

報告 新道示式適用に伴うフーチングのせん断に関する影響度分析

藤井康男^{*1}・幸左賢二^{*2}・桶田憲一^{*3}・木村隆明^{*4}

要旨: 兵庫県南部地震クラスの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地震時保有水平耐力法による耐震設計において、特に設計条件が厳しいフーチングのせん断について、実際の設計事例をもとに影響度の分析を行った。作用外力が増大した一方で、せん断に関する規定の改訂によりコンクリートおよびスターラップが負担するせん断力が低下しているため、従来はコンクリートのみで対応できていたものが、ほとんどの事例でせん断補強が必要となっており、スターラップも大量に配置される結果となっている。

キーワード: フーチング、せん断力、スターラップ、地震時保有水平耐力法、震度法

1. はじめに

平成8年12月に道路橋示方書が改訂され（以下「新道示」といい、これに対して従来の道路橋示方書を「旧道示」という。）¹⁾²⁾、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。

新道示では、保耐法による設計で用いる大きな地震力に対し、橋脚や杭では、構造部材や地盤の塑性化によって地震時のエネルギーを吸収する方法をとっている。しかし、フーチングでは塑性化することを許容していないため、保耐法においてより厳しい条件となっている。さらに、フーチングの許容せん断応力度やスターラップの補強効果等の規定が改訂されたことによって、震度法による設計では支配的な要因とならなかつたせん断力が、フーチング断面決定の上で大きな要因となっていることが予想される。

本報告は、新道示を適用して設計されたRC下部工20基余り（杭基礎および直接基礎）のデータから、フーチングのせん断力について震度

法と保耐法の比較をすることで、保耐法による影響を分析しようと試みたものである³⁾。

2. 新道示改訂の概要

2.1 フーチングのせん断力に対する設計

新道示におけるフーチングのせん断力に対する設計モデルを表-1に示す。

震度法では、構造物の固有周期から求めた設計震度が柱とフーチングとに一様に作用するものとして、杭反力や地盤反力を算定する。これに対して、保耐法では、杭基礎の場合は柱基部が終局化した状態、直接基礎の場合はフーチング先端でつま先立った状態など、基礎の形式毎に想定した設計モデルに応じて外力や反力を算定する。

2.2 フーチングのせん断力に関する規定

(1) 新旧道示の規定の比較

フーチングのせん断力に関する規定について、新旧道示の比較を表-2に示す。主な相異点は、コンクリートの許容せん断応力度の基本値、有効高や引張鉄筋比が許容せん断応力度に及ぼす影響、せん断スパンのとり方、アーチ効果に応

*1 阪神高速道路公団 工務部設計課（正会員）

*2 九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科 Ph.D.（正会員）

*3 八千代エンジニアリング（株） 大阪支社

*4 （株）オリエンタルコンサルタンツ 関西支社

表-1 新道示におけるフーチングのせん断力に対する設計モデル

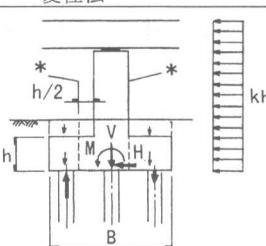
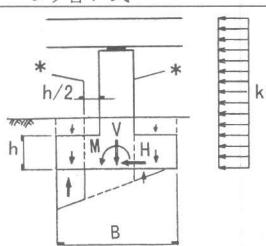
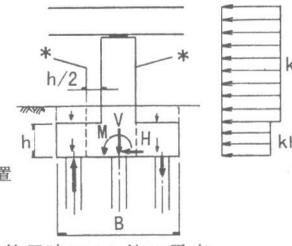
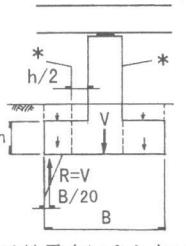
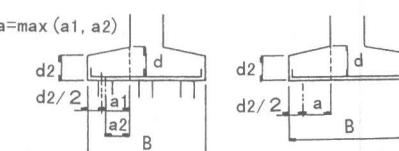
| | | 杭基礎 | 直接基礎 |
|-----|-----|--|--|
| 震度法 | 変位法 | 直接基礎 | |
| | |  <p>* : せん断照査位置 kh : 地盤種別毎に固有周期により算定</p> |  <p>* : せん断照査位置 kh : 地盤種別毎に固有周期により算定</p> |
| モデル | 保耐法 | <p>地盤と杭の非線形性を考慮した荷重増分法</p>  <p>* : せん断照査位置 k_{hp} : 柱基部終局時の 1.1 倍の震度 k_{hg} : 地震のタイプと地盤種別で決まる震度</p> | <p>つまり立った状態</p>  <p>* : せん断照査位置 $R=V$ $B/20$ B 地盤反力分布は地震力によらない。</p> |

