

新道示を適用したR C構造物の試算分析

幸左賢二¹・藤井康男²・桶田憲一³・木村隆明⁴

¹ 正会員 Ph.D. 阪神高速道路公団 工務部設計課（〒 541-0056 大阪市中央区久太郎町 4-1-3）

² 正会員 阪神高速道路公団 工務部設計課（〒 541-0056 大阪市中央区久太郎町 4-1-3）

³ 正会員 八千代エンジニアリング㈱（〒 540-0001 大阪市中央区城見 1-4-70）

⁴ 正会員 オリエンタルコンサルタンツ㈱（〒 532-0003 大阪市淀川区宮原 3-3-31）

1. まえがき

平成8年12月に道路橋示方書が改定され（以下「新道示」という。）、耐震設計の基本が構造物の非線形域の変形性能や動的耐力を評価する、いわゆる限界状態設計法の一つともいえる地震時保有水平耐力法（以下「保耐法」という。）に移行した。新道示において、震度法は初期寸法の設定のための手法と位置付けられているが、保耐法では作用外力が増大することなどから、安全性の判定基準を満足しない場合には断面が異なるものとなる。本報告は、新道示を適用して設計されたR C下部工構造物20基余りのデータを収集し、橋脚・基礎について震度法と保耐法を比較することで、保耐法による影響を分析しようと試みたものである。

2. 比較・分析の方法

収集した設計事例の構造諸元の規模は表-1に示すとおりである。影響度を分析するには、震度法と保耐法各々の手法で決定された断面を対比するのが望ましいが、事例では保耐法により決定されたと思われる最終的な断面しか示されておらず、震度法による断面設定の計算には非常に労力を要することになる。そこで、表-2のように橋脚、杭基礎、フーチングの各部材ごとの断面力などを集計し、決定断面に対して震度法と保耐法による外力と抵抗力の比率（余裕度）から、どちらの手法が支配的となっているかを推測した。橋脚を例にとると、表-2に示すように、震度法における余裕度（ M/M_a ）を1とした時の保耐法の余裕度の比率を『必要耐力アップ率』と定義した。この事例の場合、震度法における余裕度は0.80、保耐法における余裕度は0.86であり、必要耐力アップ率は1.07と1を超えており、保耐法で断面が決

表-1 設計事例の構造諸元一覧

支承種別	—	ゴム支承 鋼製支承 免震支承
地盤種別	—	I 種 II 種 III 種
橋脚高	m	6.8～27.6
梁長さ	m	5.5～22.8
杭径	m	φ0.5～φ1.5
杭本数	本	6～16
柱形状 (直角×橋軸)	m	3.0～16.5 ×1.3～4.0
フーチング形状 (直角×橋軸)	m	6.5～17.5 ×3.5～14.25
フーチング厚	m	1.5～4.0

定されている可能性が大きいことを示している。

また、この値は震度法から保耐法への抵抗力の伸び率(1.22)を1とした時の外力の伸び率(1.31)の割合を示すものであり、ここでは外力の伸び率が抵抗力のそれを上回っており、保耐法において厳しい条件となっているという見方もできる。

