

(25) 橋梁基礎における杭頭結合部の応力照査に関する一考察

* 小堀為雄 ** 近田康夫○

1. 緒言

橋梁基礎における杭頭—フーチング結合部は、橋梁の安全性を考えるうえで極めて重要な位置を占める部分であると考えられる。しかし、杭頭結合部の安全性や設計方法の妥当性は、鋼構造物における溶接継手や、コンクリート構造物における梁—柱結合部に比較して、その検討は立ち遅れの観があるように思われる。

現行の道路橋示方書¹⁾においては、2種類の杭頭結合部に対する設計方法が規定されているが、これらは、建設省土木研究所が、杭頭結合部に関する設計例や実験あるいは試験結果の収集・分析の結果提案した一つの標準であり、昭和47年に道路局企画課長通達として行政的措置がとられ、現行の道路橋示方書に引き継がれている。しかし、これらの規定は収集した資料の机上検討の結果提案されたものであったことから、上記通達後、今日に至るまで、主に実験を通してその安全性や妥当性が検討されてきた²⁾。

杭頭結合部に関する実験的検討の報告例は、そのほとんどが、鉄筋コンクリート版 (= フーチング) に鋼管、あるいはコンクリート管 (= 杭) を1本結合した模型を用い、フーチングを固定して杭先端に軸力 (鉛直力) や水平力を加えることにより、杭頭結合部に軸力、水平力及び曲げモーメントを作用させている。主な検討項目は、軸力の有無、杭頭のフーチングへの埋込み長さ、杭とフーチングとの間の付着、天蓋の有無、補強鉄筋等による杭頭結合部の強度や固定度への影響あるいは効果、さらには示方書に示されている杭頭結合部の応力照査方法の妥当性等であった²⁾。

本研究では、有限要素法を用いた杭頭結合部の応力解析を行い、一定水平力の作用の下で、軸力が杭頭結合部のフーチングコンクリート応力度分布に及ぼす影響を検討する。さらに、示方書に従って杭頭反力 (杭頭結合部の応力照査に用いる) を求めた場合、これに包含される値のばらつきと、有限要素解析との結果を合わせて考察し、現行示方書に示す応力照査式の検討を試みる。

2. 現行の応力照査方法¹⁾

示方書における2つの結合方法、すなわち、フーチング内へ杭を杭径以上埋込み、この埋込み部をもって杭頭拘束モーメントに抵抗させる方法Aと、フーチング内へ杭を杭径に無関係に10cmだけ埋込み、杭頭に設けた補強鉄筋によって杭頭拘束モーメントに抵抗させる方法Bの両者に対してそれぞれ応力照査方法が規定されている。応力照査に用いる応力分布の仮定はFig.1に示すとおりである。フーチングコンクリートの支圧応力度に対する照査式は、方法A、Bそれぞれに対して、Eqs. (1) — (4) のようである。

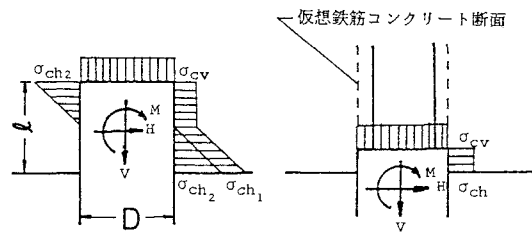


Fig. 1 Stress distribution hypothesis for stress check.

* 金沢大学工学部 建設工学科

** 金沢大学工学部 建設工学科

折れ線に付した数字は、
Table-1 中の Run No.
に対応している。

Fig.4 より、軸力が
増加するのに伴って、
応力分布が圧縮側ヘシ
フトしていくことがよ
くわかる。

Eq (3) あるいはEq.
(4) で示した照査式

においては軸力（鉛直力）Vは考慮されていないが、Fig.4 をみる限り軸力の影響はかなり顕著である。
例えば、Fig.4 (a) , ($\theta = 0^{\circ}$) において、Run 2 ($H/V=0.0$) , Run 4 ($H/V=10.0$) の両者を
フーチング下面の値で比較してみると、Run 4 はRun 2 に対して約60%引っ張り応力が緩和されており、
軸力の影響がけっして無視し得ない大きさであることがわかる。さらに、照査式Eq (3)（方法A）によ
る応力値とFig.4 (e) , ($\theta = 180^{\circ}$) との比較をしてみると、軸力の作用していないRun 2 との比較
では解析値は照査値の約60%であり、一方、軸力の作用しているRun 4 との比較では解析値は照査値の約
120 %であり、照査値以上の応力の生ずる場合のあることがわかる。

