

巨大地震力を受ける橋脚-基礎杭-地盤強度の三位一体化に関する研究

日大生産工 ○今野 誠 川上建材(株) 川上 真希子 新構造技術(株) 伊澤 閑
 日大生産工 山本 高義 日大生産工 木田 哲量 加藤 清志
 浅野工専 加藤 直樹

1 ま え が き

近年の巨大地震は水平および鉛直最大加速度とも 1,000gal 程度ないし超という膨大な加速度を示し、加えて地盤からの突き上げおよび落下衝撃作用は、2,000~3,000gal なる付加速度を示し、橋脚コンクリートに引張や圧縮破壊を生起させうる。また、杭頭および橋脚頭部は大きく変位し、曲げモーメントが卓越する。よって、本研究では前要因および杭曲げ耐力ならびに基礎地盤の改良の要否等間の三位一体化のシステム解析を示す。

2 衝撃荷重による杭の挙動

2.1 鉛直地震力と衝撃圧縮応力 上部工および橋脚の全質量 W がフーチングを介して n 本の基礎杭により支持されているものとする、力学上、衝突係数 α_i は式(1)で与えられる¹⁾。

$$\alpha_i = 1 + (1 + 2y_m / \lambda_s)^{1/2} \quad (1)$$

ここに、 y_m : 動的変位、 λ_s : 静的変形量
 よって、静荷重を W 、鉛直震度係数を α_v とすると動的衝撃力 P_d は(2)式で与えられる(図 1 参照)。

$$P_d = W(\alpha_v + \alpha_i) \quad (2)$$

山古志(中越地震、2004.10、U-D)の例では卓越鉛直加速度

α_h および変位 y は

$$\alpha_h = d^2y/dt^2 = \xi t \quad (\xi = 9,720 \text{ gal/s}) \quad (3)$$

$$y = \xi / 6 \cdot t^3 \quad (4)$$

よって、Peak 値(0.107s、1,040gal)で $y_m = 20.0$ mm となる。

[Case study] 基礎杭諸元(図 2 参照)は $D = 600$ mm、 $r_s = 0.8r$ 、 $A_{fc} = \pi r^2 = 282,743$ mm²、杭長 $L = 20,000$ mm、 $f_{ck} = 40$ N/mm²、 $f_{tk} = 2.20$ N/mm²、 $E_c = 31$ kN/mm²、 $n = 6.45$ 、 $\sigma_{ca} = 14$ N/mm²、 $f'_{cd} = 30.8$ N/mm²、使用鉄筋 SD345、 $A_{fs} = 16D32 = 12,707$ mm²、 $p = 4.49\%$ 、 $E_s = 200$ kN/mm²、 $\sigma_{sa} = 196$ N/mm²、 $f_{yd} = 345$ N/mm²、 $f_B = 490$ N/mm²。

震度係数(ペシマムに対し)：鉛直(山古志) $k_v = 1,040/980 = 1.06$ 、水平(同上、川口) $k_h = 1,146/980 = 1.17$ 。ここでは $k_v \doteq k_h = 1.15$

$$\therefore \phi = k_h/k_v = 1.00$$

上部工質量 9,000kN、橋脚質量 2,840kN。基礎杭への作用荷重 $W = 9,000 + 2,840$ kN。よって、杭 1 本あたり $W_0 = W/9 = 1,316$ kN。

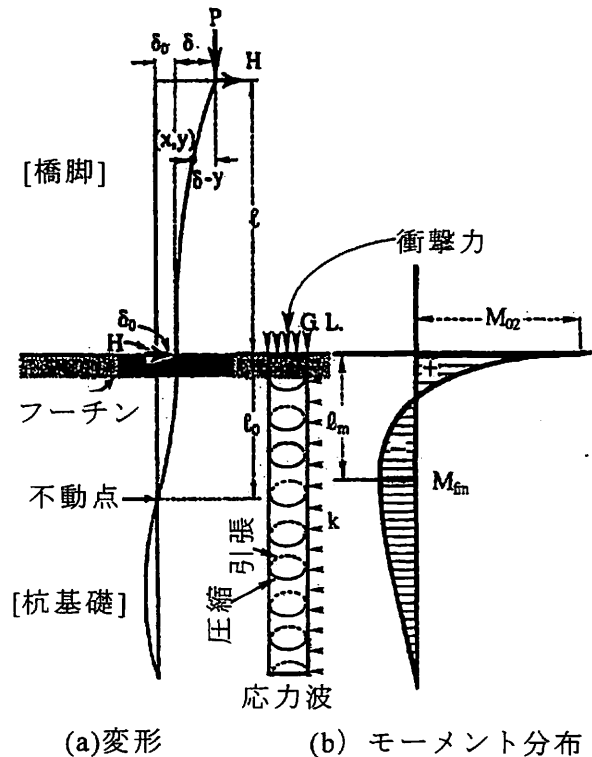


図 1 橋脚および基礎杭の挙動と衝撃波

Trinity among Bridge Pier-Pile-Ground Stabilization under Strong Seismic Force
 by