表-2 各部材における震度法および保耐法での計算結果一覧

				震度法		地震時保耐法		比率	備 考		
柱の照査	外力	水平震度	kh	—	kh = 0.25	kh _e = 0.4	1.6	【構造等の特殊性等】 逆し橋脚			
		kh・W	tf	—	—	607	—	【決定ケース】 常時 震度法 保耐法 その他			
		M	tf・m	3529	4613	1.31	【コメント】 外力Mは1.31倍に対し、抵抗力Maは1.22倍であるため、保耐法で決定				
		H	tf	507	—	—					
	抵抗力	N	tf	1627	1627	1.00					
		コンクリート	σ _{ca}	kgf/cm ²	σ _{ca} = 105	σ _{cc} = 237	2.26				
		鉄筋	σ _{sa}	kgf/cm ²	σ _{sa} = 2700	σ _{sy} = 3000	1.11				
保有耐力	Pa	tf	—	—	706	—					
	曲げモーメント	Ma	tf・m	Mr = 4385	Mu = 5368	1.22					
外力/抵抗力		M/Ma	—	0.80	0.86	1.07					
杭基礎の照査	外力	水平震度	躯体	—	kh = 0.25	kh _p = 0.51	2.04	【構造等の特殊性等】			
		フーチング	—	kh = 0.25	kh _G = 0.70	2.80	【杭本数、配置決定根拠】 支持力 杭体 変位 その他				
		M	tf・m	4637	7999	1.73	【決定ケース】 支持力 常時 震度法 保耐法 その他				
		H	tf	601	1137	1.89	杭 体 常時 震度法 保耐法 その他				
	設計値	N	tf	2417	1983	0.82	【コメント】				
		押入力	P	tf/本	390	573	1.47				
		引拔力	P _t	tf/本	13	-243	—				
	杭体	σ _c	kgf/cm ²	96	降伏していない杭列	—					
		σ _s	kgf/cm ²	2096	3 列	—					
		許容値	押入力	Pa	tf/本	409	837	2.05			
	引拔力	P _t	tf/本	-214	-308	1.44					
		σ _{ca}	kgf/cm ²	120	240	2.00					
		σ _{sa}	kgf/cm ²	2700	3000	1.11					
	設計値/許容値	杭体	σ _{c/σ_{ca}}	—	0.8	(1.00)	(1.25)				
		σ _{s/σ_{sa}}	—	0.78	(1.00)	(1.28)					
		自重M	tf・m	247	233	0.94	【構造等の特殊性等】				
		杭鉛直M	tf・m	144	1637	杭ΣM比	【上側鉄筋の決定根拠】 本ケース 下側鉄筋より その他				
	断面力	杭水平M	tf・m	—	-305	7.03	【本ケースの場合の決定ケース】 常時 震度法 保耐法 その他				
		杭曲げM	tf・m	—	-319	—	【コメント】				
		ΣM	tf・m	391	1246	3.19					
抵抗力		有効幅	b	m	9.93	9.93	1.00				
	コンクリート	σ _{ca}	kgf/cm ²	105	105	1.00					
	鉄筋	σ _{sa}	kgf/cm ²	2700	3000	1.11					
	抵抗力	Ma	tf・m	Mr = 1248	My = 1360	1.09					
外力/抵抗力		M/Ma	—	0.31	0.92	2.97					
曲げの照査	外力	断面力	自重M	tf・m	443	233	0.53	【構造等の特殊性等】			
			杭鉛直M	tf・m	-2651	-3888	杭ΣM比	【下側鉄筋の決定根拠】 本ケース 上側鉄筋より その他			
			杭水平M	tf・m	—	388	1.17	【本ケースの場合の決定ケース】 常時 震度法 保耐法 その他			
			杭曲げM	tf・m	—	407	—	【コメント】			
	ΣM	tf・m	-2208	-2860	1.30						
		有効幅	b	m	10.0	10.0	1.00				
		コンクリート	σ _{ca}	kgf/cm ²	105	105	1.00				
		鉄筋	σ _{sa}	kgf/cm ²	2700	3000	1.11				
	抵抗力	Ma	tf・m	Mr = 2850	My = 3237	1.14	外力Mは1.3倍でその影響は、杭反力増による。抵抗力Maは1.14倍であるため、保耐法で決定				
	外力/抵抗力		M/Ma	—	0.77	0.88	1.14				
	フリーチングの照査	外力	断面力	自重S	tf	-173	-173	1.00	【構造等の特殊性等】		
				杭鉛直S	tf	-27	-963	35.67	直角方向をあらわす。		
				S	tf	-200	-1136	5.68	【決定ケース】 常時 震度法 保耐法 その他		
				Sh	tf	-200	-1136	5.68	【rac内訳】 C _e C _{pt} C _{dc} α r _{al} 0.87 0.78 1.00 0.68 3.3		
		抵抗力	有効幅	b	m	10.0	10.0	1.00	【S _s '内訳】 C _{ds} 【スターラップ】 1.00 D16@250		
			コンクリート	τ _{ac}	kgf/cm ²	2.2	2.2	1.00	【コメント】 下側引張でスターラップは決定		
鉄筋			σ _{sa}	kgf/cm ²	2700	3000	1.11				
S _c			tf	416	416	1.00					
抵抗力		S _s '	tf	1396	1551	1.11					
		Σ = P _s	tf	1812	1967	1.09					
		外力/抵抗力	Sh/P _s	—	0.11	0.58	5.27				
		せん断の照査	外力	断面力	自重S	tf	-64	-64	1.00	【構造等の特殊性等】	
杭鉛直S					tf	1372	2287	1.67	直角方向をあらわす。		
S					tf	1308	2223	1.70	【決定ケース】 常時 震度法 保耐法 その他 ()		
有効幅					b	m	10.0	10.0	1.00	【rac内訳】 C _e C _{pt} C _{dc} α r _{al} 0.87 1.04 3.19 2.89 3.3	
抵抗力			コンクリート	τ _{ac}	kgf/cm ²	9.6	9.6	1.00	【S _s '内訳】 C _{ds} 【スターラップ】 0.37 D16@250		
	鉄筋		σ _{sa}	kgf/cm ²	2700	3000	1.11	【コメント】 外力Sは1.7倍でその影響は杭反力増による。抵抗力はコンクリートによる抵抗値が増大しないため、スターラップに期待することになる。			
	S _c		tf	1772	1772	1.00					
	S _s '		tf	511	564	1.10					
Σ = P _s	tf		2283	2336	1.02						
外力/抵抗力			S/P _s	—	0.57	0.95	1.67				

