

新道示(H8)を適用したRC構造物の設計事例分析 による断面決定要因に関する検討

工務部 設計課 藤井 康 男
元工務部 設計課 幸 左 賢 二
(九州工業大学助教授)

要 旨

平成8年12月改訂の道路橋示方書に基づき設計された20基余りの橋脚・基礎について、震度法および保耐法での評価を行い、断面形状や鉄筋量に対する影響について分析を行った。その結果、保耐法での作用外力の増大に対して、II種地盤で矩形に近い橋脚については、震度法で求まる断面形状を変えずに鉄筋量だけで調整できるが、I種地盤で壁式の場合はその可能性が低くなることが示された。また、フーチングについてはコンクリートの負担するせん断耐力が低減されるなど耐力面での評価が厳しくなっており、鉄筋量は大幅に増加し、場合によっては断面形状に影響することも予想される。一方、杭については帯鉄筋の拘束効果やフーチングの前面抵抗など耐力面での評価が考慮されており、支持力および杭本体とも震度法で決まっている事例が多かった。

キーワード：震度法、地震時保有水平耐力法（保耐法）、必要耐力アップ率、降伏耐力・終局耐力

まえがき

平成8年12月に道路橋示方書（以下、新道示という）¹⁾が改訂され、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、震度法は主として初期寸法の設定のための手法と言う意味合いが強く、保耐法では作用外力が増大することなどにより、安全性の判定基準を満足しない場合には断面寸法や鉄筋量が増加することになる。

本報告は、新道示を適用して設計されたRC下部構造物20基余りのデータを収集し、橋脚・基礎の決定断面に対して震度法と保耐法の外力と抵抗力を試算・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。

1. 新道示（V耐震設計編）の改訂概要

今回の改訂は、兵庫県南部地震で実際に観測された地震動に対しても耐えられる構造とすることを目標とした復旧仕様の考え方を基本に、その後の実験による検証や設計法の明確化等を加えたもので、その基本事項は以下のとおりとされている。

- ①設計上考慮すべき地震動として、兵庫県南部地震のようなマグニチュード7級の内陸直下型地震による地震動を追加。
- ②設計法としては、復旧仕様の考え方を基本に橋全体系として変形性能を向上させ、耐震性を高めるため、鉄筋コンクリート橋脚に加え、鋼製橋脚、基礎などについて、保耐法による設計の考え方を導入。

具体的には、①に関しては、平成2年に規定された大正12年の関東地震のように発生頻度が低いプレート境界型の大規模な地震によるタイプI地

震動(最大応答加速度0.7~1g)に加えて、今回のタイプII地震動(最大応答加速度1.5~2g)が規定されており、保耐法に用いる設計水平震度の標準値は図-1に示すとおりである。なお、保耐法では等価水平震度の下限値を0.4としており、周期が長い構造物などでも一定以上の耐力を付与し、耐力が過度に低い構造物が設計されないよう配慮がなされている。

一方、②に関しては、耐震設計の基本が震度法から保耐法に移行した点が最も重要な改訂事項であり、保耐法は地震時の挙動が複雑でない橋に対しては実用上十分な精度で橋の挙動を簡便に表すことができる静的解析法とされている。また、保耐法は平成2年版道路橋示方書(以下「旧道示」という)の耐震設計編に鉄筋コンクリート橋脚の照査規定として取り入れられたが、兵庫県南部地

震による被災状況から、構造系のじん性確保の重要性が強く認識されたため、鋼製橋脚、基礎、支承部、落橋防止システムなどの構造部材に適用を拡げると同時に、照査法ではなくて設計法として位置付けを明確にされている。

なお、これら内容の詳細については、文献1)、2)を参照して頂きたい。

2. 比較・分析の方法

収集した設計事例の構造諸元は、表-1に示すとおりである。本来、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再計算には非常に労力を要することになる。そこで、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に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、これに対して保耐法の余裕度は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