4. 杭頭反力が包含するばらつき

現行示方書では、杭頭反力を変位法により算出することになっている。この杭頭反力を用いて、杭頭結
合部の応力照査を行うのである。

さて、杭頭反力の計算に用いる地盤反力係数 K_v （杭軸方向）, K_h （杭軸直角方向）の決定は、示方
書に示される推定式を用いてよいことになっている。特殊な橋梁でない限り、この推定式を用いて K_v ,
 K_h を求めることになると思われるが、この推定式自体はFig.5 , Fig.6 に示すような $0.5 < (\text{実験値} /$
 $\text{計算値}) < 1.5 \text{ or } 2.0$ のばらつきを包含している。⁶⁾

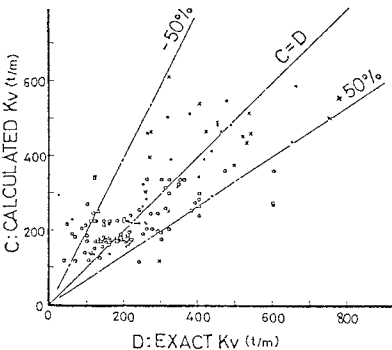


Fig.5 Calculated K_v vs. exact K_v .⁶⁾

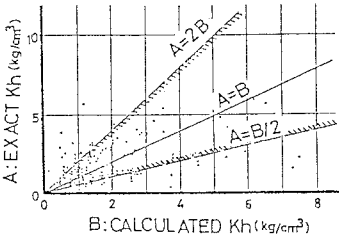


Fig.6 Calculated K_h vs exact K_h .⁶⁾

Fig.5 , Fig.6 に示されるような K_v , K_h のばらつきが、杭頭反力の計算値にいかなる影響を及ぼす
かをみるために、 K_v , K_h をそれぞれ 0.1ステップで 0.1倍から 2.0倍まで変化させてみた。基本的な
計算条件はTable-2 に示す 4 つの場合を考えている。Case1 ~ Case4 は、Case1 を基本にして、設計地盤

面からフーチング下面までの高さ h と、第 I, III 列の杭傾斜角の変化のみで Case2 ~ Case4 を設定している。記号等については、Fig.7 を参照されたい。Table-3 には、示方書どおりに計算した結果を示す。

Table-2 Fundamental conditions for calculations of pile-head reactions.

		Case1	Case2	Case3	Case4
θ deg.	I	0.0	0.0	-10.0	-10.0
	II	0.0	0.0	0.0	0.0
	III	0.0	0.0	10.0	10.0
h	m	0.0	1.0	0.0	1.0
N-value		5	5	5	5
H	tf	260	260	260	260
V	tf	1300	1300	1300	1300
M	tf-m	2000	2000	2000	2000

Table-3 Calculated results according to the SPECIFICATIONS FOR HIGHWAY BRIDGES in Japan.

		Case1	Case2	Case3	Case4
K_h	t/m ²	885	885	885	885
K_v	t/m	33580	33580	33580	33580
δ_x	m	0.011	0.013	0.006	0.007
δ_y	m	0.004	0.004	0.004	0.004
α	rad	0.002	0.002	0.001	0.001
H	I	28.9	28.9	15.4	14.2
	II	28.9	28.9	14.9	13.9
	III	28.9	28.9	9.0	9.1
V	I	- 4.1	- 15.5	7.3	1.4
	II	144.4	144.4	147.0	147.1
	III	293.0	304.5	282.2	288.3
M	I	- 25.4	- 44.6	- 6.2	- 16.5
	II	- 25.4	- 44.6	- 5.2	- 15.3
	III	- 25.4	- 44.6	9.5	- 0.9