Makoto IMANO, Makiko KAWAKAMI, Shizuka IZAWA, Takanori YAMAMOTO,
 Tetsukazu KIDA, Kiyoshi KATO and Naoki KATO

杭の静的変形量 λ_s は $\sigma_c = W_0 / (A_{fc} + nA_{fs}) = 1,316 \times 10^3 / (282,743 + 6.45 \times 12,707) = 3.61 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{ca} = 14.0 \text{ N/mm}^2$ 、 $\lambda_s = \sigma_c / E_c \cdot L = 3.61 / 31,000 \times 20,000 = 2.33 \text{ mm}$ 、衝撃係数 $\alpha_i = 1 + (1 + 2 \times 20.0 / 2.33)^{1/2} = 5.26$ 、衝撃荷重 $P_{do} = W_0(k_v + \alpha_i) = 1,316(1.15 + 5.26) = 8,436 \text{ kN}$ 衝撃圧縮応力 $\sigma_{ci} = 8,436 \times 10^3 / 364,703 = 23.13 \text{ N/mm}^2 < f'_{cd} = 30.8 \text{ N/mm}^2$; OK、 $\sigma_{si} = 6.45 \times 23.13 = 149.0 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{sa} = 196.0 \text{ N/mm}^2$; OK.

2.2 衝撃反射応力 質量密度 $\rho(\text{g/cm}^3)$: 杭 2.5、地盤 2.0; 伝播速度 $V(\text{km/s})$: 杭 3.5、地盤 2.0 とすると、インピーダンス比は $\alpha = \rho_2 V_2 / \rho_1 V_1 = 2.0 \times 2.0 / (2.5 \times 3.5) = 0.46$ 。よって、衝撃波反射係数²⁾は $\beta = (1 - \alpha) / (1 + \alpha) = 0.370$ 。反射応力は

$r\sigma_{ci} = \beta \sigma_{ci} = 0.370 \times 23.13 = 8.56 < f'_{tk} = 2.70 \text{ N/mm}^2$; NG、 $r\sigma_{si} = n\sigma_{ci} = 6.45 \times 8.56 = 55.21 < \sigma_{sa} = 196.00 \text{ N/mm}^2$; OK.

よって、反射引張応力により基礎杭は直断面状に破断するが、応力の開放で閉塞する。

2.3 引張補強鉄筋量の検討 引張主鉄筋のみで反射力 rP_f に抵抗する。主筋応力 σ_{si} は次のように求まる。

$$rP_f = \sigma_{si} A_{fs} = r\sigma_{ci} A_{fc} + r\sigma_{si} A_{fc} = 8.56 \times 282,743 + 55.21 \times 12,707 = 3,121,834 \text{ N} (\div 3,122 \text{ kN}),$$

$\therefore \sigma_{si} = rP_f / A_{fs} = 246 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{sa}$; NG、かつ、 $< f_{yd} = 345 \text{ N/mm}^2$; OK。よって、鉄筋の弾性範囲で全損を拘束している。

2.4 水平地震力による杭の挙動 水平地震力は $H_f = k_h W_0 = 1.15 \times 1,316 = 1,513 \text{ kN}$ 。水平地盤反力係数を $k = 0.030 \text{ N/mm}^3$ (N 値 30) とすると、Chang 公式等¹⁾により $\beta = 0.372,85 \times 10^{-3} (\text{mm}^{-1})$ 、 $\ell_m = 4.20 \text{ m} < L = 20 \text{ m}$; 半無限長杭、かつ、橋脚基部からモーメント伝達なし扱いとする。杭頭曲げモーメント $M_{02} = 1513 / (2 \times 0.372,85 \times 10^{-3}) = 2,027 \times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{mm}$ 、地盤中最大曲げモーメント $M_{fm} = 0.208 M_{02} = 421.7 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 、偏心量 $e = M_{fm} / W_0 = 279 \text{ mm}$

