

## 橋桁を支持するボックス及び杭基礎の 耐震設計に関する一考察

鹿嶋 孔哉<sup>1</sup>・八ツ元 仁<sup>2</sup>・久木留 貴裕<sup>3</sup>・栗田 泰紀<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 修士（工学） 阪神高速道路（株） 建設事業本部大阪建設部設計第一課  
（〒553-0003 大阪府大阪市福島区福島7-15-26 大阪JMFビル10階）

<sup>2</sup>正会員 博士（工学） 阪神高速道路（株） 建設事業本部大阪建設部設計第一課  
（〒553-0003 大阪府大阪市福島区福島7-15-26 大阪JMFビル10階）

<sup>3</sup>正会員 修士（工学） （株）オリエンタルコンサルタンツ 関東支社特殊構造部  
（〒151-0071 東京都渋谷区本町3-12-1）

<sup>4</sup>正会員 （株）オリエンタルコンサルタンツ 関東支社地下構造部  
（〒151-0071 東京都渋谷区本町3-12-1）

### 1. はじめに

一般的な道路橋は死荷重の大きい上部工を、橋脚と基礎で支持する、トップヘビーな構造であるため、地震時慣性力が構造物の応答に支配的な影響を及ぼすと考えられている。また、1995年の兵庫県南部地震後の道路橋基礎の調査報告<sup>1)~3)</sup>や、杭基礎設計便覧<sup>4)</sup>にも示されているように、地震時の地盤変位が主たる原因となって、道路橋基礎が復元力の喪失または過大な残留変位が生じた事例は報告されていない。そのため、道路橋の耐震設計においては、地盤と基礎の応答を、フーチング下面のバネに集約し入力を行う耐震解析モデル（以下、SRモデルという。）を用いて、地震時の上部工、橋脚及び基礎の慣性力（以下、慣性力という。）のみを考慮した設計を行うことが一般的である<sup>5)~6)</sup>。

一方で、空間の制約が厳しい都市内では、図-1に示すような橋桁をボックス構造と杭基礎で支持する、特殊な橋梁構造を採用することも十分に考えられる。当該構造は、上記で示す一般的な道路橋と比較し、(1) 上部工が低い位置に存在し、かつ構造物の大部分が地中構造であることから、地震時慣性力が卓越

しないと考えられること、(2) 基礎構造の一部がボックス構造であり、地震時に塑性変形を許容すること<sup>7)~8)</sup>、の2点の違いがある。当該構造を設計する際には、これらの違いを踏まえながら適切な設計を行うことが必要と考えるが、特殊な構造でもあることから設計検討の事例すらなく技術的知見を持ち合わせていない。一般的な道路橋の耐震設計で用いる設計手法を適用できるかどうかの判断をすることも難しい状況にある。当該構造に対する適切な設計手法を確立するためには、様々な検討を通して知見を蓄積することが必要であると言える。

このため、本検討では、当該構造のボックス及び基礎に対して、慣性力のみを考慮したSRモデルによる設計に加え、慣性力と地盤変位の影響を考慮できるFEM解析による設計を実施し、設計結果について比較検討を実施した。比較の結果、FEM解析によるボックスと杭の地震時応答が、SRモデルによる応答より大きく、FEM解析により得られる必要鉄筋量も大きくなることが分かった。つまり、本構造においては、地盤変位が構造物の地震時挙動及び得られる構造諸元に大きな影響を与えることが示され、その検討結果について報告を行う。

