

I - 6

正弦波加振による鋼管柱模型の弾塑性動的応答性状

北海道開発局	正員	佐藤 昌志
北海道開発局	正員	三田村 浩
パブリックコンサルタント(株)	○正員	川 浪 幸 人
(株)日本製鋼所	正員	小 枝 日出夫
室蘭工業大学	正員	岸 徳 光

1. はじめに

平成7年1月17日に発生した阪神淡路大地震では道路橋においても多くの被害を受けた。特に鋼製橋脚に関しては、我国において初めて大きな被害を受け、鋼橋に携わっている研究者、施工業者に大きなショックを与えた。その被害は補剛板や鋼管に発生した局部座屈や変形、割れ等である。当面の処置として、建設省では鋼製橋脚に関しては中詰めコンクリートを充填することにより靱性を確保することとした。また、平成8年に改訂された「道路橋示方書・同解説 耐震設計編」¹⁾においては、鋼製橋脚に関して脆性破壊を防ぎ、地震時保有水平力および許容塑性率の照査を行うこととしている。このように、鋼製橋脚における材料非線形性を考慮した耐力や塑性率の評価が義務づけられていることより、この種の合理的評価手法を確立すべく鋼製橋脚の弾塑性挙動に関する研究が盛んに行われている。

実験研究に関しては、大型橋脚模型を用いた水平単調載荷実験や漸増繰返し載荷実験が行われており、復元力特性や塑性率を評価している。一方、動的実験に関しては振動台を用いる方法、あるいは実験装置と計算機をオンラインで結び、相似則を考慮して小型実験から実構造物の応答特性を評価するハイブリット地震応答実験法がある。いずれも高価な実験装置と高度な制御技術等が要求されることにより、未だ限られた機関でのみ実施可能な実験となっている。しかしながら、より耐震性に優れた鋼製橋脚の設計手法を確立するためには崩壊過程までを考慮した動的実験が必須であるものと判断される。

このような観点から、本論文ではアクチュエータとリニアウエイを用いた簡易振動台を試作し、円形断面橋脚の合理的な耐震設計手法を確立するための動的応答特性に関する基礎データを蓄積することを目的として、小型鋼管柱模型を用いた加振実験を行った。本研究では、径厚比を変化させた場合と鋼種の異なる場合、また加振加速度の負荷履歴が異なる場合に関する鋼管の耐震性について比較検討している。

2. 実験の概要

2.1. 試験体

本研究で用いた試験体の形状を図-1に、寸法および試験体パラメータを表-1に示す。表-1における細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ 、径厚比パラメータ R_t は次式によって定義される。

$$\bar{\lambda} = \frac{2L}{\pi r} \sqrt{\frac{\sigma_{ys}}{E}}, \quad R_t = \frac{R}{t} \frac{\sigma_{ys}}{E} \sqrt{3(1-\nu^2)}$$

ここで R :平均半径、 L :荷重点高さ、 t :板厚、 r :断面2次半径、 E :弾性係数、 ν :ポアソン比、 σ_{ys} :降伏応力である。

本実験では、鋼管柱模型の鋼種が動的応答特性に与える影響について検討することを目的としていることより、実験用鋼管として電気抵抗溶接鋼管(JIS G 3444 STK 400-E-G 一般構造用炭素鋼管)

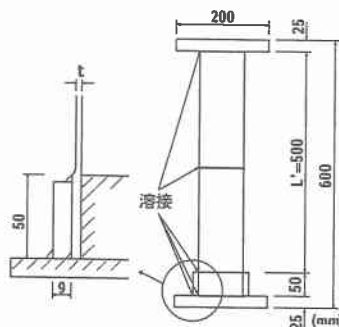


図-1 試験体の形状および寸法

Elasto-Plastic Dynamic Behavior of Steel-Pipe Pier Models under Sinusoidal Wave Exciting
by Masashi SATO, Hiroshi MITAMURA, Yukihito KAWANAMI, Hideo KOEDA, and Norimitsu KISHI

表－1 試験体寸法および試験体パラメータ

試験体名	荷重点高さ* L (mm)	鋼管高さ L' (mm)	半径 R (mm)	板厚 t (mm)	細長比		径厚比	
					L/R	λ	R/t	Rt
K-t10-	631.5	500	47.75	1.0	13.2	0.514	47.8	0.147
K-t15-			48.0	1.5	13.2	0.511	32.0	0.099
P-t15-			48.75	1.5	13.0	0.376	32.5	0.056