表-2 フーチングのせん断力に関する規定について新旧道示の比較（地震時）

| | | 新道示 | 旧道示 |
|--------|------------|---|---|
| 許容応力度 | せん断補強要否の判定 | $C_e \times C_{pt} \times C_{dc} \times \tau_c$ C_e : 有効高による補正値 : 1.4 ~ 0.5 C_{pt} : 引張鉄筋比による補正値 : 0.7 ~ 1.5 C_{dc} : アーチ効果による補正値 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) $\sigma_{ck} = 24 \text{ N/mm}^2$ $\tau_c = 0.35 \text{ N/mm}^2$ | $\alpha \times \tau_{al}$ α : せん断スパンによる補正 (上下の区別なし) $\alpha = 3 - \frac{a}{d}$ ($\alpha \leq 2.0$) (例) $\sigma_{ck} = 24 \text{ N/mm}^2$ $\tau_{al} = 0.39 \times 1.5 = 0.585 \text{ N/mm}^2$ |
| せん断スパン | |  <p>震度法 $B/6$ 保耐法 $B/20$</p> |  <p>$a = \max(a_1, a_2)$ d_2 $d_2/2$ a_1 a_2 d B</p> |
| せん断耐力 | コンクリート | $Sc = C_e \times C_{pt} \times C_{dc} \times \tau_c \times b \times d$ (例) $\sigma_{ck} = 24 \text{ N/mm}^2$ $\tau_c = 0.35 \text{ N/mm}^2$ | $Sc = (1/2) \times \alpha \times \tau_{al} \times b \times d$: 震度法 $Sc = \alpha \times \tau_c \times b \times d$: 保耐法 (例) $\sigma_{ck} = 24 \text{ N/mm}^2$ 震度法 : $\tau_{al} = 0.39 \text{ N/mm}^2$ (割増なし) 保耐法 : $\tau_c = 0.39 \text{ N/mm}^2$ |
| せん断耐力 | スターラップ | $S_s = \frac{\sigma_{sa} \times A_w \times d}{1.15 \times s}$ Cds : せん断スパンによる補正値 $Cds = (1/2.5) \times (a/d)$: 下側引張, $Cds = 1.0$: 上側引張 | $S_s = \frac{\sigma_{sa} \times A_w \times d}{1.15 \times s}$ |

じたせん断スパン比による許容せん断応力度の割増し(C_{dc})やスターラップの補強効果の低減(C_{ds})等である。

(2) コンクリートの許容せん断応力度の比較

表-3は、設計事例におけるコンクリートの許容せん断応力度を整理したものである。新道示では、コンクリートの許容せん断応力度が旧道示より小さくなり、せん断補強の要否に対する判定が厳しくなっている。また、スターラップの補強効果の低減により、新道示によるせん断耐力が旧道示より小さくなっている。

表-3 フーチングの許容せん断応力度の比較
($\sigma_{ck}=24 \text{ N/mm}^2$ 換算: 地震時)

| | 新道示 | | 旧道示 |
|---------------------------|---------------------------|--------------------|--------------------|
| 基本値 (N/mm^2) | 0.35 | 0.35 | 0.39×1.5 |
| 杭基 | — | 上側引張 下側引張 | — |
| | Ce | 0.66 ~ 0.94 | 0.66 ~ 0.89 |
| | Cpt | 0.58 ~ 1.03 | 0.75 ~ 1.28 |
| | Cdc | 1.00 | 1.98 ~ 4.10 |
| 補正係数 | 0.45 ~ 0.78 | 1.89 ~ 3.29 | 1.45 ~ 2.00 |
| 許容応力度 (N/mm^2) | 0.16 ~ 0.27 | 0.66 ~ 1.16 | 0.85 ~ 1.17 |
| $<0.15 \sim 0.27>$ | | $<0.56 \sim 0.97>$ | $<1.00>$ |
| Cds | 1.00 | 0.22 ~ 0.62 | — |
| 直接基礎 | — | 震度法 保耐法 | — |
| | Ce | 0.72 ~ 0.94 | 0.72 ~ 0.94 |
| | Cpt | 0.91 ~ 1.18 | 0.91 ~ 1.18 |
| | Cdc | 3.08 ~ 4.39 | 2.09 ~ 3.25 |
| 下側引張 | 補正係数 | 2.75 ~ 3.75 | 2.06 ~ 2.71 |
| 下側引張 | 許容応力度 (N/mm^2) | 0.96 ~ 1.31 | 0.72 ~ 0.95 |
| 下側引張 | Cds | $<0.84 \sim 1.12>$ | $<0.62 \sim 0.81>$ |
| 下側引張 | | | $<1.00>$ |

