

論文 被災した RC ラーメン橋脚の耐力評価

石松宗一郎^{*1}・幸左賢二^{*2}・河野公平^{*3}・田中克典^{*4}

要旨：兵庫県南部地震によって被災したRCラーメン橋脚の橋軸直角方向を対象に道路橋示方書に基づく簡易せん断耐力評価手法および地震時保有水平耐力法（フレーム解析）を用いて損傷度を評価した。その結果、損傷度と柱せん断等価水平震度には相関があることが解った。また、せん断耐力は柱部材よりも梁部材のほうが大きい傾向となり、柱部材が損傷を受けやすいことが明らかとなった。ついで、フレーム解析では常にせん断破壊先行型を示す傾向を得ており、必ずしも損傷モードと一致しないことが明らかとなった。

キーワード：RCラーメン橋脚、せん断耐力、曲げ耐力、耐震

1. はじめに

1995年1月に発生した兵庫県南部地震は多くのコンクリート構造物に甚大な被害を与えた。阪神高速道路において多くの被害が報告されており、特に3号神戸線の兵庫県地区では倒壊や落橋など深刻な損傷状況であった。RC橋脚のうち単柱橋脚については損傷要因分析からすでに様々な知見を得られているが^{1) 2)}、ラーメン橋脚については不静定構造系であり、耐力評価が複雑であることもあり、現在のところ、十分な損傷要因の検討は実施されていない。そこで、被災したRCラーメン橋脚の損傷要因を明らかにすべく、せん断耐力評価による簡易解析および地震時保有水平耐力法（フレーム解析）を用いた耐力評価を行った。そして、これらの橋軸直角方向の耐力評価から得た結果と損傷度の比較を試みた。

2. 損傷状況

阪神高速3号神戸線におけるRCラーメン橋脚の損傷状況については復旧工事に伴い地中部も含めた損傷調査が詳細に行われた。損傷度はA～Dまでの4段階で区分されている。Aランクは致命的な損傷で撤去再構築の必要なものであり、Bランク以下は軸鉄筋の座屈損傷、かぶ

りコンクリートの剥離やひび割れの程度によるランク付けをしている。表-1に3号神戸線のRCラーメン橋脚で橋軸直角方向における損傷状況を示す。なお、表-1においてTは橋軸直角方向、LTは全方向に損傷していることを示している。またRCラーメン橋脚の損傷位置は梁部材には認められず柱部材のみに集中しており、曲げ先行型の損傷であった。曲げの損傷は柱基部に多くせん断による損傷は柱上端に多く見られる特徴がある。被災した阪神高速3号神戸線のRC単柱とRCラーメン橋脚を比較すると、RC単柱橋脚では443基中Dランクは45基(10%)であり、RCラーメン橋脚では92基中Dランクは78基(85%)となっており、損傷

表-1 損傷度ランクC以上の橋脚

橋脚番号	損傷詳細			
	ランク	形態	位置	方向
神P-321	A	曲げせん断	柱基部	LT
神P-348	A	せん断	柱上端	T
神P-322	B	曲げせん断	柱基部	LT
神P-323	B	曲げせん断	柱基部	LT
神P-346	B	曲げ	柱基部上端	T
神P-344	C	曲げ	柱基部上端	T
神P-345	C	曲げ	柱上端	T
神P-364	C	曲げ	柱上端	LT
神P-394	C	曲げ	柱基部	LT
神P-553	C	せん断	全高	T
神P-554	C	せん断	全高	T

*¹九州工業大学大学院 工学研究科設計生産工学専攻 (学生員)

*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)

*³九州工業大学大学院 工学研究科設計生産工学専攻 (非会員)

*⁴八千代エンジニアリング(株) 大阪支店技術第一部第二課 (正会員)

していない橋脚が圧倒的に多く、RCラーメン橋脚はRC単柱橋脚よりも損傷度が低いことが明らかとなっている。

3. 簡易手法による耐力評価

3.1 せん断耐力算定式の検討

3号神戸線の特殊形状を除き標準的形状である1層1径間のRCラーメン橋脚72基の橋軸直角方向におけるせん断耐力を平成2年および平成8年道路橋示方書式(以下H2道示式, H8道示式)を用いて求めた。照査断面は図-1に示すように損傷が多く見られた梁と柱の接合部付近の断面を用いた。算出結果を図-2に示す。H2およびH8道示式によるせん断耐力の比較を行うと、梁と柱とともにH8道示式のほうが約1割程度低減している。これはH8道示式ではコンクリートが負担するせん断耐力に部材寸法や引張鉄筋比の補正係数を設けており、この影響が大きいと考えられる。特に低減量の変化が著しい橋脚は断面の有効高が3メートル以上の橋脚と有効軸方向引張鉄筋比が0.5%以下の橋脚などであった。