*荷重点高さとは、試験体基部から鉛塊重心位置高さまでを意味する。

および鍛接鋼管 (JIS G 3452 SGP-B 配管用炭素鋼管) を用意した。なお、試験体の名称は、第 1 項が鋼種 (K : STK400-E-G, P : SGP-B), 第 2 項が板厚を示している。試験体の鋼管部は、それぞれの鋼管を所定の長さ

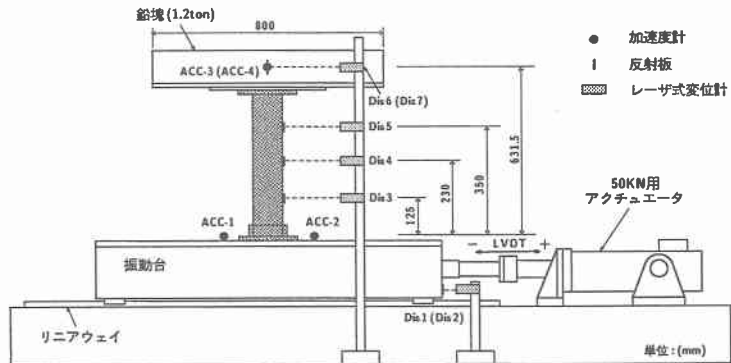
表－2 引張試験結果

鋼種	降伏応力 σ_{ys} (MPa)	引張強度 σ_{ts} (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比 ν_s
STK400-E-G	384	516	206	0.3
SGP-B	210	425		

に切断し、旋盤により内外面を切削して製作した。なお、製作精度を保つために、試験体は 2 本の鋼管を突合せ溶接して所定の長さになっている。板厚および径の加工公差は $\pm 0.05\text{mm}$ である。また基部は剛体変形をできるだけ防ぐために、図－1 に示すように凸状の台座に鋼管を差し込み、さらに外側に 9 mm の鋼製リングをはめ込み溶接し固定している。試験体の上端部には橋梁上部工の質量を模擬した鉛塊を固定するための幅 200 mm 板厚 25 mm の正方形板を周溶接により取付けている。また、使用鋼管の機械的性質を求めるために、それぞれの鋼管柱から JIS 6 号試験片を製作して引張試験を行った。表－2 に各鋼種における引張試験結果を示す。

2.2. 実験装置および実験方法

図－2 に簡易振動台を用いた実験装置の概要を示す。簡易振動台は 2 本のリニアウエイ上に設置している。その振動台はボールジョイントを介して最大荷重 50 kN、油圧源吐出量 31.7 l/min のアクチュエータに接続されている。本アクチュエータは 0.5 Hz 以下に対して 50 mm、1 Hz で 40



図－2 実験装置の概要

mm、15 Hz で 2 mm の加振周波数に対して多折線状に変化するストローク能力を有している。試験体上部には橋梁上部工の質量を模擬した全質量 1.2 ton の鉛塊 (800 × 800 × 185 mm) が設置されている。鋼管柱模型の動的応答特性を把握するために、歪ゲージ式加速度計を振動台および鉛塊の高さ方向重心位置の 4 ヶ所、レーザ式変位計を振動台、試験体鉛塊の高さ方向重心位置の計 7 ヶ所に設置した。出力波形は全てアナログ式データレコーダに一括記録の後、A/D 変換を行って整理している。実験は次の 3 種類について行った。

- 1) アクチュエータをシャットダウンさせることにより試験体に自由振動状態を励起させ最低次固有振動数、減衰定数を求める実験。
- 2) 弾性状態から弾塑性状態までの鋼管柱の動的挙動を検討するために、入力加速度を 3 ～ 4 段階設定して試験体が崩壊あるいは基部近傍に局部座屈が発生するまで繰り返し行う振動実験。
- 3) 単調載荷実験⁴⁾より得られた最大耐力を参考にして求めた入力加速度で加振する実験である。振動実験における加振方法は、アクチュエータが設定加速度振動状態に達するまで数秒間の時間を要するため、加振時間