Ca:有効高に関する補正

Cpt:引張主鉄筋比による補正

Cdc:せん断ス/ン比による割増

α:=Ca*Cpt*Cdc

Cds:せん断ス/ン比による低減係数

3. 設計事例の分析結果

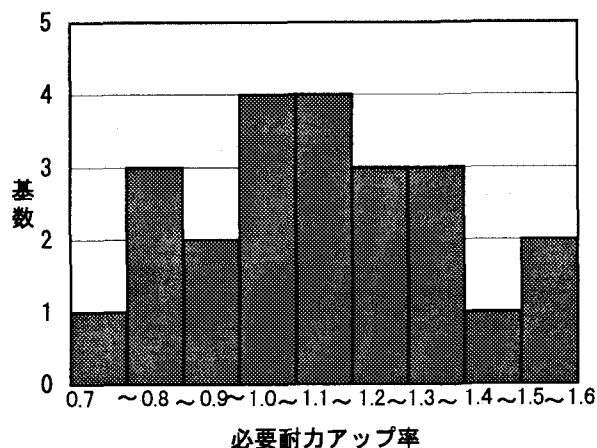


図-1 橋脚の必要耐力アップ率

(1) 橋脚

23基（杭基礎14基、直接基礎9基）の分析結果から、図-1に示すように17基の必要耐力アップ率が1を超えており、大部分が保耐法により断面が決定されていると推測できる。これらの要因としては、地盤種別と柱形状が影響していると考えられるため、それらと必要耐力アップ率の関係を図-2のようにプロットした。この図から、I種地盤とII種地盤でそれぞれグループ分けができ、I種地盤の方がII種地盤に比べて耐力アップが必要なことが判る。これらは、震度法と保耐法の設計震度の比率が影響しているものと考えられる。即ち、震度法では、I種地盤で $k_h=0.20$ 、II種地盤で $k_h=0.25$ であるが、保耐法ではじん性を考慮した等価水平震度を適用しており、最大値でI種地盤の場合2.00、II種地盤の場合1.75となり、I種地盤の方が増加倍率が大きく、最小値でみた場合でもその値は両者ともに $k_{ne}=0.40$ であり、I種地盤では $0.4/0.2=2$ 倍、II種地盤では $0.4/0.25=1.6$ 倍となり、保耐法での必要耐力アップ率は、II種地盤よりI種地盤の方を大きくする必要があると考えられる。

また、橋脚形状では、同じ図-2に示すように、橋脚断面の縦横比の割合が大きくなるほど耐力アップが必要となることが判る。これらは、保耐法においては壁式の橋脚では矩形断面に比べて軸方向の側面鉄筋が主鉄筋に対して相対的に見て少なくなり、側面鉄筋の効果による耐力の増加が少ししか見込めないためであると考えられる。