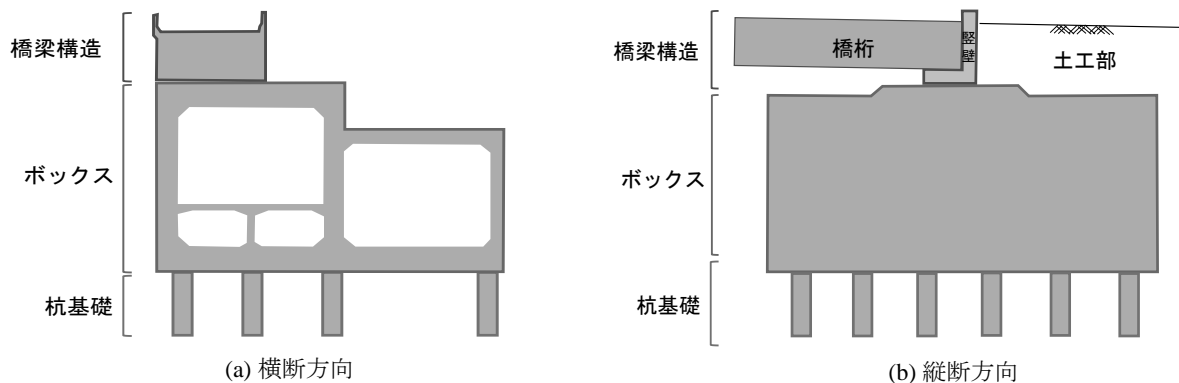


図-1 橋桁をボックス構造と杭基礎で支持する構造

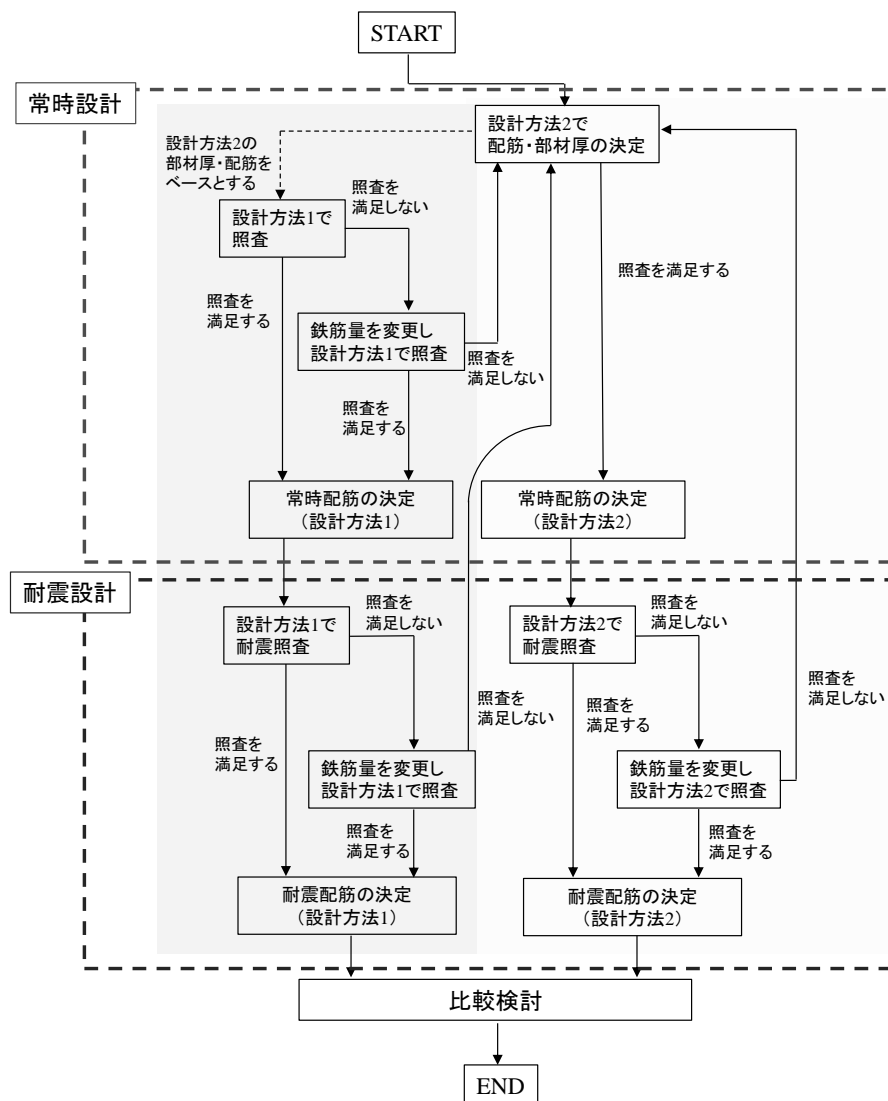


図-2 設計及び比較検討のフロー

## 2. 設計の方針

本検討では、前述のとおり、一般的な橋梁の設計に用いる、SRモデルを用いた設計を行うこととし、この設計方法を設計方法1とする。設計方法1は、平成29年改訂の道路橋示方書・同解説<sup>5),9)~11)</sup>（以下、H29道示という。）に従い設計を行う。

一方で、地震時の地盤変位を考慮することのできるFEM解析を用いた設計を設計方法1の比較対象とし、設計方法2と呼ぶこととする。設計方法2において、躯体や周辺地盤のモデル化は阪神高速の設計基準（第3部）（土構造物等編）<sup>12)</sup>（以下、設計基準という。）に従うものとする。なお、設計基準は許容応力度法に基づく設計手法であるため、部分係数法を導入したH29道示に従った設計方法1とは設計体系が異なることに留意されたい。この設計体系の違いによる影響の分析については後述する。また、設計方法2の杭基礎については、同一の構造体で複数の設計手法を組み合わせることは行わず、許容応力度法による設計を行うこととし、平成24年改訂の道路橋示方書・同解説<sup>13)~15)</sup>（以下、H24道示とい

う。）を準用する。

設計及び比較検討のフローを図-2に示す。本検討においては耐震解析結果の比較検討が目的ではあるが、耐震設計は常時設計において決定した配筋をベースに行うため、本稿では常時設計についての設計結果についても触れていく。

## 3. 設計概要

### (1) 常時設計

常時設計については表-1に示す通り、両設計法ともに、H24道示及びH29道示（以下、道示という。）に従い当該構造物を弾性地盤に支持されたラーメンとして考え、常時荷重を載荷し骨組みモデル解析を行う。設計方法1の耐久性の照査については常時設計の中で実施する。

常時設計における両設計法の照査項目について、設計方法1の照査は耐荷性の照査と耐久性の照査が必要であることに対し、設計方法2では耐荷性の照査のみであり、設計方法1の照査項目は設計方法2の

