bs2 層, As2 層は道路橋示方書²⁾に示されるレベル1およびレベル2地震動に対する液状化判定において、いずれも液状化に対する抵抗率FL<1.0となっており、液状化が生じると判定される。このため、地震時には液状化の発生により地盤内間隙水圧の消散や地盤の側方流動に起因する路面の沈下が懸念された。

一方、圧密沈下については、一部の盛土区間において沈下層の圧密降伏応力より求めた限界盛土高さを超える区間があるため、このような区間については、プレロード等の先行圧密によると用地外の近接構造物への影響も懸念されることから、気泡混合軽量盛土(FCB)工法による対策を実施することとした。

2. 要求性能および照査基準

レベル2地震時における土工部の要求性能は、当該ジャンクションの道路ネットワークにおける重要性から、表-1に示すとおり道路土工・盛土

工指針³⁾における重要度1相当の性能2に設定し、地震後の復旧を容易に行うる限界状態を、変形の照査により担保することとした。しかしながらこの要求性能に対する設計上の許容値等の照査基準については指針にも示されておらず、一般化・定量化に至っていないのが現状である。

そこで、今回地震後の復旧性に加えて地震直後の緊急車両の通行可能性を満足できる照査基準を定め、地震後の変形(路面の段差や縦断勾配)を以下に示すとおり許容することにより、性能規定型の合理的な耐震設計を目指すこととした。路面に発生する段差については、常田らの検討⁷⁾に基づき、「停止的走行(0~10km/h)」あるいは「徐行走行(15~20km/h)」による暫定的な交通開放により通行機能が確保できる目安として25cmを許容値として設定した。また段差発生後の道路縦断勾配については、道路構造令⁸⁾に規定される最急勾配12%を許容値として設定することとした。設定した許容値を表-2および表-3に示す。

表-1 盛土の地震時における要求性能2

盛土の限界状態	構成要素	構成要素の限界状態	照査項目
想定する作用によって生じる盛土の変形・損傷が修復を容易に行い得る限界の状態	基礎地盤	復旧に支障となるような過大な変形や損傷が生じない限界の状態	変形
	盛土	損傷の修復を容易に行い得る限界の状態	変形

表-2 走行性を確保するための許容値

項目	基準値	備考
道路の勾配	12%以下	走行車両を想定して道路構造令に規定される最急勾配に準じて設定

表-3 段差の許容値

項目	基準値	備考
橋台背面部の段差	50cm以下	長さ8mの踏掛版設置を考慮する。現況最大6%の勾配に、8m踏掛版の高低差により生じる勾配を付加し、最急勾配12%で許容される高低差50cmと設定。
橋台背面以外の路面の段差	25cm以下	「停止的走行(0~10km/h)」あるいは「徐行走行(15~20km/h)」による暫定的な交通開放により通行機能が確保できる目安より25cmと設定

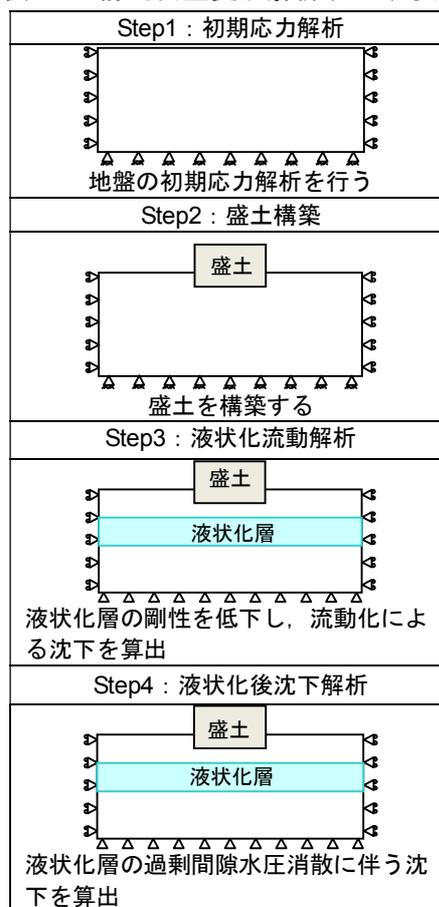
ここで、橋台背面部では、踏掛版を延長することにより縦断勾配を緩和させる方法も考えられるが、踏掛版自体がその長さの70%の支間長を持つ単純版として死荷重及び活荷重(T 荷重)に対して設計されるため、むやみに長い踏掛版を設置することは合理的でない。従って表-3中に示すように阪神高速の設計基準⁹⁾に基づき長さ8mの踏掛版を標準として考慮するとともに、元の縦断勾配に踏掛版端部の沈下によって生ずる縦断勾配を加えた合計が12%を超えないような限界沈下量として、橋台背面部における段差の許容値を50cmとした。