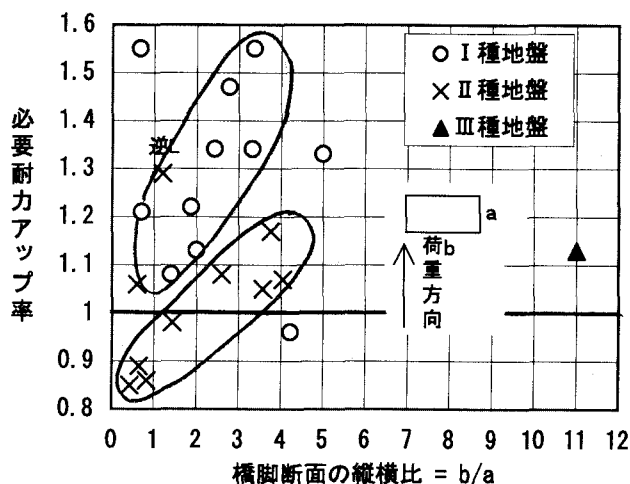


図-2 必要耐力アップ率と地盤種別および橋脚断面形状の関係

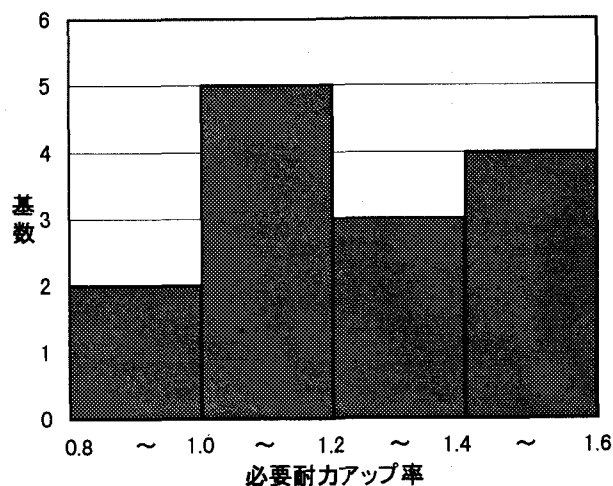


図-3 フーチング下側引張時における必要耐力アップ率(杭基礎)

(2) 杭基礎

(a) フーチング

図-3にフーチングの下側引張時の必要耐力アップ率を示しているが、14基のうち12基が1を超えており、大部分が保耐法により断面が決定されていると推測できる。図-4には曲げモーメントとの関係を示しているが、必要耐力アップ率1以下、すなわち震度法で決定されるものが2基ある。これらは、震度法時における有効幅（柱幅+フーチング有効高の2倍）と保耐法時の有効幅（全幅）の差が大きく、保耐法時の曲げモーメントの増分がさほど大きくないような場合のケースであると考えられる。

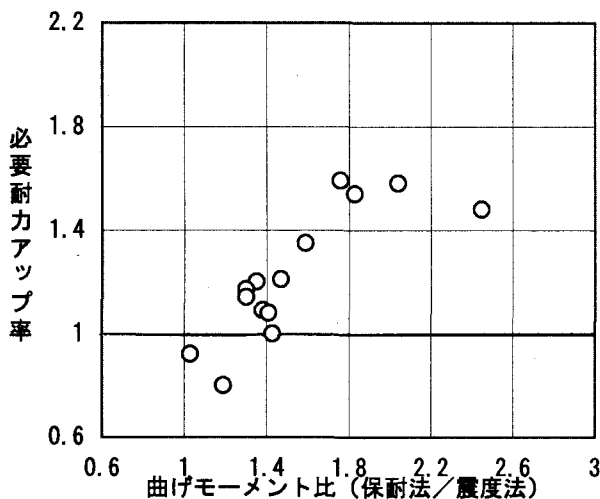


図-4 曲げモーメント比と必要耐力アップ率の関係(杭基礎)

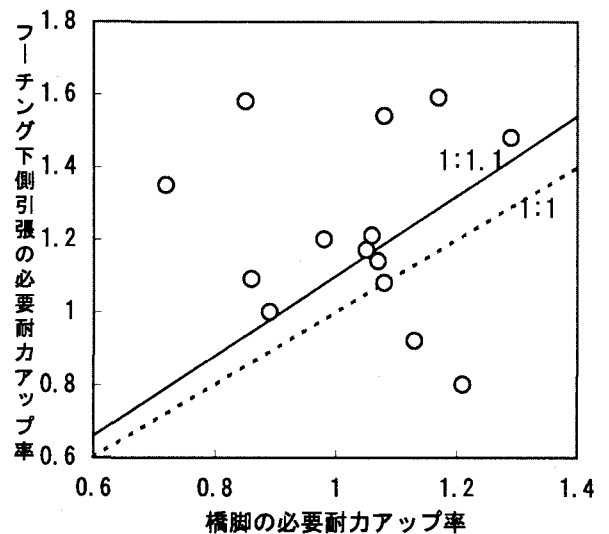


図-5 橋脚とフーチングの必要耐力アップ率(杭基礎)