3.2 梁と柱のせん断耐力の比較

H8道示式を用いて梁と柱のせん断耐力を比較した。その結果を図-3に示す。約8割の橋脚で柱のせん断耐力が梁よりも小さくなっている。これは梁と柱の断面積は同一であるものが多いが、梁は隅角部にハンチを有している橋脚が多いためと考えられる。これらが梁に損傷が認められない理由の一つとして考えられる。

3.3 損傷度とせん断等価水平震度

せん断等価水平震度 k_h とは着目した断面に作用水平力 P がせん断耐力 S_u に達するような慣性力を生じさせる加速度であり、(1)式で算出される。

$$k_h = \frac{P}{R_d + W_b} \quad (1)$$

但し、 k_h ：せん断等価水平震度

P ：終局時作用水平力 (kN)

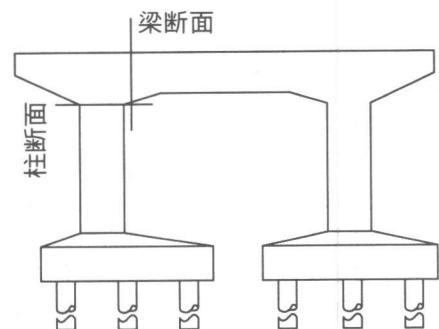


図-1 RC ラーメン橋脚概略図

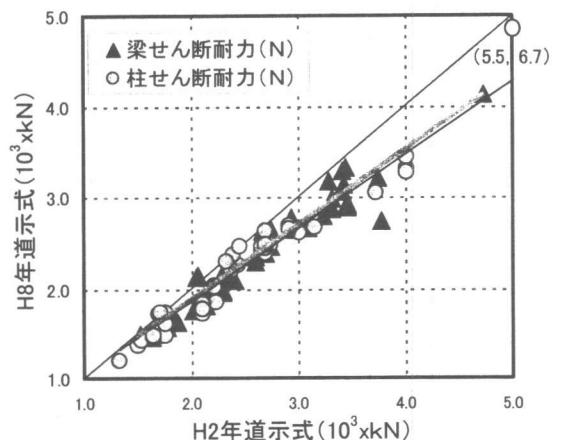


図-2 H2 年道示式と H8 年道示式の比較

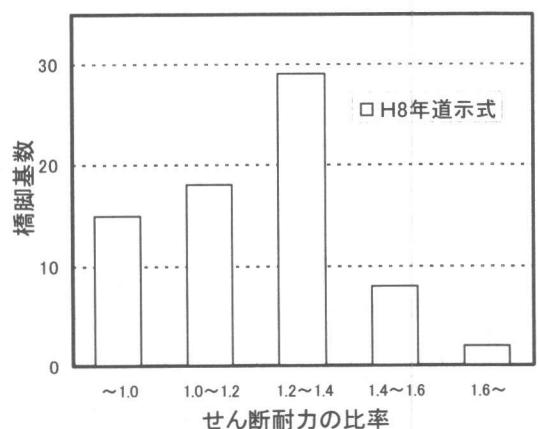


図-3 柱に対する梁せん断耐力の比率

R_d : 柱 1 本に有効に働く上部工重量(k N)

W_b : 柱 1 本に有効に働く梁部材の重量(k N)

図-4 と図-5 にそれぞれ H2 道示式と、H8 道示式によるせん断等価水平震度と損傷度の関係を示す。損傷度と H2 および H8 道示式をそれぞれ比べると H8 道示式の方が損傷度 A, B ランクとの相関が大きく、損傷度 C ランク以上の橋脚はせん断等価水平震度が小さい傾向にあるという結果を得た。

4. 地震時保有水平耐力法による耐力評価

4.1 解析対象橋脚

解析の対象とする橋脚の損傷状況を表-2 に示す。対象橋脚は損傷度による違いを評価するために、各損傷ランクごとに選定した。また、ラーメンの構造特性を知るため不静定構造となる橋軸直角方向について損傷しているものを評価した。損傷状況としてはまず、B ランク橋脚である神 P-346 では海側の柱上端が大きく曲げ破壊しており、山側の柱基部もコンクリートの剥離がみられた。A ランク橋脚である神 P-348 では海側の柱上端がせん断破壊している。