を統一化するために加振開始から 8 秒経過後にアクチュエータをシャットダウンさせることとした。設定加速度に関しては、鉛塊設置時の鉛塊重心位置に作用する降伏荷重 H_y を弾性梁理論より求め、この値を参考にして加振加速度の初期値および増分加速度を決定した。また、各試験体において 1) の実験により得られた最低次弾性固有振動数を考慮して加振周波数を決定している。

表一 3 最低時弾性固有振動数、減衰定数、入力加速度および破壊形式の一覧

試験体名	径厚比 R/t	最低次 固有振動数 (Hz)	減衰 定数 (%)	加振 周波数 (Hz)	入力加速度 (gal)	破壊形式	座屈 高さ (mm)
K-t10-d1	47.8	3.56	2.6	2.5	75,150,225,300	B側に傾斜後、崩壊	20 ~ 51
K-t10-d2		3.55	2.6		125,250,375	A側に傾斜後、崩壊	7 ~ 22
K-t15-d1	32.0	4.17	3.3	3.0	125,250,375	B側に傾斜後、崩壊	18
K-t15-d2		4.10	3.6		375	B側に傾斜し EFB が発生	26
K-t15-d3		4.13	3.4		500	B側に傾斜後、崩壊	24
P-t15-d1	32.5	4.32	2.5		125,250,375	A側に傾斜後、崩壊	17
P-t15-d2		4.38	2.0		375	B側に傾斜後、崩壊	8

A側：アクチュエータ側，B側：反アクチュエータ側，EFB= Elephant Foot Bulge

3. 実験結果

3.1. 最低次弾性固有振動数

表一 3 に実験から得られた最低次弾性固有振動数および減衰定数を示す。表より、径厚比の増大とともに最低次固有振動数および減衰定数が小さくな

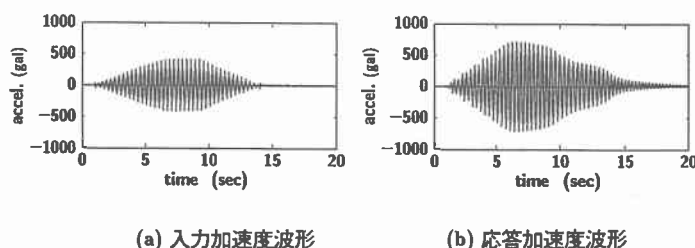
ることがわかる。また、径厚比がほぼ等しい試験体に関して

は、最低次固有振動数に関して大略 4.13 ~ 4.38 Hz となっており鋼種の違いによる顕著な差は見られない。減衰定数に関しては 1.3 ~ 1.6 % の差があり、降伏応力の小さい SGP-B 鋼管橋脚模型の減衰定数が若干小さいようである。

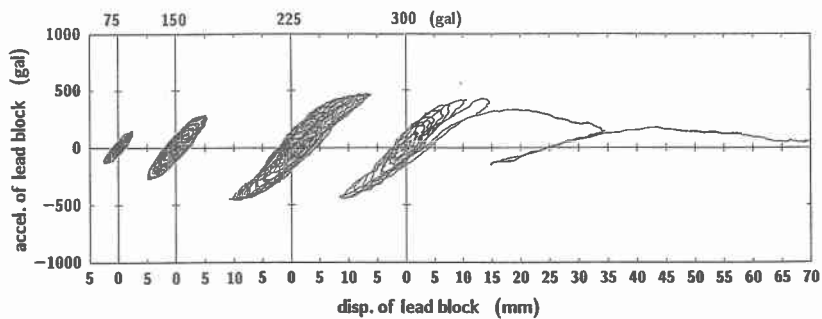
3.2. 加振実験結果

図一 3 に入力波形と応答波形の 1 例として試験体 K-t15-d2 における周波数 $f_i = 3$ Hz、加速度 $\alpha_i = 375$ gal 加振時の振動台および鉛塊重心位置で測定された加速度波形を示している。(a) 図より入力波形は加振開始後ほぼ線形的に増幅して所定の振幅となり、11 波ほど定常的に振動の後シャットダウンにより、ほぼ線形的に減少しやがて静止している。一方、(b) 図より、鉛塊重心位置の応答加速度波形は、定常加振状態に至らず振幅が最大値に達した後徐々に減少していることがわかる。これは、後述のように基部近傍に局部座屈が発生したことにより、加振エネルギーが吸収され試験体上方に伝達されないためと考えられる。