表-1 設計手法について

		設計方法 1	設計方法 2
設計方法		部分係数法	許容応力度法
適用基準	ボックス	H29 道示	阪高設計基準（第3部）（土構造物等編）
	基礎	H29 道示	H24 道示
設計アプローチ			
常時計算	ボックス・基礎	<p>【弾性地盤に支持されたラーメン】</p>	
耐震計算	作用力	慣性力	慣性力、地盤変位
	モデル	SR モデル	FEM モデル
	ボックス	<p>【動的解析】</p> <p>地表面波</p>	<p>【動的解析】</p> <p>基礎波</p> <p>設計方法1の地震波入力位置で得られた地震波を、設計方法1の入力波とした。</p>
基礎	<p>【静的解析】</p>		

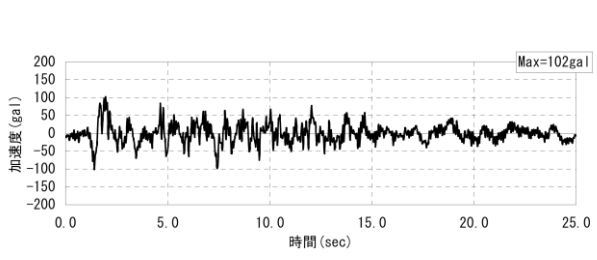
照査項目を包含していると言える。また、既往の検討成果<sup>16)</sup>から地中構造物の常時設計においては、設計方法1の耐久性照査で求まる鉄筋量や部材厚は設計方法2による照査で決まった鉄筋量や部材厚より大きくなる傾向が示されているため、図-2のフローに示すように、設計方法2で常時設計を行った後、設計方法1で照査を実施する。鉄筋量については、断面力照査の結果、発生応力が小さい場合、鉄筋径のランクダウンを行うなど鉄筋量の低減を行った。

## (2) 耐震設計

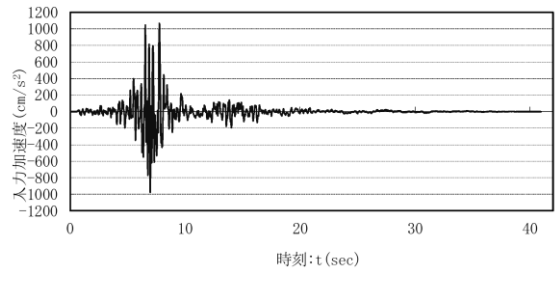
耐震計算のモデル化断面について、表-1に示す。設計方法1では、H29道示に準拠し梁ばねモデルを用いて構造物のモデル化を行う。梁要素のモデル化はボックスと杭に分けて行う。ボックスについては、底版に設置したSRバネを介して地震動を入力し断面力を算出する。底版での発生断面力が最大となる

時点の底版位置での断面力を底版と杭で構成されるラーメンモデルに静的に作用させることで、杭に生じる断面力を算出する。一方で、設計方法2では、開削トンネルの設計基準に準拠し、地盤と構造物の地震時挙動を一体的に解く、FEM動的一体解析（解析コード：TDAPIII）により、構造物に生じる断面力の計算を行う。なお、設計方法2では、ボックス及び杭とともに地盤と一体的に解析するため、杭についても動的相互作用の影響を考慮することになる。

耐震計算に用いた入力地震動の時刻歴波形を図-3に示す。入力地震動はレベル1地震動とシナリオ地震動の計2波とする。なお、本設計で用いるシナリオ地震動は、レベル2地震動と比較して最大加速度は大きい。地盤については沖積砂層と沖積粘性土層の互層の軟弱地盤を想定する。設計方法2ではFEM解析における底面境界に地震動の入力を行う。設計手法1での地震動の入力位置はボックス底版の底面