3. 新道示による設計事例の分析

3.1 外力とせん断力

保耐法による外力の増加に応じて、せん断力がどのように増加するかを、基礎または柱基部に作用するモーメントの比(保耐法/震度法)

(以下「外力比」という)とせん断力の比(保耐法/震度法)の関係で整理した。

図-1に示すように、杭基礎では外力比が1.6~4.8となっている。これに対して、下側引張となるせん断では、せん断力比が1.5~2.5と外力比より小さいが、上側引張となるせん断では、震度法で杭の引抜き力が小さいものや杭に引抜

きが生じないもの(せん断力比40以上)を除いて、2.2~6.6倍と外力比より大きくなっている。これらは、せん断力に支配的な杭反力は、杭群中心に作用する鉛直、水平、回転の外力によって決まるが、図-2に示すように、鉛直力による杭反力は震度法と保耐法では変化せず、水平力やモーメントによる杭反力が外力比に応じて変化することによるためである。特に、上側引張となるせん断の場合、震度法での引抜き力が小さいため、せん断力比は外力比に比べて大きくなっている。

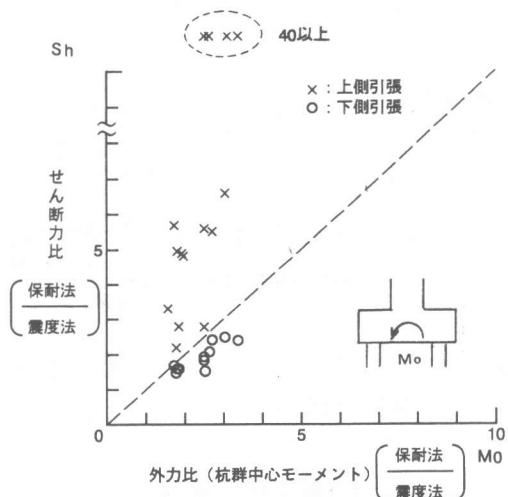


図-1 杭基礎フーチングにおける外力比とせん断力比の関係

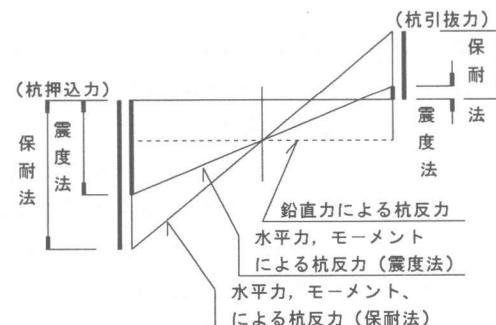


図-2 杭反力概念図

一方、図-3に示すように、直接基礎では外力比1.5～3.1に対して、せん断力比は1.6～5.0であるが、両者の間には相関が認められない。これらは、保耐法による直接基礎のフーチングの設計において、地盤反力度分布を地震力と関連づけず、全鉛直死荷重に等しい地盤反力の合力がフーチング先端から基礎幅の1/20分内側の位置に作用するものとしているためと思われる。

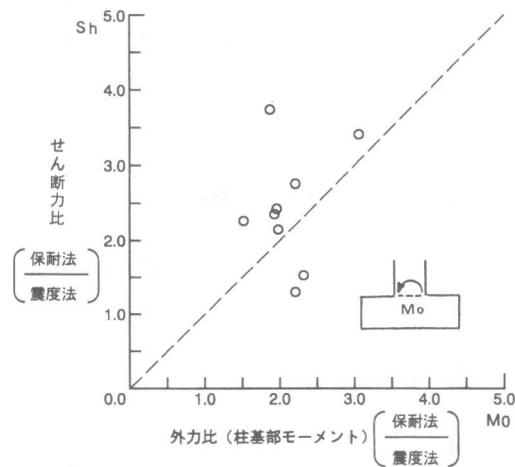


図-3 直接基礎フーチングにおける外力比とせん断力比の関係

3.2 震度法と保耐法のせん断力

震度法によるせん断力と保耐法によるせん断力について、せん断力 Sh とコンクリートが負担するせん断力 Sc の比 Sh/Sc により整理した (Sh/Sc が1を超える場合に、せん断補強が必要となる)。