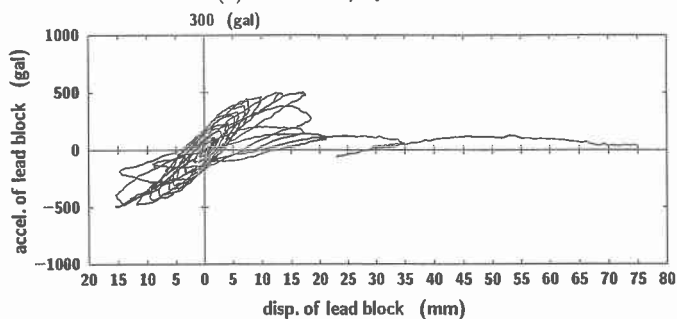
図一 4, 5, 6 には、実験終了までの各加振時における鉛塊重心位置の応答加速度一変位に関するヒステリシスループを示している。各ループには加振開始時から静止状態に至るまでが考慮されている。図一 4, 5 には、STK400-E-G 鋼種の試験体 K-t10-、K-t15- を、図一 6 には、SGP-B 鋼種を使用した試験体 P-t15- に関する結果を示している。また、図一 7 に試験体 K-t10-d1, K-t15-d1, P-t15-d1 の実験終了後における鋼管基部近傍の局部座屈発生状況を示す。まず、入力加速度を段階的に増幅した実験ケースに関して比較検討を行う(図(a)参照)。試験体 K-t15-d1, P-t15-d1 は、入力加速度 $\alpha_i = 375$ gal において加速度振幅の増幅とともに



図一 3 応答加速度波形の一例 (K-t15-d2, $f_i = 3.0$ Hz, $\alpha_i = 375$ gal)

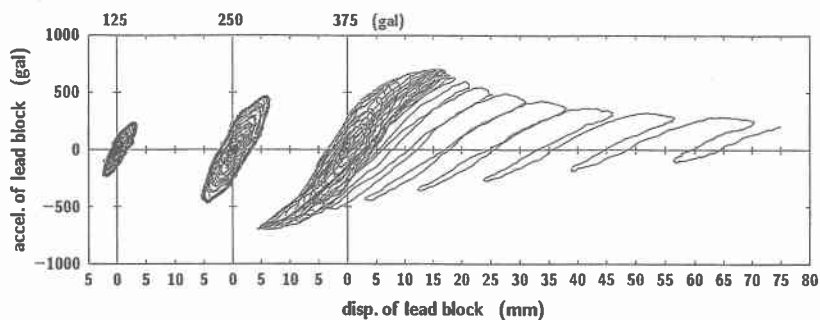


(a) K-t10-d1, $f_i = 2.5$ Hz

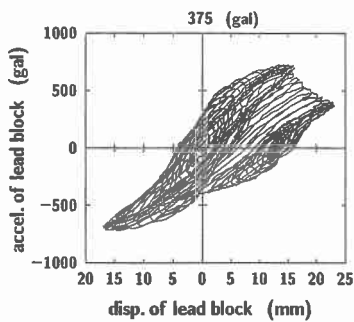


(b) K-t10-d2, $f_i = 2.5$ Hz

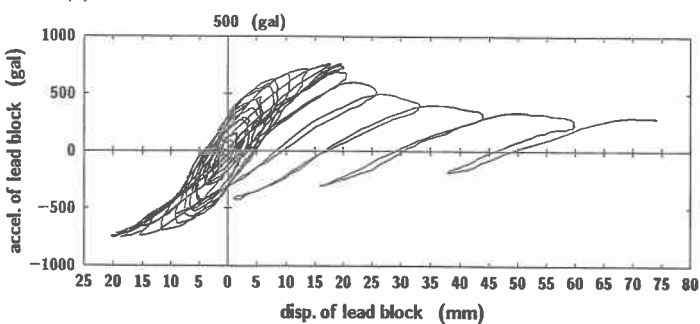
図-4 鋼種 STK400-E-G における鉛塊重心位置のヒステリシスループ($t=1.0\text{mm}$)