計算結果を Fig.8 ~ Fig.15 に示す。Fig.8 ~ Fig.11 は K_h を変化させた場合で、Fig.12 ~ Fig.15 は K_v を変化させた場合である。横軸には K_v または K_h を、縦軸には杭頭反力 H 、 V 、 M をとり、値は総て示方書どおりに計算した場合（Table-3 の結果）との比で示している。

まず、Fig.8 ~ Fig.11（それぞれ、Case1 ~ Case4 に対応している）をみると、設計地盤面からフーチング下面までの高さ h 及び杭が総て直杭の場合（Fig.8）では、引抜き側となる第 I 列の鉛直反力が大きく変動しており、0.5 ~ 2.0 K_h の変動に対して、計算反力は 3.7 ~ -1.4 倍の変動をする（数値的には -1.4t が -15.7t ~ 5.7t の変動をする）。水平反力は変動せず、モーメントは、1.7 ~ 0.3 倍の変動である。Fig.9（Case2）は、Case1 で $h = 1.0$ とした場合であるが、変動傾向は Fig.8 の場合とほとんど同じであるが変動幅は、Fig.9 の方が Fig.8 よりも小さい。Case1 で第 I, III 列の杭に 10.0° の傾斜をつけた Case3（Fig.10）では、やはり引抜き側となる

第 I 列の鉛直反力が大きく変動しているが、Fig.8 とは変動の方向が逆である（Fig.8 では K_h の増加に伴って減少していたが、Fig.10 では増加している）ことが注目される。さらに、モーメントの変動も第 I, II 列、第 III 列で変動方向が逆になっており（総て直杭である Case1, Case2 ではモーメントの変動は各杭列とも等しかった）、また、数値的には押し込み側である第 III 列の変動が大きい。Case3 においてさら

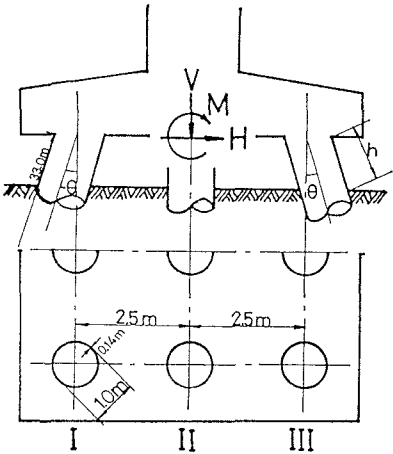


Fig.7 Schematic view of pile foundation of Table-2.

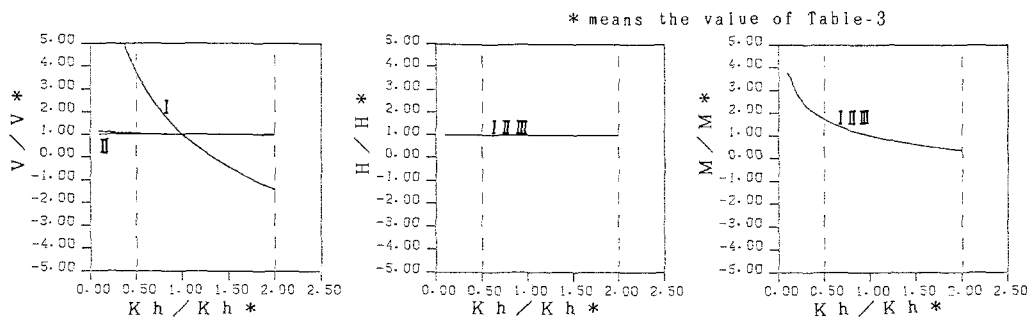


Fig.8 Variance of reactions which are due to variance of Kh (Case 1) .