また、必要耐力アップ率に関して、橋脚とフーチングを比較すると図-5のようになり、ほとんどがフーチング下側引張時のアップ率が上回っている。これらは、新道示では基礎は地中にあることから、下部構造躯体に比べて損傷の発見が困難であることや、その補修も大規模とならざるを得ないことから、基礎の耐力は橋脚躯体の終局耐力以上(①式)に示すように設計水平震度で1.1倍)とされていることに起因していると考えられる。また、橋脚では横拘束効果や側面鉄筋を考慮した終局耐力で評価しているが、フーチング部材については、通常のRC断面として降伏状態で評価していることも影響していると考えられる。

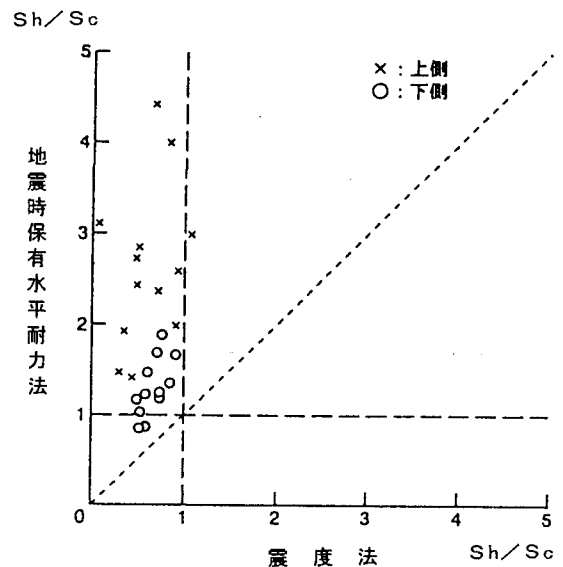


図-6 震度法と保耐法におけるせん断力の関係(杭基礎)

$$k_{HP} = C_{DF} \cdot P_U / W \quad \text{.....①}$$

ここに、

k_{HP} : 保耐法による基礎の設計に用いる設計水平震度

C_{DF} : 保耐法による基礎の設計水平震度の算出に用いる補正係数で1.1とする。

P_U : 基礎が支持する橋脚の終局水平耐力 (tf)

W : 保耐法に用いる等価重量 (tf)

一方、せん断力については、改訂前(平成2年)の道路橋示方書ではコンクリートのみの抵抗力でたせることができていたが、新道示では図-6に示すようにほとんどが保耐法で斜引張鉄筋が必要となっている。これらは、保耐法時の杭反力が増大したことで、斜引張鉄筋の要否を判定するコンクリートの許容せん断応力度の基本値が低減され、部材断面の有効高や引張鉄筋比による補正のため強度が平成2年に比べて約5割から9割程度に低下したことによると考えられる。このために斜引張鉄筋が必要となり、その算出においてはせん断スパン比による低減が影響して、D19@500～D29@300と多量の鉄筋が必要となっている。

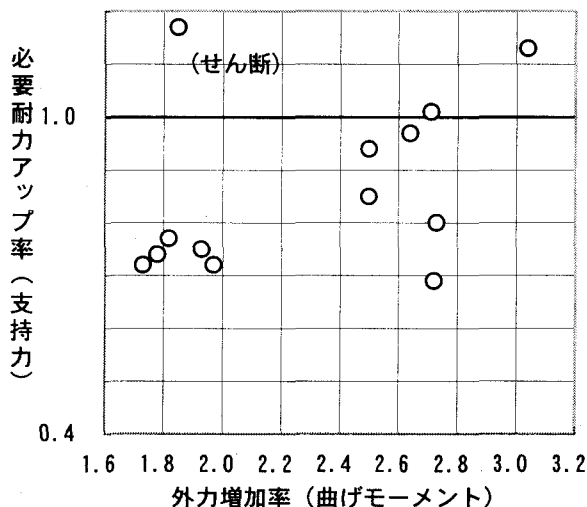


図-7 曲げモーメントの増加率と支持力の必要耐力アップ率との関係(杭基礎)