3. 地震時における液状化による沈下量照査

3-1 照査概要

地震時における基礎地盤の液状化による盛土の沈下の影響を、盛土天端の縦断勾配および段差により照査する。具体的には、設定した検討断面ごとに無対策時の残留変形解析を実施し、隣接する区間の沈下量との相対沈下量を求め、縦断勾配および段差量を確認した。沈下解析手法には、河川構造物の耐震設計⁵⁾にも用いられる方法として、液状化に伴って発生する過剰間隙水圧の消散による沈下と併せて地盤の残留変形量を求めることができる静的自重変形解析(ALID)¹⁰⁾を用いた。解析の手順を表-4に示す。

表-4 静的自重変形解析(ALID)手順



3-2 照査断面の設定

照査断面については、図-3に示すように橋台背面に圧密沈下対策としてFCBを施工する「橋台背面アプローチ区間」と「一般盛土区間」において盛土高さが最大および最小(盛土高50cm程度)となる断面で解析を行い、その間は地盤高さが線形補間されるものと仮定した。

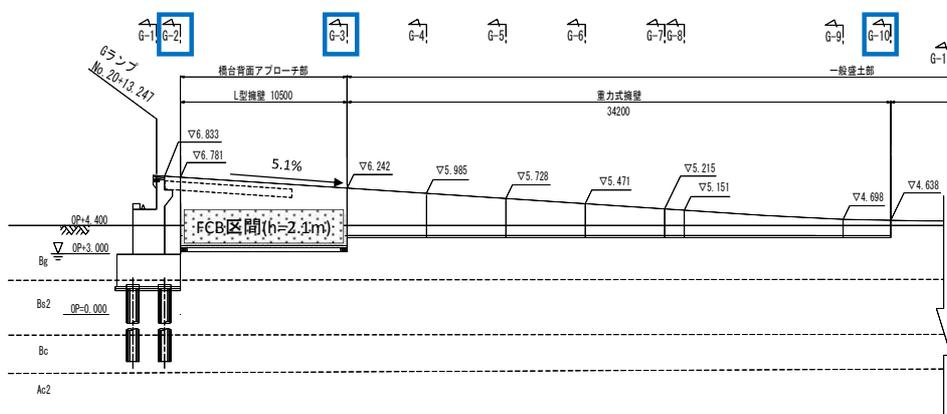


図-3 解析断面位置 (口囲みが照査断面)

表- 5 変状解析結果(無対策時)

区間	橋台背面アプローチ区間		一般盛土区間		許容値
	最大	最小	最大	最小	
盛土高さ					
沈下量(cm)	※	82	122	62	-
段差(cm)	※	40		-	25
縦断勾配(%)	12.9		2.9		12

※踏掛版設置されるため沈下量無し

3-3 沈下量解析結果

解析の結果、表- 5 に示すように無対策の状態では大きな沈下が発生することが明らかとなった。この結果をもとに、縦断方向に発生する路面段差および縦断勾配を算出した結果を同表中に示す。路面段差は断面構造の違いに起因して橋台背面アプローチ区間と一般盛土区間の境界において発生しており、その値は許容値 25cm を超える 40cm となった。このとき縦断勾配は、橋台背面アプローチ区間における沈下により、踏掛版上で許容値 12% を超える 12.9% となった。これらの結果より、設定した性能を満足するための対策工の必要性が明らかとなった。

4. 対策工

4-1 対策方針

従来の液状化対策では、要求性能に対して許容値等が定められていないことから、液状化を発生させないことを基本としていた。そのため液状化層をすべて改良する必要があり、費用も莫大となっていた。今回、これまで述べたとおり路面段差や縦断勾配について許容値を設定したことから、これに収まる範囲での液状化に伴う沈下を許容出来ることとなり、そのため液状化の発生もすべて抑制する必要はない。前章での照査の結果、液状化層 Bg, Bs2, As2 のうち As2 層の残留沈下量は 12~46cm であったが、段差や縦断勾配に着目した路面における変位に対する影響はそれほど大きくないと考えられた。よって同層の液状化の発生を許容することとし、残る層の改良範囲について以下の通り検討した。