構造的特徴としては神 P-346, 347, 348 が各橋脚にフーチングがある分離型フーチングであり、柱高と幅員の比は神 P-346 が 0.382 (6.498m/17m), 神 P-347 が 0.347 (5.898m/17m), 神 P-348 が 0.353 (5.996m/17m), と 3 基ともほとんど同じ形状をしている。神 P-550, 570 は地中においてフーチングが一体となっている一体型フーチングで、柱高と幅員の比はそれぞれ 0.252 (6.2m/24.6m), 0.242 (6.074m/25.15m) であり、神 P-346, 347, 348 に比べて橋脚高が低く幅員が広いという特徴がある。

4.2 解析手法

保有水平耐力法（非線形静的解析）を用いた解析を行う。保有水平耐力法とは図-6 に示す

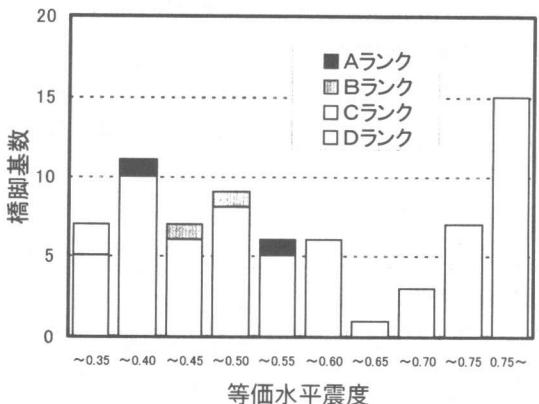


図-4 等価水平震度と損傷度
(H2年道示式)

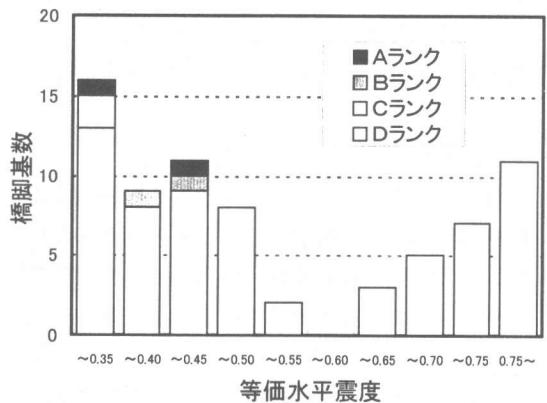


図-5 等価水平震度と損傷度
(H8年道示式)

表-2 各橋脚の損傷状況

橋脚番号	損傷状況				重量 (k N)	
	ランク	形態	位置	方向	上部工Rd	梁Wb
神 P-346	B	曲げ	柱基部上端	T	4484.5	1730.4
神 P-347	D	曲げせん断	柱基部	T	4484.5	1580.5
神 P-348	A	せん断	柱上端	T	5260.6	1580.5
神 P-550	D	損傷なし			4468.8	1575.6
神 P-570	D	損傷なし			4655.0	1683.3

全体系の骨組み（フレーム）構造モデルに、一様な水平震度 k_h を作用させ、この荷重を漸増させて変位や断面力、部材の非線形化の程度や崩壊過程を算定するものである。橋梁全体系の初期降伏時としては塑性ヒンジの 1箇所が降伏に達する時、終局時としては 1箇所が終局に達する時として定義した。また、解析に用いる各

定数はH8道示式による手法を標準とした。

本研究で用いた解析条件を以下に示す。

①橋脚部材は非線形とし各要素ごとにM-φ特性を与える。M-φモデルはH8道示式に基づいて算出しトリリニアモデルとする。

②梁部材は弾性部材とする。

③荷重は上部工死荷重反力、橋脚自重、水平漸増荷重を考慮する。

④上部工死荷重と地震荷重は支承位置に作用させる。

⑤地震荷重は当該地域では南から北への方向が強かったことが指摘されており、その方向を作成方向とする。

⑥支承部、隅角部、フーチング部を剛域とする。

⑦地盤バネは弾性バネとし、水平バネと回転バネを設定する。

4.3 解析例

解析を行った5橋脚の代表として神P-550の解析例を示す。対象橋脚である神P-550のモデル図を図-6に示す。図-7に各荷重ステップの降伏判定および等価水平震度を示す。図中の数字は橋脚の各要素が受ける曲げモーメントの値である。梁要素は弾性部材と設定していたが、