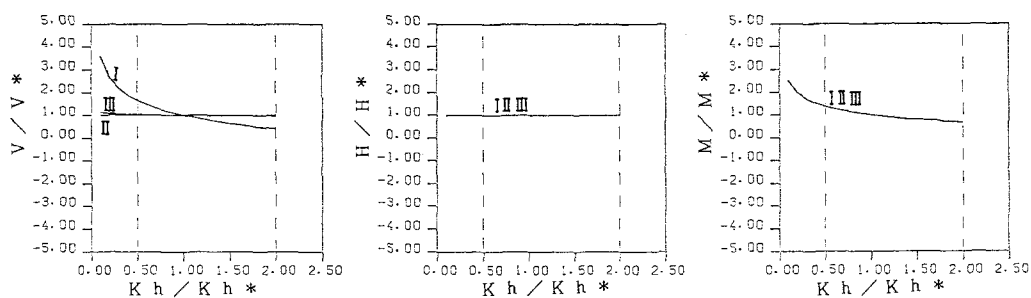


Fig.9 Variance of reactions which are due to variance of Kh (Case 2) .

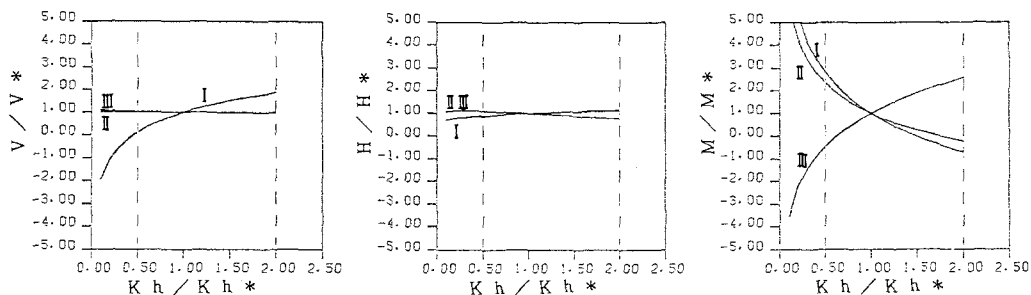


Fig.10 Variance of reactions which are due to variance of Kh (Case 3) .

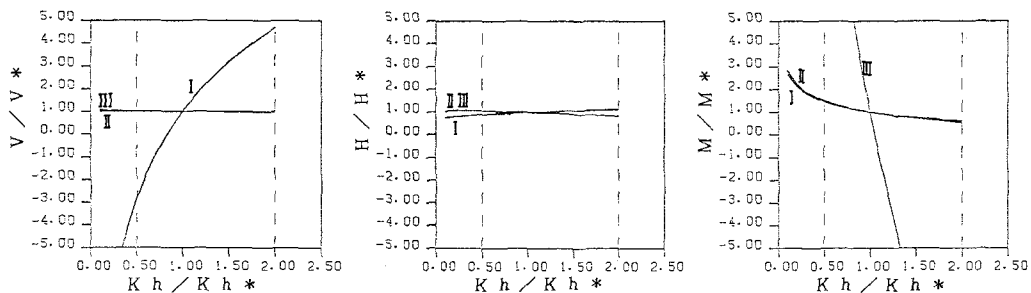


Fig.11 Variance of reactions which are due to variance of Kh (Case 4) .

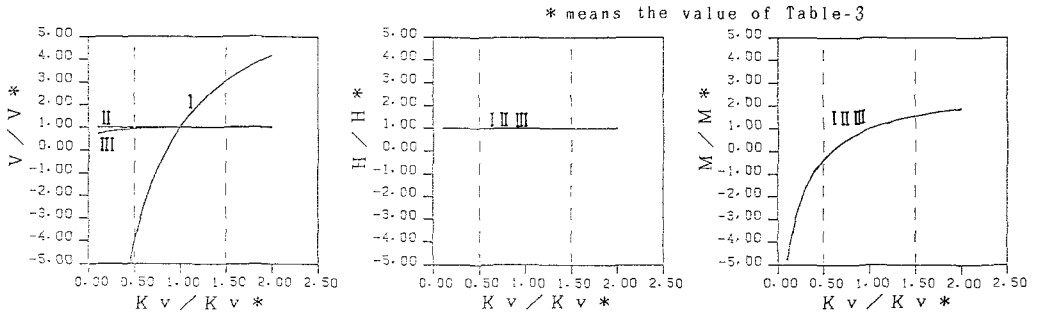


Fig.12 Variance of reactions which are due to variance of K_v (Case 1) .