4-2 改良厚の検討

橋台背面アプローチ部やL型擁壁部のように盛土高の高い箇所に於いては、液状化発生時に本来の支持層は液状化層となり支持力を消失し、板状の改良体層が擁壁を含む盛土本体を支持することとなる。この時改良体層の強度が十分でないと盛土・擁壁の自重により改良体層が破壊され、路面に許容できない変形が生じることとなるため、必要な強度が期待できる改良厚として試算の結果 3.8m 以上確保する必要がある。

盛土高の低い一般盛土部では、改良体層の自重による破壊を考慮する必要はなく、最小改良厚としては施工可能な最小厚さ 1.0m で良い。

これらの最小改良厚を満足させつつ、橋台背面アプローチ部については踏掛版により段差が生じないことから縦断勾配のみを、一般盛土部については段差および縦断勾配をそれぞれ解析的に照査し、改良厚を決定することとした。なお、改良厚は施工性等から 0.5m 刻みとした。改良厚検討フローを図- 4 および図- 5 に示す。

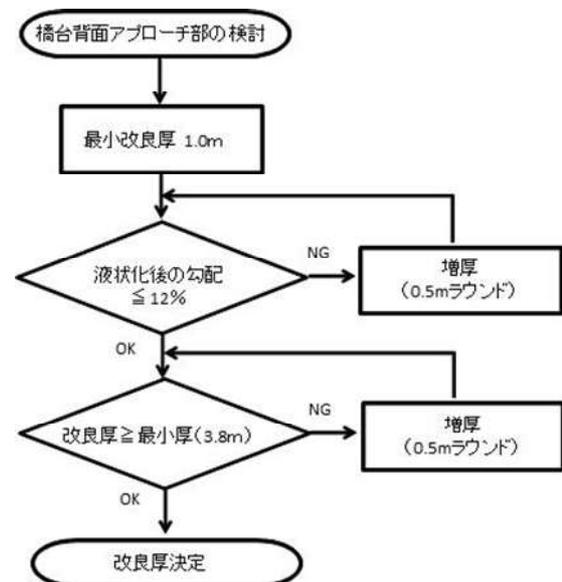


図- 4 改良厚検討フロー
(橋台背面アプローチ部)

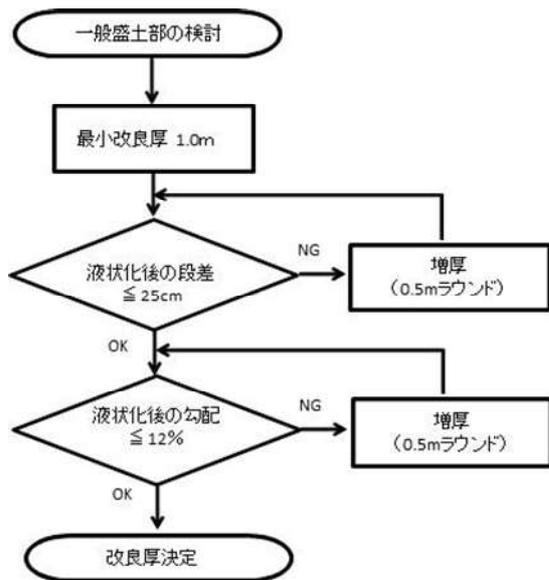


図- 5 改良厚検討フロー（一般盛土部）

4-3 ジオテキスタイルの敷設

これまで道路縦断方向に着目した盛土の沈下対策について述べたが、液状化発生時には路面段差だけでなく盛土本体に発生する横断方向すべりが懸念される。

改良体厚が 3.8m 以上ある場合は、改良体強度が十分期待できることから、すべり抑止効果も期待できるが、3.8m 以下の場合それが期待できないことから、別途対策を講じる必要がある。

そこで、図- 6 に示すように横断方向にジオテキスタイルを敷設してすべり抑止効果を期待することとした。これは、盛土に発生する円弧すべりモーメントに対し、ジオテキスタイルの引張力により抵抗モーメントを増大させることにより抑止効果を発揮させるもので、以下の手順で設計した。

まず、無補強盛土の基礎地盤を含む安定検討を行い、その結果、円弧すべり最小安全率が 1.20 未満の場合には、円弧すべりモーメントからジオテキスタイルの必要引張力を算定し、その種類と敷設枚数を決定した。続いてジオテキスタイルの引き抜きが生じない敷設長さを算出し、最後にジオテキスタイルで補強された状態でのあらゆるすべり円弧に対して、安全率が確保されていることを確認した。