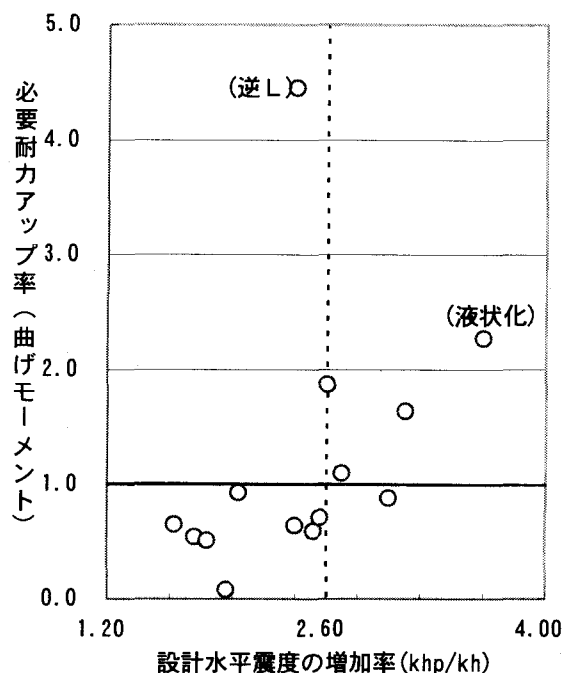


図-8 設計水平震度の増加率と杭体曲げの必要耐力アップ率との関係

(b) 杭

杭反力は、フーチング底面に作用する曲げモーメントの影響が大きいと考えられるため、図-7のように底板中心の曲げモーメント増加率と支持力に関する必要耐力アップ率との関係を示した。これによると、約8割が耐力アップ率1以下と震度法が卓越しており、保耐法で決まっているのは曲げモーメント増加率が2.6倍程度以上の場合である。これらは、保耐法における支持力の許容値が極限值まで取れることと軸力の影響などによると考えられる。

一方、杭本体についてはフーチング底面に作用する水平力、すなわち、設計水平震度の影響が大きいと考えられるため、図-8のように設計水平震度の増加率と曲げに関する必要耐力アップ率との関係を示した。ここでも、6割強が耐力アップ率1以下と震度法が卓越しており、保耐法で決まっているのは k_{hp}/k_h が支持力と同程度の約2.6以上となっている。これらは、保耐法において、耐力面ではコンクリートに対する帯鉄筋の拘束効果、主鉄筋を降伏点まで評価すること、引拔を無視 ($N=0$) することなどが考えられる。また、断面力に関しては、震度法では評価されていなかったフーチングの前面抵抗が考慮でき、これにより杭に作用する水平力が減少していることも大きな要因であると考えられる。

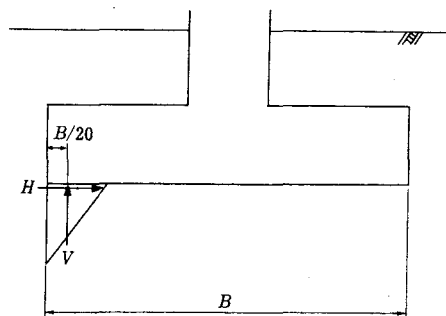


図-9 フーチングの設計における地盤反力の作用位置²⁾

(3) 直接基礎

新道示では、直接基礎の安定計算については、従来どおり震度法により設計し、保耐法の照査を行わなくてよいとされているが、フーチングの設計においては従来の設計方法に加えて、地盤反力を基礎端部付近に集中して作用させて設計する方法が追加されている。具体的には、図-9に示すように、地盤反力を基礎端部から基礎幅の1/20だけ内側に作用させて設計を行うものである。

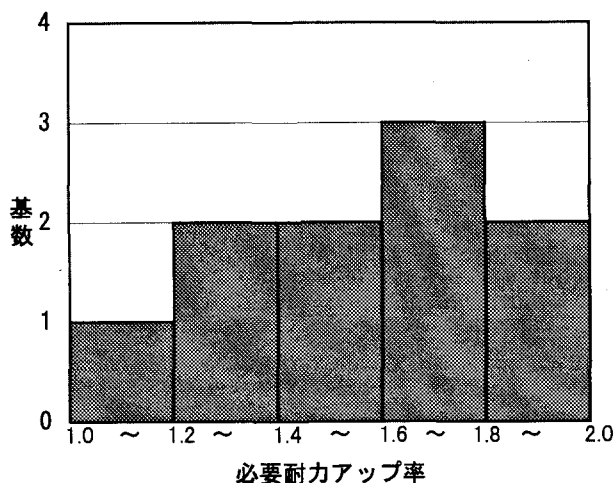


図-10 フーチングの曲げ必要耐力アップ率
(直接基礎)