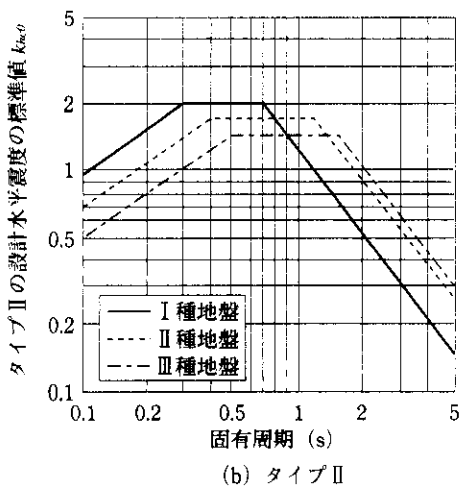
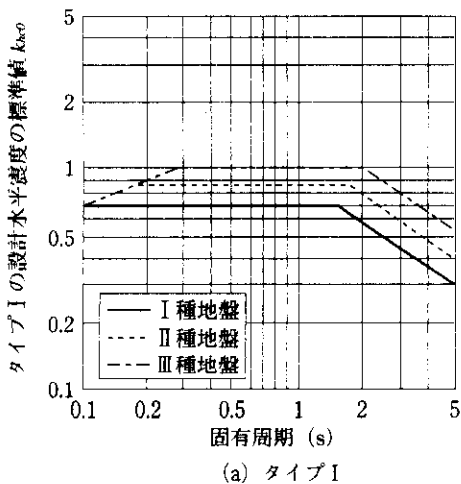


図-1 保耐法に用いる設計水平震度の標準値

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
杭数	m	φ0.5~φ1.5
杭本数	本	6~16
柱寸法 (直角×橋軸)	m	3.0~16.5 ×1.3~4.0
フーチング寸法 (直角×橋軸)	m	6.5~17.5 ×3.5~14.25
フーチング厚	m	1.5~4.0

表-2 橋脚における震度法および保耐法での分析事例

				震度法	保耐法	比率
外力	水平震度	k_h	—	$k_h=0.25$	$k_{he}=0.4$	1.6
		$k_{he} \cdot W$	tf	—	607	—
	柱下端断面力	M	tf-m	3529	4613	1.31
		H	tf	507	—	—
N		tf	1627	1627	1.00	
抵抗力	コンクリート	σ_{ca}	kgf/cm ²	$\sigma_{ca}=105$	$\sigma_{cc}=237$	2.26
	鉄筋	σ_{sa}	kgf/cm ²	$\sigma_{sa}=2700$	$\sigma_{sy}=3000$	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

法で断面が決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が抵抗力の伸びを上回っており、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。

3. 設計事例の分析結果

3-1. 橋脚

22基(杭基礎13基、直接基礎9基)の分析結果から、図-2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。さらに、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わかる。これらは、震度法と保耐法の設計水平震度の比率が影響しているものと考えられる。すなわち、震度法ではI種地盤で $k_h=0.20$ 、II種地盤で $k_h=0.25$ であるのに対して、保耐法ではタイプII地震動の設計水平震度の標準値 k_{hco} の最大は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、等価水平震度の下限值で見た場合でもその値は両者ともに $k_{he}=0.40$ 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、保耐法での耐力アップ率はII種地盤よりもI種地盤の方が大きくなっていると考えられる。

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が大きい壁式になるほど耐力アップが必要となることがわかる。これらは、保耐法においては、震度法とは異なり、図-3に示す荷重作用方向(面外)に平行な鉄筋⑧も考慮して計算を行うが、縦横比の小さい矩形断面に比べて、壁式の断面では軸方向の側面鉄筋(鉄筋⑧)が主鉄筋(鉄筋④)に対して相対的にみて少なくなり、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。