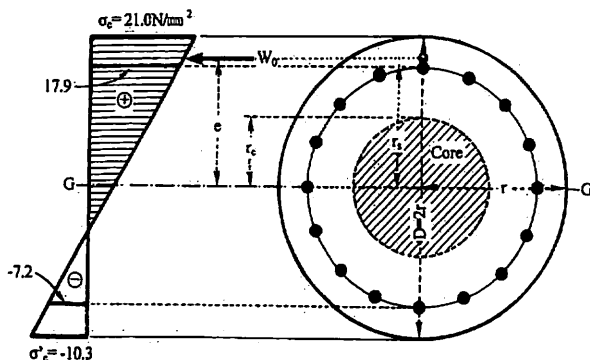


図2 杭断面と応力分布

$$\left. \begin{matrix} \sigma_c \\ \sigma'_c \end{matrix} \right\} = W_0 / A_{fc} \pm M_{fm} \cdot e / I_f = \begin{cases} 21.0 \\ -10.3 \end{cases} \text{ N/mm}^2$$

圧縮縁 $\sigma_c = 21.0 < \sigma_{ca} = 14.0$; NG、 $< f'_{cd} = 30.5$; OK、

引張縁 $\sigma'_c = -6.45 \times 7.2 = -46.4 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{sa}$; OK.

3 限界水平地盤反力係数

3.1 水平地盤反力係数と基礎杭との関係

一般に、基礎杭は全断面圧縮が望ましい。よって、圧縮力は核半径 r_c 以内に作用するように、杭の諸元をふまえ地盤の安定処理の必要性がある。近年の巨大地震では基礎杭が地盤中で折損しているのが観察されている。よって、核半径 r_c が偏心量 e と一致するように水平地盤反力を向上させる必要がある。

偏心量は式(5)で与えられる。

$$\begin{aligned} e &= M_{fm} / P_{fd} = 0.208 M_{mo} / P_{fd} \\ &= (0.208 / P_{fd})(H_f / 2\beta) \\ &= (0.104 H_f / P_{fd}) / \beta \end{aligned} \quad (5)$$

よって、 β および k_c は次のように表される。

$$\begin{aligned} \beta &= (0.104 / e) \Phi \equiv \{k_c D / (4E_f I_f)\}^{1/4} \\ k_c &= \{(0.468 \times 10^{-3} \Phi^4 / D) E_f I_f\} e^{-4} \equiv \Omega e^{-4} \end{aligned} \quad (6)$$

ゆえに、 $k_c e^4 = \text{一定}$ (7)

ここに、 $\Phi = k_h / (1 + k_v + k_h)$ (8)

$$\Omega = (0.468 \times 10^{-3} \Phi^4 / D) E_f I_f \quad (9)$$

式(6)の極値は次のようである。

$$\lim_{e \rightarrow 0} k_c = \infty, \text{ また } \lim_{e \rightarrow \infty} k_c = 0$$

すなわち、環境地盤が剛性体であれば偏心がなく、他方、流動化現象状態では偏心は無限大、すなわち、杭の座屈を意味している。図3は一例として直径 $D = 600 \text{ mm}$ 、N 値 30 で水平地盤反力係数 $k_c = 0.030 \text{ N/mm}^3$ の場合の基礎杭に対し、水平反力係数と軸圧縮の偏心量との関係を示す。本図は、地盤反力係数すなわち基礎地盤の強化は軸力を核内に作用させ、また、偏心量をより小さくするために必要とされることを示している。式(7)により、“水平地盤反力係数と偏心量の4乗との積は一定”なる基本原理が見いだされた。

3.2 地盤強化に関する留意点

(1) 地盤強化の範囲

地盤改良範囲は第一次不動点までという説⁷⁾もあるが、圧縮沈下に伴う負の摩擦力の影響は杭の不等沈下を発生させる可能性がある。よって、本報では、群杭領域を超え、比較的軟弱なA、B層位を貫通し、支持力層としてのC層位まで地盤改良すべきである。

(2) 化学的環境保全

地盤安定処理に伴う環境保全は重要であることは論をまたない。港湾工事のケーソン基礎や河川改良工事で、セメント系固化材スラリーを地盤に注入混合した例もあり、とくに後者で施工中の河川水の水素イオン指数(pH)の変化は7~8で、水道水の水質規準である5.8~8.6以内であり、極端な水素イオン濃度増大が観察されず、顕著な化学的環境汚染がないことがわかっている。とくに、セメントの製造過程(焼成)で発生する六価クロム($K_2C_2O_4$ 、 $K_2Cr_2O_7$)は周辺土壌環境基準(0.05 mg/l)以下で、改良土壌を汚染しないことも確認されている⁷⁾。