(a) K-t15-d1, $f_i = 3.0$ Hz

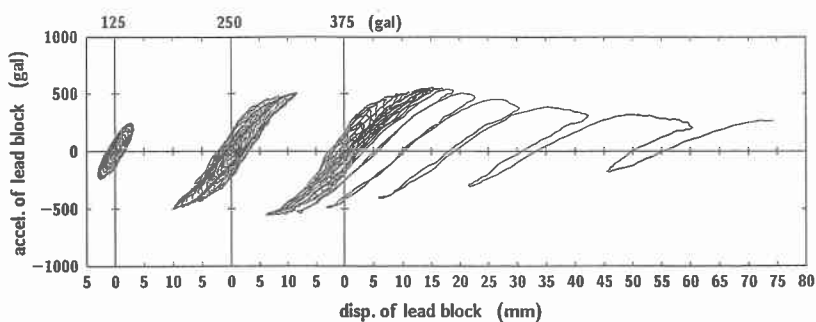


(b) K-t15-d2, $f_i = 3.0$ Hz

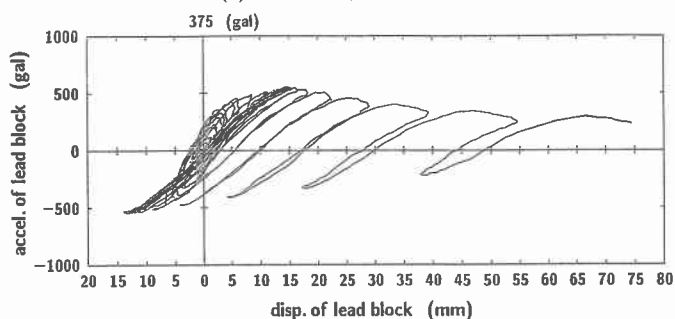


(c) K-t15-d3, $f_i = 3.0$ Hz

図-5 鋼種 STK400-E-G における鉛塊重心位置のヒステリシスループ($t=1.5\text{mm}$)

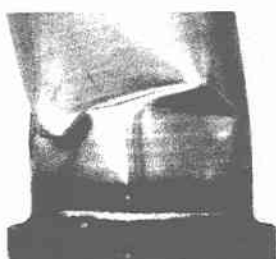


(a) P-t15-d1, $f_i = 3.0$ Hz



(b) P-t15-d2, $f_i = 3.0$ Hz

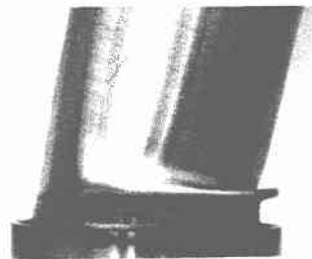
図一六 鋼種 SGP-B における鉛塊重心位置のヒステリシスループ($t=1.5$ mm)