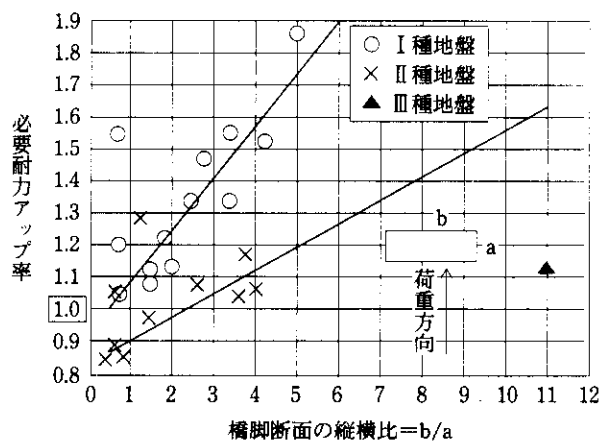


図-2 必要耐力アップ率と地盤種別および橋脚断面形状の関係

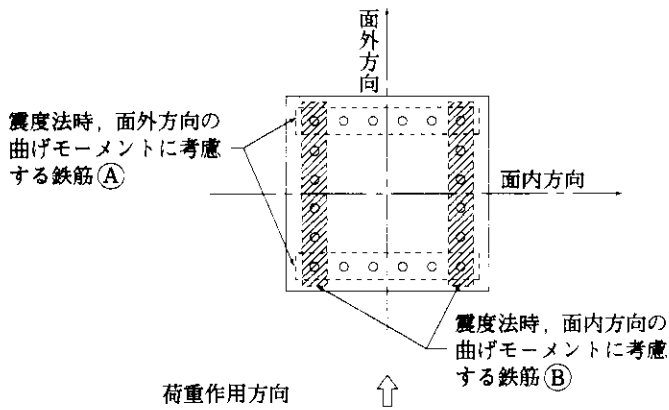


図-3 曲げモーメントの方向と鉄筋

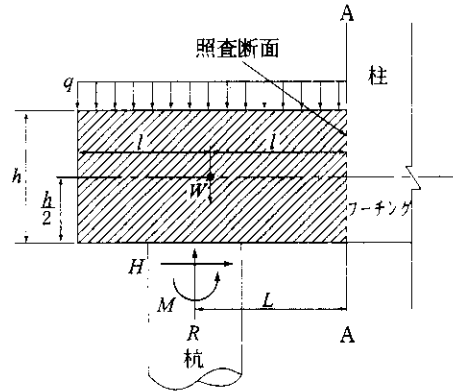
3-2. 杭基礎

(1) フーチング

フーチングに作用する荷重および断面力は図-4に示すとおりであり、震度法では杭頭の鉛直反力 R のみであったものが、保耐法では杭頭の曲げモーメント M と水平反力 H も考慮されている。

図-5にフーチングの下側引張時の必要耐力アップ率と曲げモーメント比を示しているが、14基のうち11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。これに対して、必要耐力アップ率1以下、すなわち震度法で決定されているものが3基ある。これらは、震度法時における有効幅（柱幅+フーチング有効幅の2倍）が保耐法時の有効幅（全幅）に比べてかなり小さく、かつ、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ケースであると考えられる。

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-6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、新道示において、基礎は橋脚躯体の終局耐力と同等以上の耐力（橋脚耐力のばらつきを考慮して、補正係数により1.1倍としている³⁾）とする設計の基本方針によるものと考えられる。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断面として降伏耐力で評価していることも影響していると考えられる。



- R : 杭頭の鉛直反力 (tf)
 - W : フーチング自重 (tf)
 - H : 杭頭の水平反力 (tf)
 - M : 杭頭の曲げモーメント (tf-m)
 - q : 上載荷重 (tf/m)
 - L : 照査断面から杭中心位置までの距離 (m)
 - l : 照査断面からフーチングの自重の作用点までの距離 (m)
 - h : フーチングの厚さ (m)
- 注) 許容応力度法による設計では、 M, H は考慮しない。