(3) 安定処理された地盤の物理特性

一般に深層混合処理工法は構造物の支持力対策、液状化防止、立杭の防護対策等に広く活用されている。ここで、セメント系固化材の使用による一軸圧縮強さは、その使用量、土質、含水比、セメントの水和反応を阻害する有機物量等に支配されるが、水平方向地盤反力係数は原地盤の変形係数 E_{f0} を取り込み、式(10)のように与えられている⁷⁾。なお、杭中心間隔 S が杭径 D の3倍より大きい場合、すなわち、 $S \geq 3D$ では単杭扱いであり、また、 $S < 3D$ では群杭効果を考慮する必要がある。

$$k_h = (1/30) \cdot \lambda \cdot E_{f0} \cdot (D/30)^{-3/4} \times 10^2 \quad (10)$$

ここに、 k_h : 水平方向地盤反力係数(kN/m³)

λ : 係数(=4)

E_{f0} : 地盤の変数係数(kN/m²)

D : 杭の直径(cm)

なお、水平方向地盤反力係数 k_h は鉛直方向地盤反力係数 k_v とは $k_h = (0.6 \sim 0.7)k_v$ と考えられている³⁾。

4. 石灰系地盤安定処理⁸⁾

4.1 火山灰質粘性土の特性

わが国は関東ロームで代表される火山灰質粘性土や、九州のシラスで知られるは火山灰質土、北海道、東北地方に多い泥炭および高有質土、関西、中国地方に多い真砂土など特殊土といわれるものが広く分布している。こ

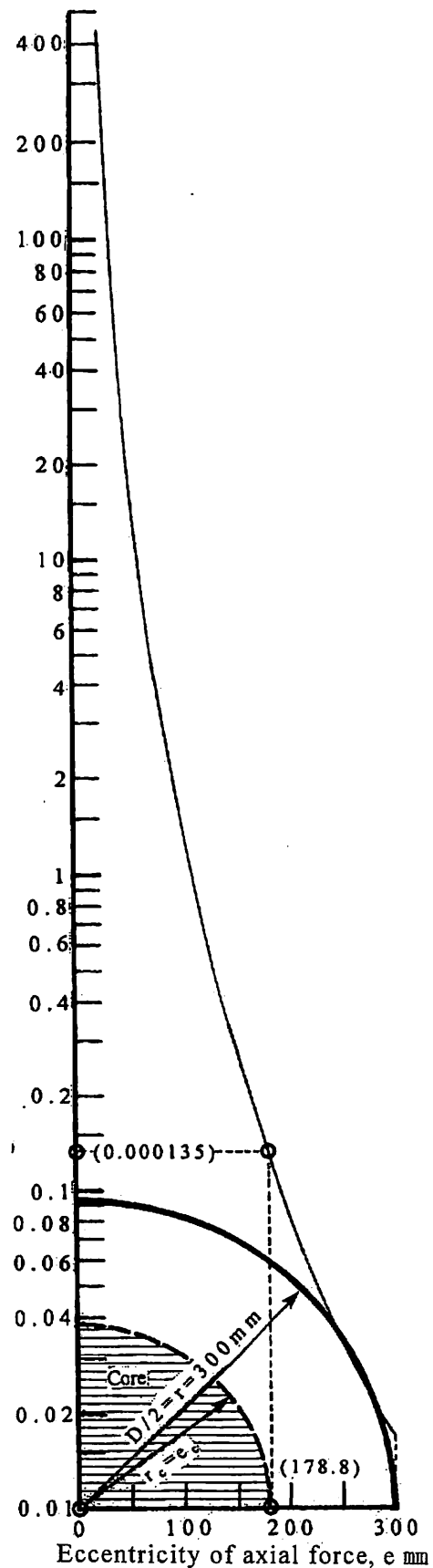


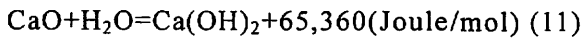
図3 横反力係数と偏心量との関係

のようなところの土を材料土として利用するには工学的に不安定であること、大量の土を必要とする土工において良質土だけを選んで使うことは自然破壊の防止と良質土の不足から実施が難しい。その対応策として大量の土をいかに目的に合った材料土として積極的に利用していくかということになる。