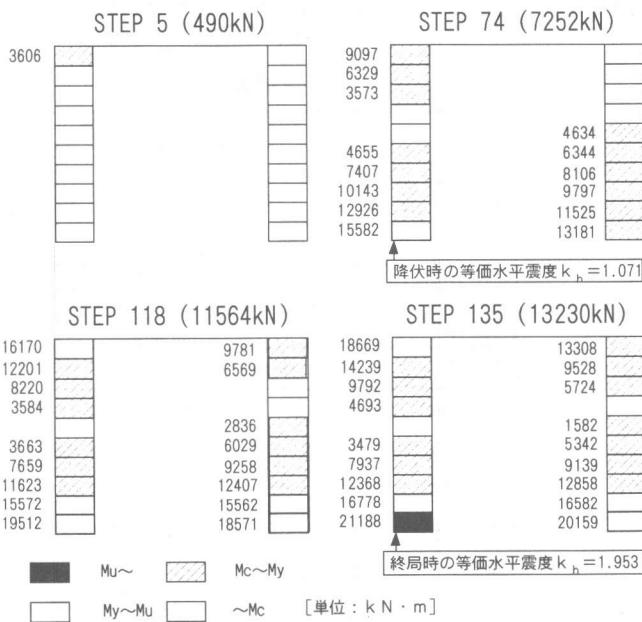


図-7 各荷重ステップの降伏判定

降伏荷重に達しなかったために、図-7には橋脚要素のみを記載した。

①曲げ耐力について

図-7を見るとSTEP5(490kN)で柱上端にひび割れが生じている。その後、STEP74(7252kN)で柱基部が降伏し、同箇所がSTEP135(13230kN)で終局に至っている。等価水平震度を求めるとき降伏曲げ耐力が1.200、終局曲げ耐力が2.189に相当した。

②せん断耐力について

H8道示式よりせん断耐力を求めると、柱上端で3575(kN)、等価水平震度は0.591であった。

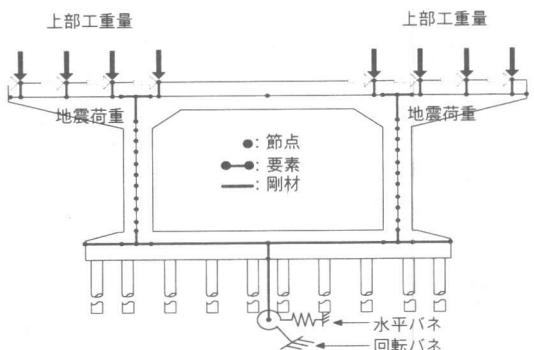


図-6 フレームモデル例（神P-550）

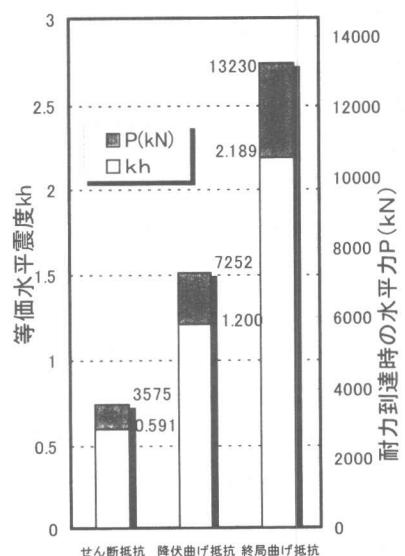


図-8 神P-550の等価水平震度

神P-550 のせん断および曲げ抵抗に達する時の地震荷重Pと等価水平震度 k_h を図-8に示す。図-8を見るとせん断抵抗が曲げ抵抗に比べて低くせん断破壊先行型であることが分かる。また、曲げ抵抗、せん断抵抗とともに等価水平震度でいずれも 0.59 以上と比較的大きな値を示していることが分かる。