図-4 杭基礎フーチングに作用する荷重および断面力⁴⁾

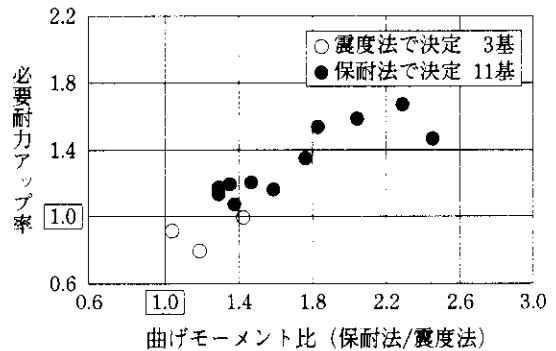


図-5 曲げモーメント比と必要耐力アップ率の関係

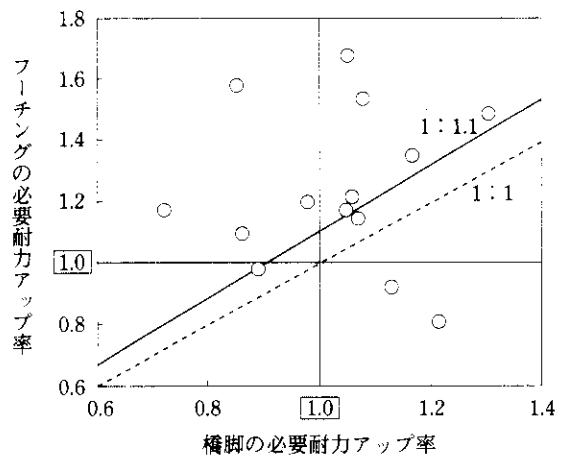


図-6 橋脚と杭基礎フーチングの必要耐力アップ率

一方、フーチングのせん断に関する規定の比較は、直接基礎を含めて表-3のとおりである。

せん断力については、図-7に示すように、震度法では作用せん断力Shよりもコンクリートの負担する耐力Scの方が大きく、ほとんどのケースでコンクリートのみの抵抗力でもたせることができていた。これに対して、保耐法時では杭反力が増大したことから、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旧道示に比べて5割から9割程度に低下したことから斜引張鉄筋が必要となっている。その算出においては図-8に示すようにせん断スパン比によるせん断耐力の低減が影響して、式(1)⁵⁾のS_sとしてD19@500~D29@300と多量の鉄筋が必要となっている。

$$P_s = S_c + S_s \dots\dots\dots(1)$$

ここに、

P_s：せん断耐力

S_c：コンクリートの負担するせん断耐力

S_s：斜引張鉄筋の負担するせん断耐力

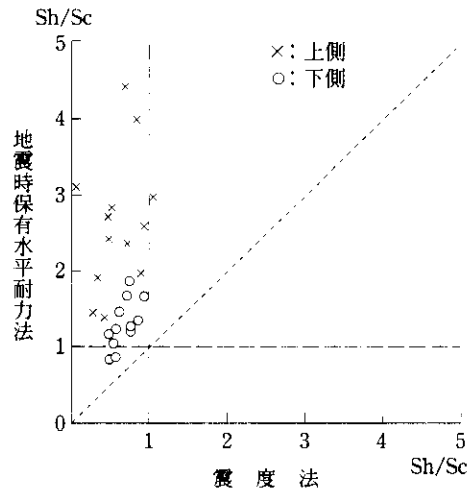


図-7 震度法と保耐法におけるせん断力の関係

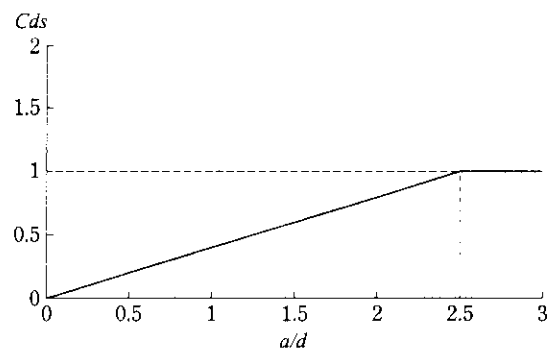


図-8 せん断スパン比 a/d による斜引張鉄筋の負担するせん断耐力の低減係数C_{ds}⁶⁾

表-3 フーチングのせん断に関する規定の比較 (地震時)