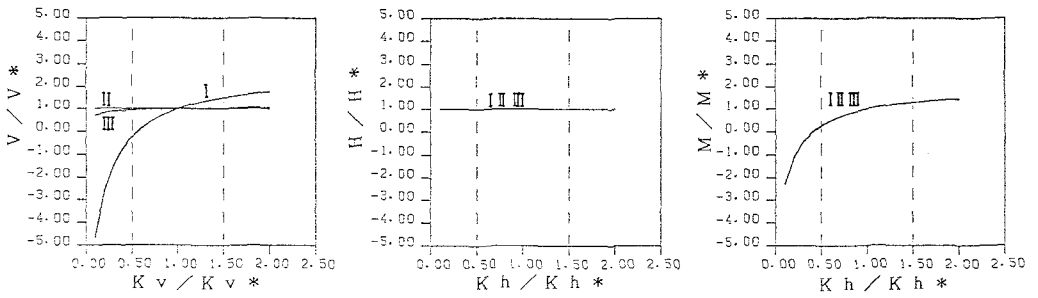


Fig.13 Variance of reactions which are due to variance of K_v (Case 2) .

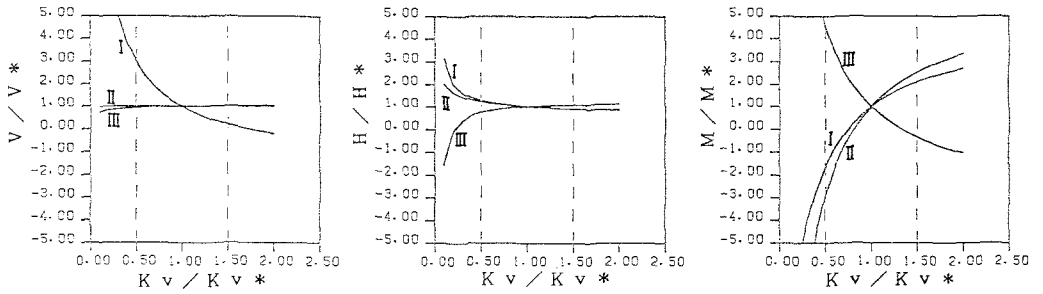


Fig.14 Variance of reactions which are due to variance of K_v (Case 3) .

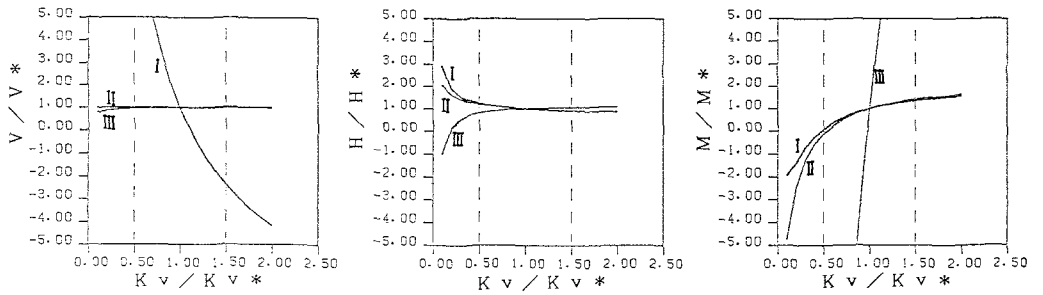


Fig.15 Variance of reactions which are due to variance of K_v (Case 4) .

に $h = 1.0$ とした Case4 では、変動幅が他の場合に比較してかなり大きく、特に第 III 列のモーメントの変動が 15 倍～14 倍と極端な変動をみせている。次に、 K_v を変動させた場合の Fig.12～ Fig.15（それぞれ、Case1～Case4 に対応している）をみると、Fig.12では、やはり、引抜き側となる第 I 列の鉛直反力が大きく変動しているが、Fig.8 とは、変動方向が逆である（Fig.8 では K_h の増加に伴って減少していたが、逆に Fig.12では K_v の増加に伴って増加している）。このことは、 K_h 、 K_v をともに実際より小さく、あるいは大きく推定した場合には、その影響が相殺される傾向にあり、逆に一方を大きく、他方を小さく推定した場合には変動は強調される傾向を示すことになる。しかし、数値的には、 K_v に対する変動の方が大きい。Case2（Fig.13）、Case3（Fig.14）、Case4（Fig.15）における変動傾向も、その変動方向は逆ではあるが、Fig.9～Fig.11に類似している。また、数値的には、 K_v に対する変動の方が大きい。