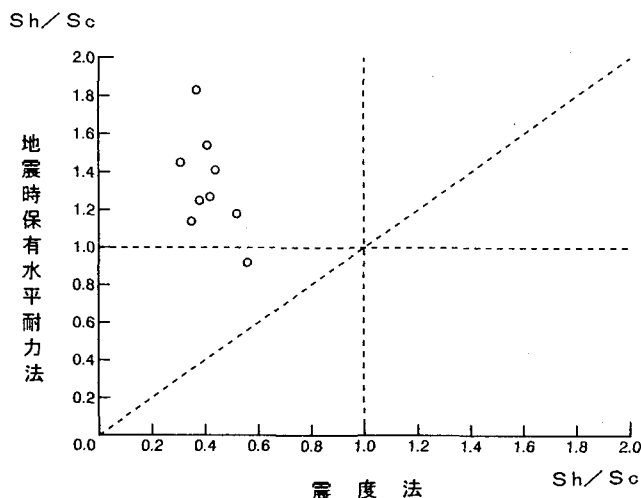


図-11 震度法と保耐法におけるせん断力の関係(直接基礎)

フーチングの曲げモーメントに関する必要耐力アップ率を図-10に示す。安定計算は震度法のみによって行われるため、基礎の形状は震度法で決定されるが、応力度計算はすべて必要耐力アップ率が1を上回っており、保耐法で決定されている。これらは、保耐法における地盤反力の作用位置、すなわち偏心量が大きく、曲げモーメントが増大するためと考えられる。また、せん断スパンが長くなるために、コンクリートの負担するせん断力が震度法より減少し、図-11に示すように杭基礎の場合と同様、ほとんどの場合保耐法で斜引張鉄筋が必要となっており、その量もD16@600~D22@250と多量になっている。

4. まとめ

今回の設計事例の分析からは、新道示による影響については、主に次のようなことが推測される。

(1) 橋脚

矩形に近い橋脚は、側面鉄筋の影響により必要耐力アップ率が30%以下であり、鉄筋量で調整できる範囲と考えられる。一方、I種地盤の壁式橋脚ではその効果が期待できず、設計震度の増加率も大きくなるため、断面形状にも影響する可能性が大きい。

(2) フーチング

設計震度を橋脚終局耐力の1.1倍とすること、その応力度を降伏点以下とするなどにより、鉄筋量の増加が必要となり、断面形状に影響を及ぼす場合も考えられる。また、せん断については従来ほとんどのフーチングで斜引張鉄筋が不要であったものが、コンクリートが負担できるせん断力の低減などにより、保耐法ではかなり密に配置する必要性が生じている。

(3) 杭

杭は、支持力および杭本体とも震度法で決まることが7割程度であった。これらは、保耐法では支持力を極限值までとることができ、震度法に比べて約2倍の評価ができること、また、杭本体は帯鉄筋の拘束効果やフーチング前面抵抗の考慮などが要因であると考えられる。

以上、新道示を適用して設計されたRC下部工構造物20基余りについて分析を行ったが、それらの結果からは全体的に鉄筋量や断面寸法が改訂前の道示に比べて増大しているものと考えられる。したがって、設計を行うにあたっては合理的な断面を設定することが重要な課題となり、特に、基礎についてはその設計思想からすると、橋脚に余裕がある場合には基礎ではさらに余裕をもつことになる。そのため、当然のことながらコストはアップするし、鉄筋量の増大は施工性にも影響を及ぼすなど問題が生じてくるものと思われる。

今後は、より多くの事例をもとにこのような分析がなされれば、各々の部材において傾向と問題点などを明らかにすることができると思われ、より合理的、省力的な設計が望まれるところである。

参考文献

- 1) 日本道路協会, 道路橋示方書・同解説
V耐震編, pp. 60-61, 1996. 12
- 2) 日本道路協会, 道路橋示方書・同解説
IV下部構造編, pp. 270, 1996. 12