図-4に示すように、杭基礎フーチングでの震度法によるせん断力と保耐法によるせん断力の関係は以下のとおりである。

- 1) 保耐法によるせん断力は、下側引張となる場合では震度法の1.5～2.5倍であり、上側引張となる場合では震度法で杭の引抜き力が小さいものや杭に引抜きが生じないものを除き、震度法の2.2～6.6倍となっている。
- 2) 下側引張となるせん断の場合、保耐法で

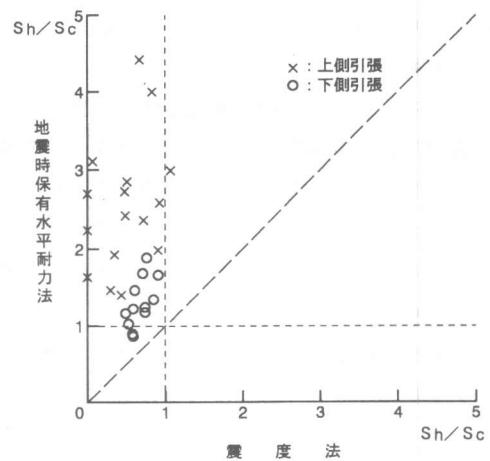


図-4 杭基礎フーチングにおける震度法と保耐法のせん断力の関係

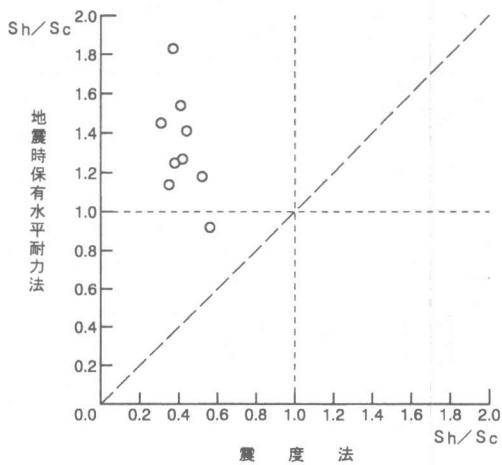


図-5 直接基礎フーチングにおける震度法と保耐法のせん断力の関係

は多くの事例で Sh/Sc は1を超えるが（最大で1.9程度）、震度法では Sh/Sc は1より小さい（0.5～0.9）。

- 3) 上側引張となるせん断の場合、保耐法では杭の引抜き力が震度法に比べて非常に大きくなるため、全ての事例で Sh/Sc は1を超えるが（1.4～4.4），震度法では1例を除いて Sh/Sc は1より小さい（0.1～1.1）。一方、図-5に示すように、直接基礎フーチン

グでの震度法によるせん断力と保耐法によるせん断力の関係は以下のとおりである。

- 1) 保耐法によるせん断力は、震度法の1.6～5.0倍となっている。
- 2) 下側引張となるせん断の場合、保耐法では多くの事例で S_h/S_c は1を超えるが（最大で1.8程度）、震度法では S_h/S_c は1より小さい（0.3～0.6）。

3.3 せん断補強

表-4に示すようにスターラップの配筋ピッチが設計事例毎に異なることや、鉄筋の材質も異なるため、SD345のスターラップを30cm×30cmで配置したときに必要とするスターラップ1本当たりの断面積（以下「 η 」という）を用いて整理した。上側引張となるせん断力に対する η と下側引張となるせん断力に対する η の関係を図-6に示す。

表-4 スターラップの配筋例

| 鉄筋径 | 配筋ピッチ（mm） | |
|-----|-----------|---------|
| | 杭基礎 | 直接基礎 |
| D16 | 500×250 | 600×300 |
| | 250×250 | 500×250 |
| D19 | 500×500 | |
| | 1000×250 | 500×500 |
| | 300×300 | |
| D22 | | 500×500 |
| | | 300×300 |
| | | 250×250 |
| D25 | 375×250 | |
| | 300×300 | |
| D29 | 300×300 | |

杭基礎フーチングのせん断補強に対して、下側引張となるせん断と上側引張となるせん断の関係は以下のとおりである。

- 1) 下側引張となるせん断の場合、せん断スパンがフーチング厚の1/2より小さいため、せん断照査が不要となる4例を含めてせん断補強を必要としないものが6例ある（図-6の縦軸上の点）。
- 2) 上側引張となるせん断の場合、必ずせん断補強が必要となるが、 η は0.31～2.63で

あり、下側引張の場合に比べて必要鉄筋量は少ない。これらは、保耐法によるせん断力は震度法に比べて大きく増加するが、震度法では杭に生じる引抜き力が小さく、せん断力も小さくなっていることによるものと思われる。