また、縦断方向についても、ジオテキスタイル

の引張力により抵抗モーメントを増大させることで路面の急激な段差抑止に一定の効果を発揮することを期待して、盛土下面にジオテキスタイルを敷設することとした。路面段差及び縦断勾配については、要求性能に対して許容値以内に収まるのであれば無対策でも良いが、ジオテキスタイルの敷設により定量的な評価はできないものの、定性的には効果が期待できることから採用したものである。

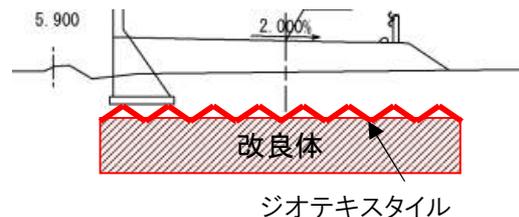


図- 6 ジオテキスタイルの敷設（横断方向）

4-4 検討結果と対策工

改良厚の検討の結果、橋台背面アプローチ部においては Bg 層、Bs2 層の全層改良が必要となり、一般盛土区間においては擁壁ブロック長 5m 毎の改良区間境界で 25cm 以上の段差を生じさせないように、図- 5 のフローにより改良厚を段階的に小さくすることとした。一例として G ランプ部の対策概要を図- 7 に示す。

以上に示したような対策を反映させた解析を再度行った結果を表- 6 に示す。本表より、液状化の発生による沈下については最大 100cm 程度と大きく発生しているものの、路面における段差および縦断勾配については、今回設定した許容値以内に収まっており、レベル 2 地震時においても「停止的走行 (0~10km/h)」あるいは「徐行走行 (15~20km/h)」による暫定的な交通開放により通行機能が確保でき、当初目標とした道路土工-盛土工指針³⁾における耐震性能 2 が達成できることが確認できた。

また、今回の対策に要する費用と、路面段差を許容しない従来考えによる対策費用との比較を表- 7 に示す。表より、今回の耐震検討において目標性能に基づく路面段差を許容したことで、改

良数量も1割強と大幅な削減となり、また改良震度も浅くなることから単価の安い工法も選定でき

たことから、大幅なコスト削減に結びついたことがわかる。

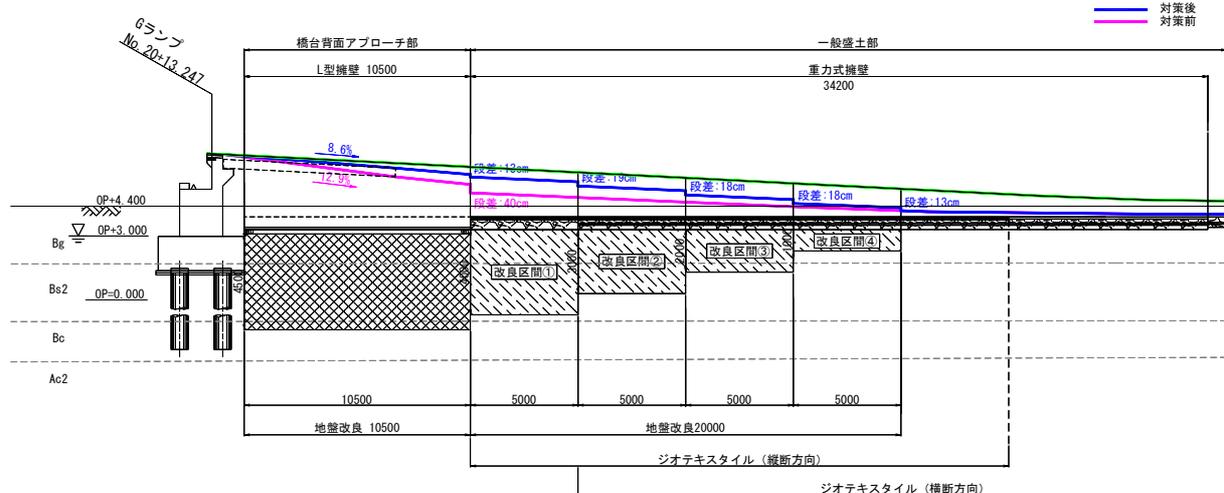


図- 7 対策事例 (G ランプ)

表- 6 対策を反映させた解析結果 (G ランプ)

区間	橋台背面アプローチ区間		一般盛土区間										許容値	
			改良区間①		改良区間②		改良区間③		改良区間④		改良なし			
盛土高さ	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小		
沈下量(cm)	-	36	49	46	65	62	80	77	95	90	103	62		-
段差(cm)	-	13	19	18	18	13	-	25						
縦断勾配(%)	8.6		4.5		4.5		4.5		4.1		3.3			12