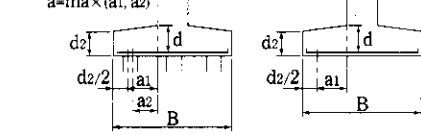
		新道示	旧道示
許容応力度		$C_e \times C_{pt} \times C_{dc} \times \tau_c$ C _e ：有効高による補正值 : 1.4~0.5 C _{pt} ：引張鉄筋比による補正值 : 0.7~1.5 C _{dc} ：アーチ効果による補正值	$\alpha \times \tau_{a1}$ α：せん断スパンによる補正 (上下の区別なし)
	せん断補強要否の判定	上側 C _{dc} = 1.0 下側 C _{dc} = $\frac{6.3}{1.3 + 0.8 \times (a/d)^2}$: 1.0~4.85 (例) σ _{ck} = 24 N/mm ² τ _c = 0.35 N/mm ²	$\alpha = 3 \cdot \frac{a}{d} \quad (\alpha \leq 2.0)$ (例) σ _{ck} = 24 N/mm ² τ _{a1} = 0.39 × 1.5 = 0.585 N/mm ²
せん断スパン			
せん断耐力	コンクリート	$S_c = C_e \times C_{pt} \times C_{dc} \times \tau_c \times b \times d$ (例) σ _{ck} = 24 N/mm ² τ _c = 0.35 N/mm ²	$S_c = (1/2) \times \alpha \times \tau_{a1} \times b \times d$: 震度法 $S_c = \alpha \times \tau_c \times b \times d$: 保耐法 (例) σ _{ck} = 24 N/mm ² 震度法：τ _{a1} = 0.39 N/mm ² (割増しなし) 保耐法：τ _c = 0.39 N/mm ²
	スターラップ	$S_s = \frac{\sigma_{sn} \times A_w \times d}{1.15 \times s} C_{ds}$ C _{ds} ：せん断スパンによる補正值 C _{ds} = (1/2.5) × (a/d)：下側引張, C _{ds} = 1.0：上側引張	$S_s = \frac{\sigma_{sn} \times A_w \times d}{1.15 \times s}$

表-4 杭基礎の保耐法による耐震設計の要約⁷⁾

	基本方針	杭基礎での対応
解析モデル	地盤抵抗, 基礎体の非線形性を考慮	鉛直・水平方向地盤弾塑性, 抗体 $M-\phi$
降伏状態	水平変位が急増する	全杭降伏あるいは1列鉛直支持力上限
塑性率の限界	杭体に過大な損傷を生じさせない	4を目安
変位の制限	橋全体の安全性に影響を与えない	フーチング底面で40cm, 0.025rad

(2) 杭

杭基礎の保耐法による耐震設計の要約を表-4に, 一般的な構造解析モデルを図-9に示す。

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-10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。これによると6割強が必要耐力アップ率1以下であり, k_{hp}/k_h がさほど大きくない場合は震度法が卓越している。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考慮すること, 引抜きを無視 ($N=0$) 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。

一方, 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-11のように底版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。ここでも, 約8割が必要耐力アップ率1以下と震度法が卓越しており, 保耐法で決まるのは1例(せん断で決定)を除き, 外力増加率の大きい場合に限られている。これらは, 保耐法における支持力の許容値が極限值までとれることと軸力 N が震度法時と変わっていないことによると考えられる。