土の力学的安定条件は、すべり破壊と沈下に対する問題、水の浸透および排水にかかわる問題に要約される。したがって、石灰と反応しやすい細粒分が不可欠である。わが国の土質条件をみると石灰による安定処理の適用範囲は広いといえる。

4.2 石灰による安定処理の原理

一般に土に生石灰を添加すると、式(11)に示すように土中水と生石灰が化学反応して消石灰生成し、同時に発熱、膨張、膨張、毛細管吸水と吸着、イオン交換反応とそれに続く粒子の凝集化作用などの速効反応と、生成された消石灰と土中の粘土鉱物によるポズラン反応、炭酸化作用などの遅効反応がある。



軟弱地盤中に生石灰を杭として打設した場合には生石灰杭が吸水し、水和反応によって体積が2倍に膨張する。これを利用して軟弱地盤の圧密をはかる場合もある。

図4は混合時間と処理土の養生効果を示したものの一例である。

添加物30%では、混合時間20分が限度で、それ以上混合すると、混合土は団粒化傾向が著しく現れる。

最近、ダム建設時点が良好な地盤でないところから、フィルダムの建設が多くなっている。

5. ま と め

近年の巨大地震では、引張破壊後の基礎杭の圧縮破壊が散見されている。このような場合、鉛直地震力による付加曲げモーメントや1,000gal超の水平加速度に加え、衝撃反射引張応力に対する十分な軸方向筋が用いられねばならない。すなわち、本論文は巨大地震時の鉛直地震力を取り込み、橋脚とその基礎杭に関する曲げ耐力と変形関係式を解析し、下部構造全体の強化を喫緊の課題として論じている。橋脚上部工、橋脚、基礎杭、水平地盤反力係数間の関係が性能評価の視点から検証された。とくに、水平地盤反力係数と偏心量の4乗との積一定

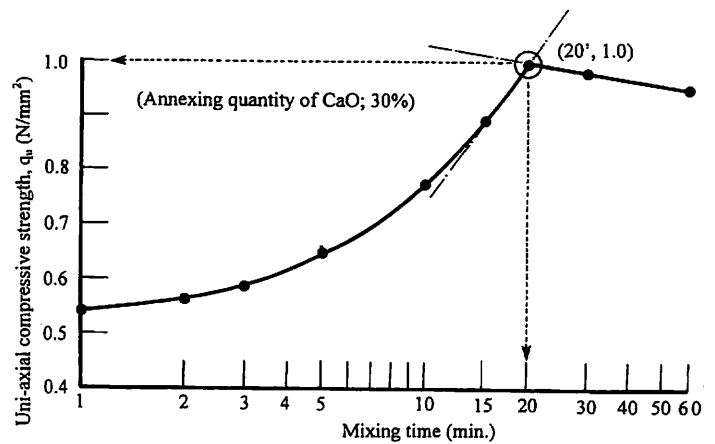


図4 一軸圧縮強度と混合時間との関係

則が初めて提案された。また、実務的な地盤安定処理工法について示した。

謝 辞 本報告のワープロは藤澤房枝氏の尽力によった。付記して謝意を表する。

【参考文献】

- 樋口盛一、齋藤秀雄：材料および材料力学、養賢堂、pp. 42-44、1996.
- 今野 誠、清水健介、澤野利章、木田哲量、加藤清志：鉛直地震力を考慮した橋脚上部工-橋脚-杭基礎のシステム解析、土木構造・材料論文集、22号、pp. 67-74、2006.
- 青木 肇ほか：建築大辞典、第2版、彰国社、1995.
- 畑村洋太郎：地震に学ぶコンクリート、コンクリート工学、第43巻、第9号、pp. 107-112、2005.
- 田中吉之助、黒川知明：材料の拘束変形と破壊、1.基礎理論、材料、第40巻、第451号、pp. 495-502、1991.
- Kato, K., Kato, N., Iwasaka, N. and Kida, T.: Effect of Anchorage Type on Flexural Load Carrying Capacity and Self-Induced Prestressing Force of Heavily Confined RC Column, Theoretical and Applied Mechanics, Vol. 47, pp. 115-124, 1998.
- 日本セメント協会：セメント系硬化剤による地盤改良マニュアル、丸善、第3版、2003.
- 今野 誠：石灰系による土質安定処理、基礎工、pp. 15-27、1981.2.