表- 7 工費比較

項目	仕様	数量	単位	金額
■液状化による路面段差を許容しない場合				
機械攪拌工法	一般部	102,281	m ³	¥538,500,000
CDM工法	機械分解組立解体費含む			
高圧噴射攪拌工法	近接施工部・狭隘部	25,570	m ³	¥1,374,100,000
JSG工法	機械分解組立解体費含む			
合計(1)		127,851	m ³	¥1,912,600,000
■液状化による路面段差を許容する場合				
機械攪拌工法	一般部(通常部・桁下部)	11,833	m ³	¥59,300,000
ツインブレードミキシング工法	機会分解組立解体費含む			
高圧噴射攪拌工法	近接施工部・狭隘部	3,791	m ³	¥140,000,000
NJP工法	機械分解組立解体費含む			
合計(2)		15,624	m ³	¥199,300,000
差(2)-(1)				¥-1,713,300,000

5. まとめ

三宅 JCT の土工部において、性能に基づくレベル 2 地震対策を行った内容を以下にまとめる。

- レベル 2 地震時における目標性能に対して、

液状化による地盤沈下に伴って生じる路面の段差および縦断勾配の変化に着目し、段差 25cm、縦断勾配 12%を許容値として設定した。

- 無対策時の液状化による沈下量、沈下後の段差および縦断勾配を解析的に求めた結果、

設定した許容値を満足せず、対策工の必要性が明らかとなった。

- 対策工は液状化層の改良を基本とし、上記許容値を満足する範囲で液状化の発生を一部許容することとした。改良範囲を解析的に検討し、合理的な対策を決定することで大幅にコスト削減できた。
- 横断方向におけるすべり安定性の確保および縦断方向の盛土体の連続性確保を期待して、ジオテキスタイルを敷設することとした。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路土工要領(平成 21 年度版)，平成 21 年 6 月
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，平成 24 年 3 月

- 3) 日本道路協会：道路土工・盛土工指針(平成 22 年度版)，平成 22 年 4 月
- 4) 日本道路協会：道路土工・擁壁工指針(平成 24 年度版)，平成 24 年 7 月
- 5) 国土交通省水管理・国土保全局治水課：河川構造物の耐震性能照査指針・解説，平成 24 年 2 月
- 6) 財団法人国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き，平成 14 年 7 月
- 7) 常田賢一，小田和広，中村明憲：道路機能に基づく道路盛土の経済的な耐震補強・補強技術に関する研究開発，道路政策の質の向上に資する技術研究開発成果報告レポート No. 17-4, 2008. 7
- 8) 日本道路協会：道路構造令の解説と運用，平成 16 年 2 月
- 9) 阪神高速道路(株)：設計基準第 3 部第 4 編，平成 14 年 5 月
- 10) 安田進，吉田望，安達健司ほか：液状化に伴う流動の簡易評価法，土木学会論文集 No. 638, pp. 71-89, 平成 11 年 12 月

PERFORMANCE-BASED SEISMIC DESIGN FOR EMBANKMENTS OF SANBO JUNCTION AGAINST LARGE EARTHQUAKES

Kiyoshi YAMAMURA, Hiroshi KOBAYASHI and Akinori SATOH

This paper reports performance-based seismic design of road embankments developed for Sanbo Junction of the Hanshin Expressway Yamatogawa Route. The Sanbo Junction which consists of viaducts and embankments is located on a liquefaction-prone reclaimed coastal land. Since the Hanshin Expressway system is designated to serve as emergency transportation routes during an earthquake or other disaster, the whole structure including the embankments should satisfy severe seismic performance requirements.

In order to define required performance of the embankments, the authors determined allowable limits for road surface bumps and change in longitudinal gradient caused by ground subsidence due to liquefaction, based on previous research results. Analytical estimation of the amount of liquefaction-induced subsidence revealed that both surface bumps and longitudinal gradient would exceed the allowable limits without countermeasures. Rational countermeasures for ground subsidence control were obtained by analytically determining the appropriate range for the implementation of liquefaction layer improvement.

山村 清



Kiyoshi Yamamura

阪神高速道路株式会社
建設事業本部堺建設部 設計課

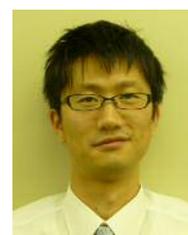
小林 寛



Hiroshi Kobayashi

阪神高速道路株式会社
建設事業本部堺建設部 設計課

佐藤 彰紀



Akinori Satoh

阪神高速道路株式会社
建設事業本部堺建設部 設計課