(a) レベル1地震動



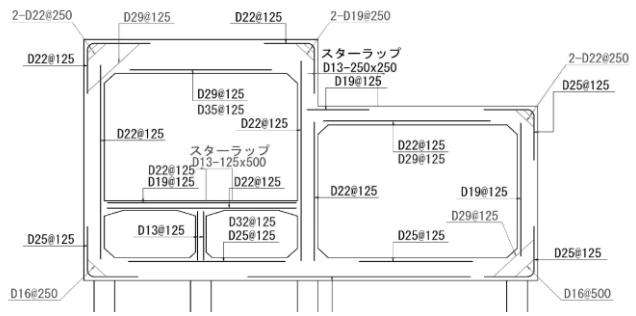
(b) シナリオ地震動

図-3 入力地震動の時刻歴波形

表-2 設計方法1, 2の性能規定, 照査基準

設計地震動	対象構造物	設計方法1		設計方法2	
		耐荷性能	照査項目：照査基準	耐震性能	照査項目：照査基準
L1	ボックス	耐荷性能1	曲げ：制限値以下（限界状態1）	耐震性能1	曲げ：降伏曲率以下
			曲げ：制限値以下（限界状態1）		曲げ：降伏曲率以下
	せん断：制限値以下（限界状態1）		せん断：許容応力度以下（降伏以下）		
	支持力：制限値以下（限界状態1）		支持力：許容支持力以下（降伏以下）		
L2 (シナリオ地震動)	ボックス	耐荷性能2	曲げ：制限値以下（限界状態2）	耐震性能2※	曲げ：許容曲率塑性率以下
			応答塑性率が目安値以下（目安値=3）		応答塑性率が目安値以下（目安値=3）
			せん断：制限値以下（限界状態2）		せん断：せん断耐力以下
			隅角部：制限値以下（限界状態2）		隅角部：降伏以下
	杭		曲げ：制限値以下（限界状態2）		曲げ：許容曲率塑性率以下
			応答塑性率が目安値以下（目安値=3）		応答塑性率が目安値以下（目安値=3）
			せん断：制限値以下（限界状態2）		せん断：せん断耐力以下
			回転角：目安値以下（0.02rad）		回転角：目安値以下（0.02rad）

※設計基準においてボックスは耐震性能3を求めるが、本構造のボックスについては橋梁の基礎も兼ねることから、基礎の耐震性能と同様に耐震性能2とした。



黒字：設計方法2により決定する鉄筋を示す。  
 赤字：設計方法1の耐荷性能より決定する鉄筋を示し、設計方法2と比較しランクアップもしくは追加が必要な鉄筋を示す。  
 青字：設計方法1の耐久性能防食より決定する鉄筋を示し、設計方法2と比較しランクアップもしくは追加が必要な鉄筋を示す。  
 ※特筆のない箇所のスターラップはD13-250×500とする。

図-4 ボックスの常時設計結果

位置であるため、先述の底面境界から引き上げ計算を行ったものを、設計手法1の入力地震動とすることで、両手法における入力地震動の大きさに差が生じないようにした。

表-2に設計方法1と設計方法2の性能規定と照査基準について示す。

#### 4. 常時設計の比較検証とその考察

##### (1) ボックスの設計結果の比較

図-4に、ボックス部における設計方法1, 設計方法2の結果を示す。図中では両者の比較を分かり易く

くするため、設計方法2の結果を黒字で明記し、設計方法1で必要となる鉄筋を赤字、青字で表記する。つまり、着色部の鉄筋が両設計法の結果の差異であるといえる。耐荷性能の照査では主鉄筋に変化はなく、帯鉄筋については、一部、鉄筋が追加に必要な箇所があるが、概ね設計方法2による設計結果と同様の結果を得られた。隅角部の補強筋については、設計方法2では補強筋が不要であったが、設計方法1を適用すると、補強筋が必要となる結果を得た。続いて、耐久性能の照査（鋼材防食）では設計方法2で決定した主鉄筋では引張応力度の制限値を超過するため、内空側の主鉄筋で1~2のランクアップが生じた。

常時設計において、両設計手法で差異が生じた要因は、以下の2点となる。設計方法2で用いる設計基準<sup>12),17)</sup>では、隅角部の設計手法を実験を基に独自に開発しており、この手法が道示におけるラーメン構造の隅角部の設計手法と異なるため、隅角部鉄筋量の差が生じた。また、設計方法1では、設計方法2と同様の常時荷重に対する照査に加え、常時荷重から活荷重を除いた、永続作用支配状況に対して、耐久性の照査（鋼材防食）を実施する。耐久性の照査では、鉄筋の応力度の制限値を100 N/mm<sup>2</sup>と、常時荷重に対する、鉄筋の許容応力度である180 N/mm<sup>2</sup>より低めに設定される。本構造物は、常時荷重に対する活荷重の割合が小さく、耐久性の照査において、常時の鉄筋量が決定したため、主鉄筋量の差が生じた。

## (2) 杭の設計結果の比較

図-5に両設計法の照査結果を示す。設計方法1で、照査を行うと負の周面摩擦考慮時の安定計算結果で照査を満足しないことから、杭の配置間隔の見直しを行った。杭配置間隔の見直しの結果、杭本数・配筋仕様については、両設計法で同じとなったが、上部工荷重が作用する躯体直下の杭配置を密にする必要があることがわかった。両設計結果において杭配置に違いが生じた要因としては、H29道示に準拠し基礎の設計を行っている設計方法1では、H24道示に従う設計方法2と比べて、最大周面摩擦力度が小さめの値に設定されているため、支持力の制限値が小さくなっていることが挙げられる。

## 5. 耐震設計の比較検証とその考察

### (1) 耐震設計における比較検証の方針

表-3に示すように、設計方法1, 2では、部分係数法と許容応力度法といった設計体系と、耐震計算における解析モデルの2点の相違点が存在する。両手法による差異を分析するには要因毎の影響を把握することが必要となるため、設計体系を設計方法1とそろえた、設計方法1'を実施する。つまり、設計方法1'について、設計体系は許容応力度設計法であり、地盤変位を考慮しないSRモデルによる設計を実施する。設計の流れとしては、表-1に示す設計方法1と同様に、設計方法1の常時設計により決まった配筋を基に耐震照査を実施する。また、性能規定と照査基準は設計方法2と同じく表-2を用いる。