5. 結言

前章において述べたように、 K_h 、 K_v の推定式の包含するばらつきに起因する杭頭反力の計算値の変動が、かなり大きいことが明らかとなったが、こうして求められた杭頭反力を用いて杭頭結合部の応力照査を行った場合、その結果に大きな影響が与えられることは明らかである。この場合、照査結果が安全であったとしても、第 3 章において指摘したように、応力照査式で考慮されていない因子の影響により、危険側の状態が生じる可能性があるといえる。変位法という解析方法自体の誤差はあるにしても、杭頭結合部の応力照査方法は、改善の必要があると思われる。最近の、杭頭結合部に関する実験的研究によると、杭—フーチング間の摩擦（付着）に期待したり、応力の分散効果を考慮に入れて応力照査における許容応力度を現状より大きくしてもよいのでは、という指摘をしているものもあるが、本研究で指摘しているような現在の応力照査方法において考慮されていない因子の影響に関しては検討されていない。

今後は、杭頭結合部の応力分布に対する他の影響因子の検討、さらには、杭—フーチング間で剥離が生じた場合や破壊過程を対象とした弾塑性解析等を行う必要があると思われる。

本研究における数値計算には、金沢大学計算機センター設置の FACOM M-170F を使用した。

参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編、日本道路協会 1980
- 2) 駒田、岡山：くい頭部とフーチングの結合に関する研究 道路 pp.37-41 1975.6.
- 3) 例えば 榎並ほか：鋼管杭頭部の支圧及び付着に関する研究（その 1～その 2） 日本建築学会大会学術講演梗概集 pp.2021-2032 1980
- 4) 近田、小堀：杭頭結合部の FEM を用いた応力解析 土木学会中部支部研究発表会講演概要集 I-30 1983.2.
- 5) 黒正ほか：水平力を受ける杭と基礎の結合部に関する研究（その 3） 日本建築学会大会学術講演梗概集 pp.2735-2736 1983.9.
- 6) 道路橋下部構造設計指針・同解説 くい基礎の設計編 日本道路協会 1976.8.

A CONSIDERATION ON THE STRESS CHECK AT THE CONNECTION
BETWEEN PILE-HEAD AND FOOTING OF BRIDGE FOUNDATION

by Tameo KOBORI^{*} and Yasuo CHIKATA^{**}

In this paper, we investigate the followings.

- 1) How the vertical load effects on the stress distribution on the pile-footing interface. And, for the investigation, Linear Elastic Finite Element Analysis is performed by treating the connection between pile-head and footing as an axisymmetric body subjected to non axisymmetric loading.
- 2) How the variance of K_v (coefficient of vertical reaction at pile-head) and K_h (coefficient of horizontal subgrade reaction at pile-head) , which are determined by experimental equations in the SPECIFICATIONS FOR HIGHWAY BRIDGES in Japan.

The results of the investigations are followings.

- 1) The vertical load largely effects on the stress distribution (horizontal direction) on the pile-footing interface, although the stress check formula does not consider vertical load in the SPECIFICATIONS. And, under large vertical loading, the value of stress by FEM is larger than the value by the stress check formula in the SPECIFICATIONS.
- 2) The variance of vertical reaction at pile-head which is due to the variance of K_v or K_h is considerably large at the pile-head which is subjected to pull-out force, and moment reaction is also large at the pile-head which is subjected to push-in force. Consider the result 1), the variance of reactions may lead the results of stress check according to the SPECIFICATIONS to the dangerous side.

The results of the investigations described above suggest that the vertical load should be considered in stress check of pile-footing connection (horizontal direction), and also the variance of reactions at pile-head which are due to the variance of K_v and K_h should be considered in the stress check.

^{*} Dept. of CONSTRUCTION AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING, KANAZAWA UNIVERSITY

^{**} Dept. of CONSTRUCTION AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING, KANAZAWA UNIVERSITY
2-40-20 Kodatsuno, Kanazawa city, 920 Japan.