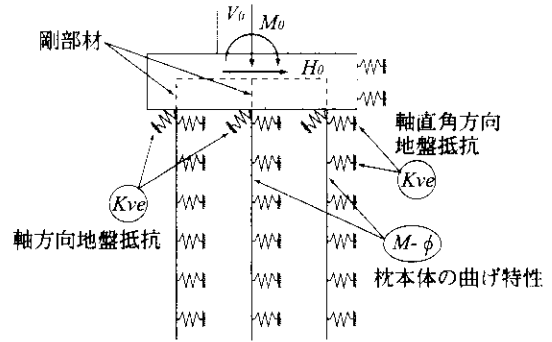


図-9 保耐法における解析モデル⁸⁾

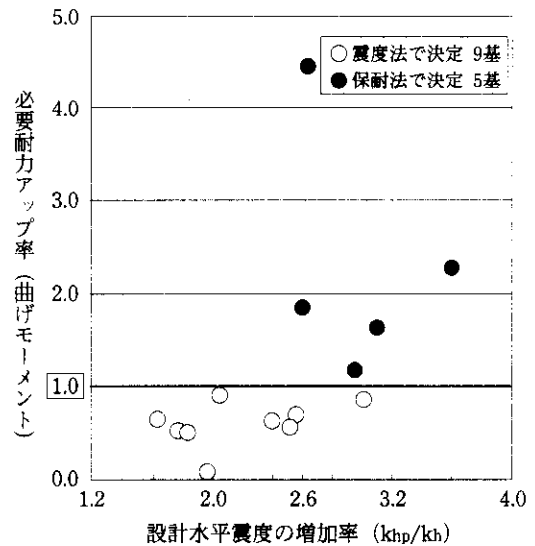


図-10 設計水平震度の増加率と杭体曲げの必要耐力アップ率との関係

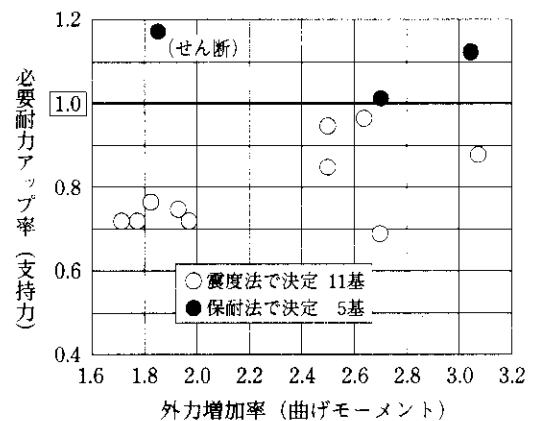


図-11 曲げモーメントの増加率と支持力の必要耐力アップ率との関係

3-3. 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

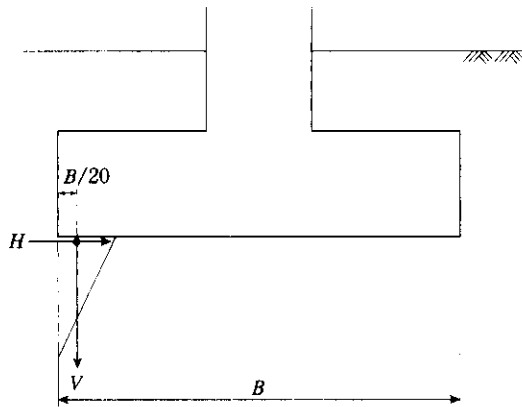


図-12 フーチングの設計における地盤反力の作用位置⁹⁾

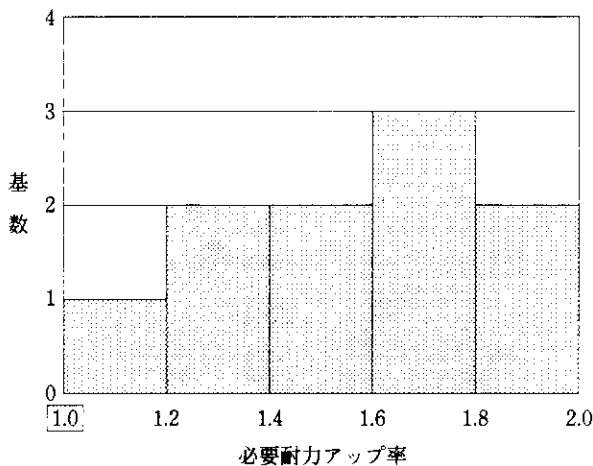


図-13 フーチングの曲げ必要耐力アップ率 (直接基礎)