設計方法1と設計方法1'の比較を行うことにより、本構造物の耐震設計において、許容応力度法、部分係数法といった設計体系が結果に及ぼす影響について考察を行う。また、設計方法1'と設計方法2の比較を行うことで、SRモデルとFEMモデルの違いについて考察を行う。

### (2) 耐震設計結果の比較

表-4に設計方法1, 設計方法1', 設計方法2における、常時配筋に対する耐震照査の結果を示す。また、常時設計と同様に縦断方向の杭配置の照査も行うために、杭については横断方向と縦断方向の2方向の設計を行っている。

設計方法1については、ボックス、杭ともに常時配筋でレベル2地震動における杭の曲げ耐力照査を除き、制限値以下であることを確認した。レベル2地震動における杭の曲げ耐力照査については制限値を超え、降伏することが分かったが、応答塑性率が目安値以下であることを確認した。つまり、設計方法1では、常時の配筋に対し、補強配筋が必要ないという結果が得られた。

設計方法1'については、設計方法1と同様であり、ボックス、杭ともに常時配筋でレベル2地震動における杭の曲げ耐力照査を除き、許容応力度などの照査値を満たすことを確認した。レベル2地

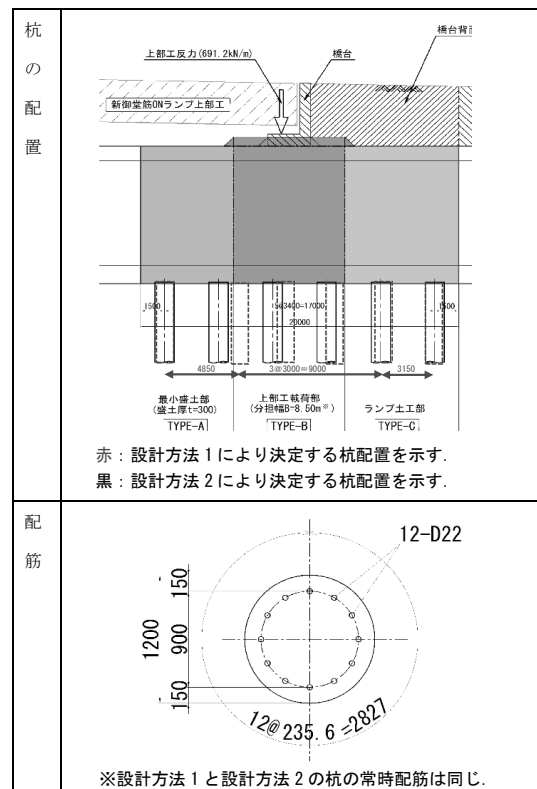


図-5 杭の常時設計結果

震動における杭の曲げ耐力照査については制限値を超え、降伏することが分かったが、応答塑性率が目安値以下であることを確認した。つまり、設計方法1'においても、設計方法1と同様に、常時の配筋に対し、補強配筋が必要ないという結果が得られた。

つづいて、設計方法2における耐震設計の結果について述べる。レベル1地震動による照査は、全て降伏曲率以下であり照査値を満たしたものの、レベル2地震動における照査については、ボックス、杭ともに応答塑性率、せん断耐力及び隅角部の鉄筋において照査を満足しなかった。そのため、ボックスについてはせん断耐力の超過や隅角部の降伏が発生しないように、図-6に示す帯鉄筋の追加やランクアップによるせん断補強や隅角部補強筋の追加を行った。また、杭については、図-7に示すとおり、せん断耐力が超過することから帯鉄筋をD22からD38に鉄筋径を上げた。また、適切な荷重伝達が行われることに配慮して帯鉄筋と同径の主鉄筋を考慮するものとし、主鉄筋も同様にD38にランクアップを行った。

これら耐震補強を行った構造に対する、設計方法2の照査結果を表-5に示す。杭は、せん断力照査の結果、帯鉄筋の配筋をD16@300mmからD38@125mmへの変更が生じた。しかし、耐震補強後の応答塑性率が16と、塑性化を表す3を大幅に超える結果が得られた。通常、杭の設計では道示Vに記載のとおり地盤変位を考慮しないことを基本としているが、本検討における杭の設計は地盤変位を考慮している。そのため、道示が許容する塑性化の目安値である、応答塑性率3未満を満足することは難しい。

表-3 耐震設計における設計方法の位置付け

	設計方法1	設計方法1'	設計方法2	備考
設計体系	部分係数法	許容応力度法	許容応力度法	部分係数法と許容応力度法の違い
解析モデルの違い	SR モデル	SR モデル	FEM モデル (地盤-構造物の動的相互作用を考慮)	解析モデルの違い