(a) K-t10-d1

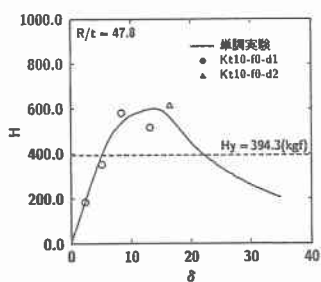


(b) K-t15-d1

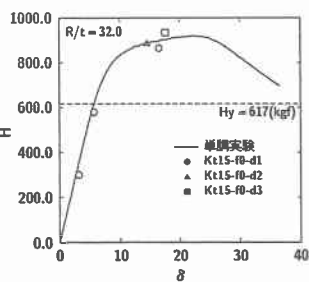


(c) P-t15-d1

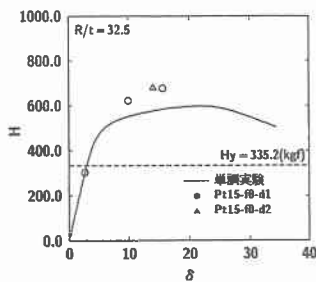
図一七 実験終了後の基部近傍における局部屈曲発生状況



(a) K-t10-



(b) K-t15-



(c) P-t15-

図一八 単調載荷実験における荷重-変位曲線との比較

基部近傍に局部座屈が発生している。試験体 K-t10-d1 は、入力加速度 $\alpha_i = 300 \text{ gal}$ で同様に局部座屈が発生し崩壊した。図-5 (a)、図-6 (a) より、入力加速度 $\alpha_i = 250 \text{ gal}$ 時の結果を比較すると、K-t15-d1 は降伏点応力が大きいことより未だ弾性的なヒステリシスループを描いている。一方、P-t15-d1 の場合には降伏点応力が小さいことよりヒステリシスループが S 状を呈しており、塑性化が進行していることがわかる。入力加速度が $\alpha_i = 375 \text{ gal}$ の場合、K-t15-d1 は最大応答値が約 700 gal まで達し、その後軟化しているようである。一方、P-t15-d1 の場合には最大応答値が 500 gal 程度となっており、明らかに K-t15-d1 のそれより小さい。この現象も降伏応力の大小に依存しているものと考えられる。

図-7 の終局時の局部座屈形状を見ると、K-t10-d1 は板厚が薄いことよりダイヤモンド形座屈に近いモードを示している。K-t15、P-t15 を比較すると、降伏点応力の大きい K-t15 は低い P-t15 に比べて局部座屈が基部より高い位置に発生している。これは、降伏点応力が大きい場合には弾塑性応力状態において弾性域が広いことを示唆しているものと考えられる。

次に、実験 3) に関する図-5、6 の (b)、(c) の実験結果について比較を行う。降伏点応力の大きい K-t15 の場合には $\alpha_i = 375 \text{ gal}$ 入力で基部に局部座屈が発生するものの、倒壊に至っていない。 $\alpha_i = 500 \text{ gal}$ の場合には加振振幅の増大とともに塑性化が進行し、やがて倒壊に至っている。これに対して、降伏点応力の小さい P-t15 の場合には $\alpha_i = 375 \text{ gal}$ で約 500 gal の応答加速度を示し、それほど大きな塑性減衰を示さずに倒壊に至っている。これより、本実験の範囲内では、高降伏点鋼を用いる場合が低降伏点鋼を用いる場合に比較して耐震性により優れていることがわかる。

3.3. 単調載荷実験結果との比較

図-8 には、各試験体の最大応答加速度を換算して求めた水平荷重と相対変位の関係を、単調載荷実験における荷重-変位曲線上にプロットした。なお、図中の白塗りは弾性域を示し、黒塗りは塑性域を示している。図より、入力加速度を段階的に増幅させた実験 2)、単一の入力加速度で加振させた実験 3) とともに、単調載荷実験における荷重-変位曲線と大略一致していることがわかる。また、全ての試験体において荷重-変位曲線の最大耐力を超える規模の入力加速度が負荷される場合には試験体はほぼ崩壊に至るものと考えられる。

4. まとめ

円形鋼管橋脚の合理的な耐震設計法を確立するための基礎資料を得ることを目的として、小型鋼管柱模型を用いた振動実験を行った。本研究では、円形鋼管柱模型の耐震性に関する径厚比および鋼種、加振加速度の負荷履歴について検討を行った。本実験の範囲内で得られた結果を要約すると以下のようになる。

- 1) 固有振動数に関しては鋼種の違いによる顕著な差は見られないが、減衰定数に関しては低降伏点鋼を用いる場合が若干小さいようである。
- 2) 径厚比および鋼種の違いにより鋼管柱模型の局部座屈形態が異なる。
- 3) 塑性域における動的応答倍率は高降伏点鋼を用いる場合が低降伏点鋼を用いる場合より大きい。
- 4) 加振加速度の負荷履歴に関わらず、単調載荷実験により求めた最大耐力を超える加速度が負荷されることにより鋼管柱模型は倒壊するものと考えられる。

参考文献

- 1) 日本道路協会、道路示方書・同解説 V 耐震設計編、1992.12
- 2) 岸 徳光、佐藤昌志、小枝日出夫、小室雅人、小野信市：正弦波加振を受けるコンクリート充填鋼管柱模型の弾塑性応答性状、第 2 回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集、土木学会、185-192、1998.11
- 3) 谷本俊充、佐藤昌志、小枝日出夫、別所俊彦、岸 徳光：鋼管橋脚模型の弾塑性動的応答性状に関する実験的研究、北海道支部論文報告集、98-103、1998.2
- 4) 松岡健一、小枝日出夫、小室雅人、梶山義晴：鋼管柱模型の繰り返し水平載荷実験と弾塑性解析、北海道支部論文報告集、55号