- 3) 下側引張となるせん断に対して補強が必要となる場合、スターラップのせん断耐力の低減が大きい下側引張で補強断面が決まる（上側引張となるせん断で補強断面が決まるのが1例）。 η は0.17～5.28である。一方、直接基礎フーチング（図-6の横軸上の点）では、下側引張となるせん断について、9例中8例がせん断補強を必要とし、 η は0.73～4.78となっている。

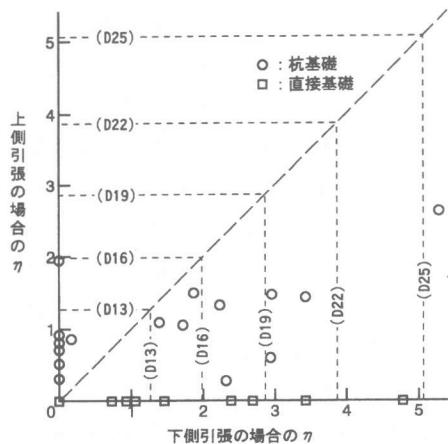


図-6 スターラップの必要断面積 η
(SD345, 30cm×30cm配置に換算)

4. まとめ

4.1 設計事例分析結果の総括

(1) フーチングのせん断耐力

新道示では、旧道示の60%に低減されたコンクリートの許容せん断応力度の基本値に、有効高、引張鉄筋比、アーチ効果等の影響に対する補正を加えて許容せん断応力度を算定する。新道示による許容せん断応力度は、下側引張の場合、アーチ効果を見込むが旧道示の56～97%

低下している。また、上側引張となる場合では、せん断スパンによる効果を見込まないため、旧道示の15~27%まで低下している。

一方、アーチ効果が生じる程度にせん断スパンが短くなるとスターラップの効果が低減されることになるので、下側引張となるせん断力に對し、スーラップが負担するせん断力は旧道示より大きく低下することになり、大幅な鉄筋補強が必要となる。

(2) 震度法と保耐法の比較

杭基礎では、外力比が1.6~4.8であることに対して、下側引張となる場合ではせん断力比が1.5~2.5と外力比より小さいが、上側引張となる場合ではせん断力比が2.2~6.6倍と外力比より大きい（震度法で杭の引抜き力が小さいもの除く）。これらは、せん断力に支配的な杭反力のうち、鉛直力による成分は震度法と保耐法で変化せず、モーメントや水平力による成分が外力の増加に応じて変化することによる。

一方、直接基礎では、外力比1.5~3.1に対して、せん断力比は1.6~5.0であるが、両者の間には相関が認められない。これらは、保耐法による直接基礎のフーチングの設計では、地盤反力度分布が地震力と関連なくモデル化されているためと思われる。

(3) せん断補強

杭基礎では、下側引張となる場合、せん断スパンがフーチング厚の1/2より小さくせん断照査が不要となるケースや、アーチ効果でせん断補強を必要としないケースがある。しかし、そのようなケースでも、保耐法での上側引張となるせん断に對して、全てせん断補強が必要となっている。また、下側引張でせん断補強が必要な場合、新道示ではスターラップの効果が大きく低減されるため、許容値に対する超過がわずかであっても、スターラップを比較的多く必要とし、概ね下側引張で補強断面が決まっている。

4.2 今後の課題

フーチングの施工において、大量に太径のスターラップを配置することは非常に煩雑な作業

となるため、フーチングのせん断耐力を適正に評価することや、橋脚の耐力に必要以上に余裕を与えないように留意することが重要であると思われる。

特に、せん断耐力の評価では

- 1) 下側引張となるせん断に對するアーチ効果の評価
 - 2) 上側引張となるせん断に對するせん断スパン比の影響
 - 3) 直接基礎のせん断スパンのとり方
- などが、決定的な要因となっているにも拘わらず、十分に解明されていない。

また、兵庫県南部地震によるフーチングの損傷は数も少なく、比較的軽微であったことから、フーチングの耐力と破壊メカニズムを解明するための模型載荷実験や解析なども実施中であり、これらの要因がせん断耐力に与える効果について検討していきたいと考えている。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書、IV 下部構造編、pp141-148, pp164-175, pp 206-224, V 耐震設計編、pp60-64, pp13 4-137, 1996.12
- 2) (社) 日本道路協会：道路橋示方書、IV 下部構造編、pp129-132, pp143-152, pp 178-190, 1994.2, V 耐震設計編、pp78-79, 1990.2
- 3) 幸左賢二、藤井康男、桶田憲一、木村隆明：新道示を適用したRC構造物の試算分析、第2回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウムの講演論文集、PP461-466, 1998.12