表-4 ボックス，杭の耐震設計結果

設計地震動	対象構造物	照査項目	設計方法1 (常時配筋)		設計方法1' (常時配筋)		設計方法2 (常時配筋)	
			横断方向	縦断方向	横断方向	縦断方向	横断方向	縦断方向
L1地震動	ボックス	曲げ	制限値以下 OK	-	降伏曲率以下 OK	-	降伏曲率以下 OK	-
		杭	曲げ	制限値以下 OK	制限値以下 OK	降伏曲率以下 OK	降伏曲率以下 OK	降伏曲率以下 OK
	せん断	制限値以下 OK	制限値以下 OK	許容応力度以下 OK	許容応力度以下 OK	-	-	-
	支持力	制限値以下 OK	制限値以下 OK	許容支持力以下 OK	許容支持力以下 OK	-	-	-
L2地震動 シナリオ地震動	ボックス	曲げ	制限値以下 OK	-	許容曲率塑性率 以下	-	許容曲率塑性率 以下	-
		曲げ (応答塑性率)	0.39	-	0.31	-	4.09	-
		せん断	制限値以下 OK	-	せん断耐力以下 OK	-	せん断耐力超過 NG(2.31)	-
		隅角部	制限値以下 OK	-	降伏以下 OK	-	降伏超過 NG	-
	杭	曲げ	降伏	降伏	許容曲率塑性率 以下	降伏	許容曲率塑性率 以下	許容曲率塑性率 以下
		曲げ (応答塑性率)	$1.25 \leq 3.0$ OK	$1.72 \leq 3.0$ OK	$0.66 \leq 3.0$ OK	$1.31 \leq 3.0$ OK	3.37	17.05
		せん断	制限値以下 OK	制限値以下 OK	せん断耐力以下 OK	せん断耐力以下 OK	せん断耐力超過 NG(2.75)	せん断耐力超過 NG(7.32)
		回転角	$0.0001 \leq$ $0.02\text{rad}$ OK	$0.0002 \leq$ $0.02\text{rad}$ OK	- OK(降伏以下)	$0.0002 \leq$ $0.02\text{rad}$ OK	$0.001 \leq 0.02\text{rad}$ OK	$0.002 \leq 0.02\text{rad}$ OK

・ボックス，杭の許容塑性率は橋台および橋台基礎の許容塑性率である3とする。

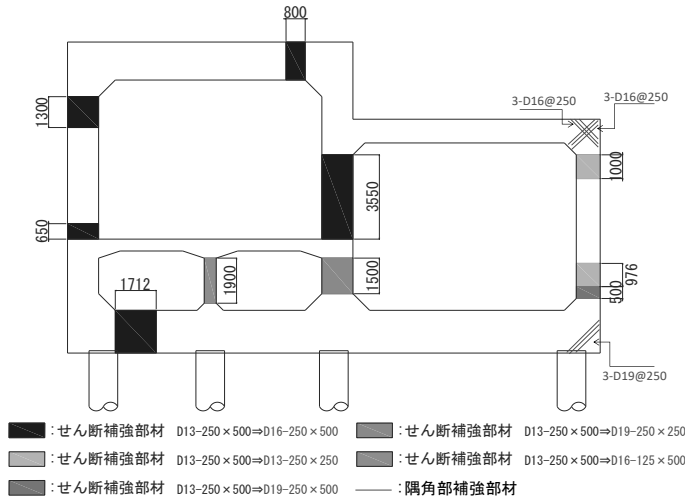


図-6 ボックスの耐震補強

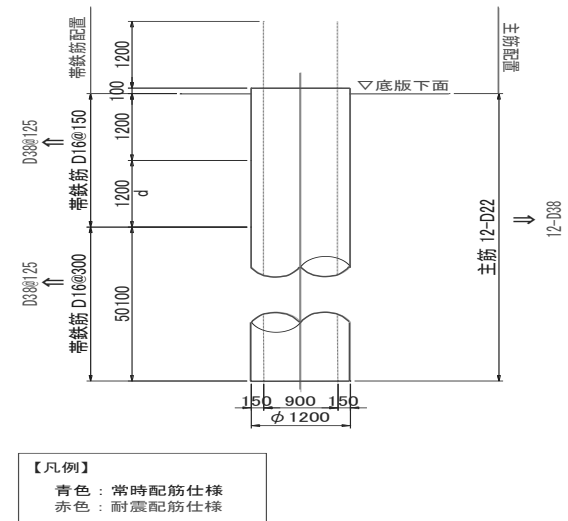


図-7 杭の耐震補強

本検討では、杭に耐力低下を伴うような塑性化が発生していないことを確認するため、杭体が終局状態に対して余裕を持っていることを確認する。つまり、杭体に発生する曲げ変形に対して、許容曲率塑性率以下であることを確認する。加えて、橋梁基礎として上部工に影響が出るような、過大な残留変位が発生しないことを確認し、橋梁基礎として所要の耐震性能を満足することとした。ここで、過大な残留変位の有無については、H24 道示に記載の回転角の最大値が 0.02 rad 以下であることを照査することで、