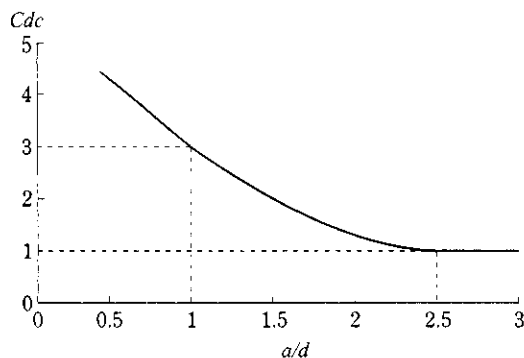


図-14 せん断スパン比 a/d によるコンクリートの負担するせん断耐力の割増係数 Cdc ¹⁰⁾

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-12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

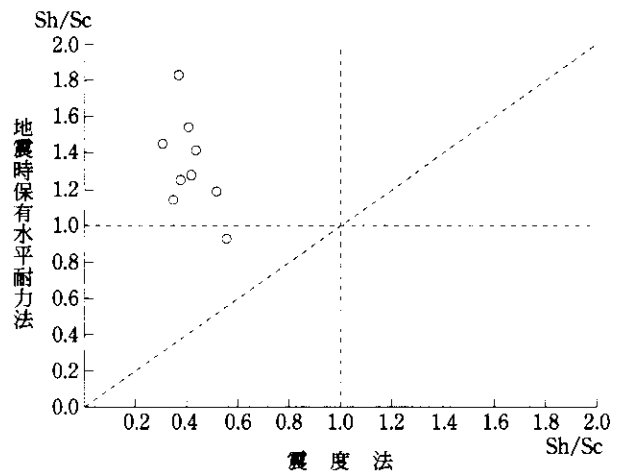


図-15 震度法と保耐法におけるせん断力の関係

内側に作用させて設計を行うものである。

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-13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、偏心量が大きくなり、曲げモーメントが増大するためと考えられる。また、図-14に示すように、せん断スパンが長くなるためコンクリートの負担するせん断耐力の割増係数が減少し、図-15に示すように杭基礎の場合と同様、ほとんどの場合に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. 考察

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

(1) 橋脚

II種地盤で矩形に近い橋脚は、側面鉄筋の影響により必要耐力アップ率が20%程度以下であり、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

耐力を橋脚終局耐力の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ケース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耐力の低減やせん断スパン比の影響などにより、保耐法ではかなり密に配置する必要が生じている。

(3) 杭

杭は、支持力で8割程度、杭本体で6割強が震度法で決まっている結果となった。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断面寸法や鉄筋量が改定前の旧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問題となり、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、鉄筋量の著しい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ため、橋脚の耐力には必要以上に余裕を与えないように留意する必要がある。

5. あとがき

今回の分析事例は数も多くないことから、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の傾向と問題点をより明らかにすることができ、それらに新たな知見や検討を加えることにより、合理的、省力的な設計につながることを期待できると思われる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，1996.12.
- 2) 例えば、「道路橋示方書V耐震設計編 改訂の概要」，「地震時保有水平耐力法による耐震設計」など，基礎工 Vol.25, No.3, 1997.3.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，pp.60, 1996.12.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編，pp.212, 1996.12.
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編，pp.143, 1996.12.
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編，pp.218, 1996.12.
- 7), 8) 松井謙二, 友永則雄：改訂のポイント－杭基礎の設計，基礎工 Vol.25, No.2, pp.44, 1997.2.
- 9) 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.
- 10) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編，pp.218, 1996.12.