上部工への影響が小さいことを示すものとした。確認の結果、回転角の最大値は 0.002 rad となり、目安値以下であることを確認したため、過大な残留変位が発生せず、かつ曲げは許容曲率塑性率以下であることを確認したため、所要の耐震性能を満足するものとした。

a) 耐震設計における設計体系に起因する差異

前述したように、設計方法1と設計方法1'の結果を比較することで、許容応力度法，部分係数法といった設計体系が結果に及ぼす影響について考察を行

表-5 設計方法2における，耐震補強後のボックス，杭の耐震設計結果

設計地震動	対象構造物	照査項目	設計方法2 (耐震補強後)	
			横断方向	縦断方向
L1地震動	ボックス	曲げ	- ※	-
		曲げ	- ※	- ※
	杭	せん断	-	-
		支持力	-	-
L2地震動 シナリオ地震動	ボックス	曲げ	許容曲率塑性率以下 OK (0.26)	-
		曲げ (応答塑性率)	4.09	-
		せん断	補強筋の追加でOK	-
		隅角部	補強筋の追加でOK	-
	杭	曲げ	許容曲率塑性率以下 OK (0.05)	許容曲率塑性率以下 OK (0.89)
		曲げ (応答塑性率)	2.36	15.68
		せん断	せん断耐力以下 OK (0.37)	せん断耐力以下 OK (0.92)
		回転角	$0.001 \leq 0.02 \text{rad}$ OK	$0.002 \leq 0.02 \text{rad}$ OK

・ボックス，杭の許容塑性率は橋台および橋台基礎の許容塑性率である3とする。  
 ※常時配筋で照査を満足したため，照査を要しない項目。

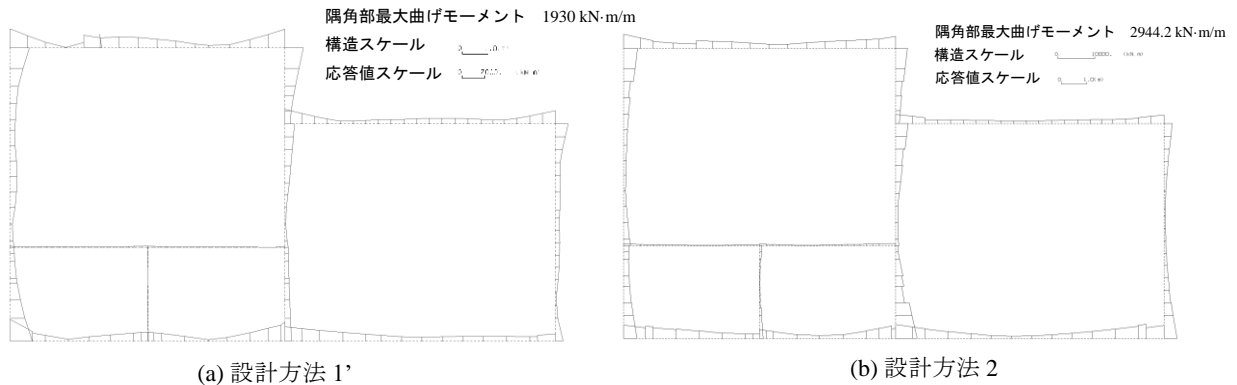


図-8 設計方法1'，設計方法2における，シナリオ地震動時のボックスの最大曲げモーメント図

う。表-4 に示したとおり，両設計法ともに常時設計からの鉄筋のランクアップは不要であり，設計の結果得られた構造物の構造諸元としては同じであった。これらの結果より，耐震設計においては設計体系に起因する大きな差異は見られなかった。

**b) 解析モデルの違いに起因する差異**

設計方法1'と設計方法2では前述のとおり，解析手法が大きく異なる。SRモデルとFEM一体解析とでは，地盤変形など地震時相互作用が考慮できるかどうかという点に大きな違いがある。このような解析手法の特性の違いを踏まえながら，前述の両手法で求めた設計結果の違いが生じた要因について述べる。

表-4，表-5，図-6，図-7 に示すように，地震時の地盤変位を考慮する設計方法2では，設計方法1'と比較し，ボックス，杭基礎ともに必要鉄筋量が大幅に増加することが分かった。

図-8 に両設計法のシナリオ地震動入力時の，ボックス各部材における最大曲げモーメントの分布を示す。設計方法2の隅角部における最大曲げモーメントは，設計方法1'と比較して約1.5倍大きく，設計方法2ではせん断変形が設計方法1'に比べて大きいことを確認した。これは，ボックスは内部空間を有する中空構造であり，フーチングのような剛性の高い地中構造物でないことから，地震時における地

盤変位の影響を大きく受けるためだと考えられる<sup>9)-8)</sup>。SRモデルを用いた設計手法1'では，地震時の周辺地盤の地盤変形による影響を考慮しておらず，この差が必要鉄筋量の差として現れたと考えられる。一方，杭基礎でも同様に，設計方法2では地盤変位の影響を大きく受けていると考えられる。図-9 に設計方法2における曲げモーメント及びせん断力の分布状況を示すが，20m以深の深い位置でも大きな曲げが発生しており，一般的な橋梁の杭で生じる曲げモーメント分布<sup>18)</sup>とほぼ同じような分布を示した設計方法1'と大きく異なっている。また，発生せん断力は地層境で大きくなっていることから，地層境での地盤の相対変位が大きくなり，必要鉄筋量の差として現れたものと考えられる。

**6. まとめ**

本検討では，橋桁をボックスと杭基礎で支持する構造に対し，慣性力のみを考慮するSRモデルでの設計と，慣性力及び地盤変位の影響を考慮することができるFEM解析に基づく設計を実施し，その結果の比較を行った。本検討の結果を以下に示す。

- ・常時設計では，許容応力度法，部分係数法と設計体系の違いもあり，部分係数法に基づく設計方法

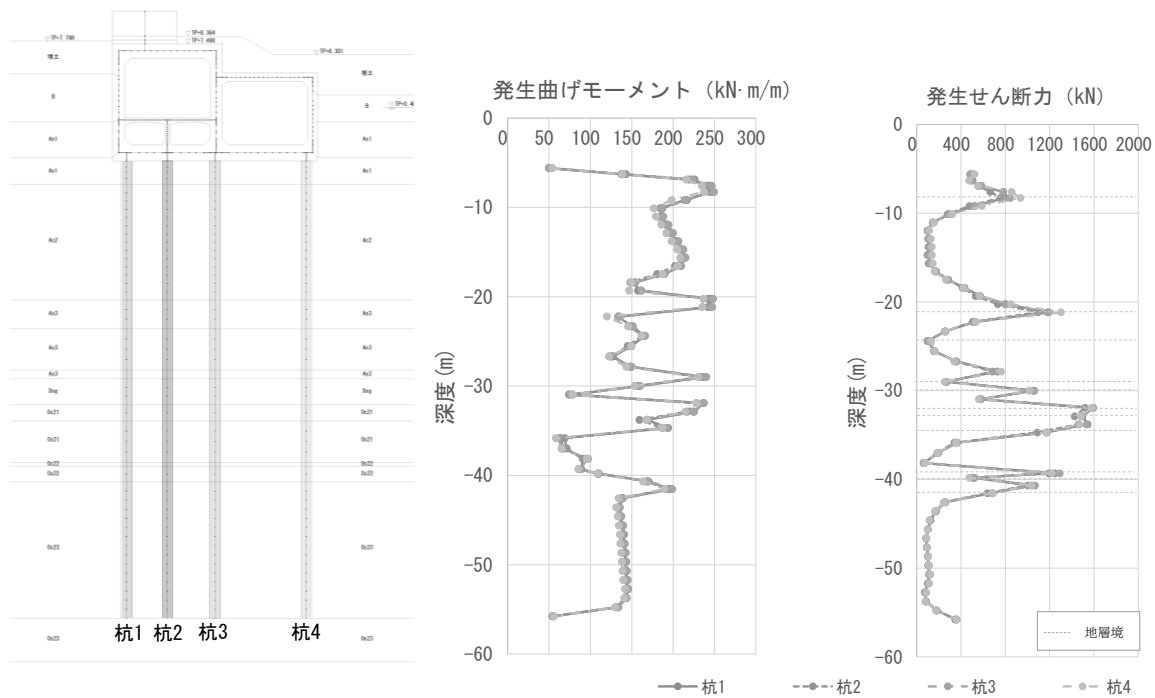


図-9 設計方法2における、シナリオ地震動時の杭の最大発生応力

2での設計の方が、鉄筋径が1~2ランク大きくなり、配筋量が多くなった。

- 耐震設計に関しては、許容応力度法と部分係数法の設計手法の違いにより、必要鉄筋量の差異は見られなかった。FEM解析による設計では、地震時の地盤変位の影響を考慮することから、SRモデルによる設計と比べてボックスおよび杭の必要鉄筋量が大幅に増加する。

今後は、本構造物に対する適切な設計方法の提案を目指し、引き続き検討を行っていく。

#### 参考文献

- 平成7年（1995年）兵庫県南部地震災害調査報告，土木研究所報告，第196号，1996.
- 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告，1996.
- (財)阪神高速道路管理技術センター：大震災から学ぶ都市高速道路における地震対策，2005.
- (公社)日本道路協会：杭基礎設計便覧，2020.
- (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，2017.
- (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編に関する参考資料，2015.
- 立石章：応答変位法における地震荷重の作用方法，土木学会論文集，No.441，p.157-166，1992.
- (公社)土木学会：トンネルライブラリー第9号 開削トンネルの耐震設計，1998.
- (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I共通編，2017.
- (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IIIコンクリート橋編，2017.
- (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV下部構造編，2017.
- 阪神高速道路(株)：設計基準（第3部）（土構造物等編），2017.

- (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I共通編 IIIコンクリート橋編，2012.
- (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I共通編 IV下部構造編，2012.
- (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，2012.
- 久木留貴裕，大竹省吾，張寧，岡本信也，伊佐政晃：部分係数設計法による道路開削トンネルの試算，土木学会第75回年次学術講演会講演概要集，V-203，2020.
- 阪神高速道路公団：開削トンネル耐震設計指針（案）-横断方向の耐震設計（資料編），1999.
- 佐名川太亮，佐名川太亮，西岡英俊，神田政幸，森野達也，米澤豊司，青木一二三：慣性力と地盤変位が同時に作用する杭の水平抵抗特性に及ぼす杭体の段落し部での損傷の影響，地盤工学ジャーナル，10巻1号，p.33-44，2015.