5. 橋脚の比較および考察

5.1 耐力値に対する検討

解析対象の 5 基の橋脚についても同様に等価水平震度を求める。図-9 に各橋脚の等価水平震度およびRC单柱の等価水平震度の平均値を示す。

図-9 よりラーメン構造の橋脚は单柱形式のものに比べてせん断耐力、曲げ耐力ともに高い数値を示していることが伺える。特に曲げ耐力についてその差は大きく最も耐力の低い神P-346 でさえ 3 倍近くの耐力がある。同様にせん断耐力についても 1.5 倍程度の耐力がある。この様にラーメン橋脚はせん断耐力に比べて降伏曲げ耐力が高い傾向にあることがわかる。中でも神P-550, 570 の終局曲げ耐力は高い値を示しているが、これは神P-346, 347, 348 の軸方向主鉄筋比が 1.028% であるのに対して神P-550 は 4.103%, 神P-570 は 1.778% と高い値を示しており、主鉄筋比が高く、鉄筋降伏から終局に至るまでの区間が長いためと考えられる。

5.2 損傷形態に対する検討

図-10 に曲げ降伏時の等価水平震度とせん断耐力の等価水平震度の関係を示す。図中には損傷度ランクおよび損傷形態を記載している。

図-10 よりいずれのラーメン橋脚も曲げ耐力がせん断耐力より非常に大きくせん断破壊先行型であることが分かる。同様に他の 3 号神戸線ラーメン橋脚についても形状がほぼ同様であることからせん断破壊先行型となることが予想される。図-10 に示す様に神P-346, 347, 348 は非常に近い値を示しており同じ様な傾向となっている。しかし、実際には曲げ損傷、損傷軽

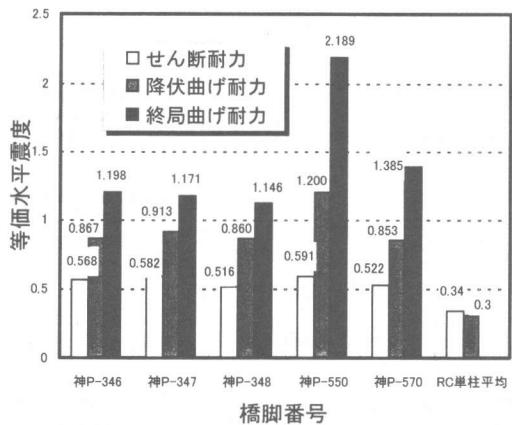


図-9 各橋脚の等価水平震度

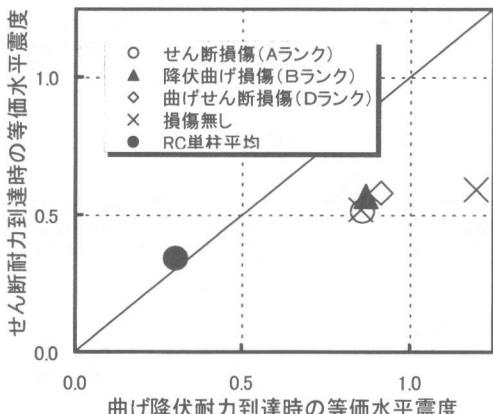


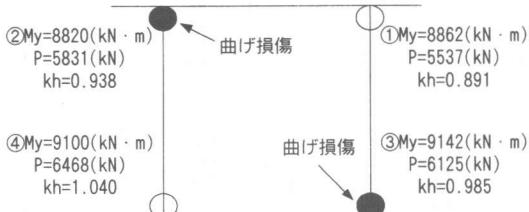
図-10 曲げ降伏とせん断の等価水平震度

微、せん断損傷と 3 橋脚とも異なる挙動をしていることより、解析結果が実際の損傷形態が合っていないことが分かる。また、神P-346 に注目すると、せん断耐力と曲げ耐力の等価水平震度比は 0.474 となっており実際の損傷状況である曲げ損傷を受けるためには少なくとも 2 倍程度のせん断耐力が必要である。神P-346 に限らず解析上ではせん断破壊先行型を示すものの、実際には曲げ損傷を受けたラーメン橋脚は数多く存在している。これは、本解析手法では軸力変動の影響が考慮されてないことなどが原因の一つとして考えられる。

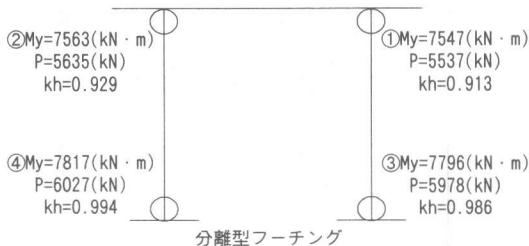
5.3 曲げ損傷パターンに対する検討

曲げ降伏耐力に対する損傷パターンを図-11 に示す。図-11 より一体型フーチングの耐力の方が分離型に比べて高いことが分かる。最初に

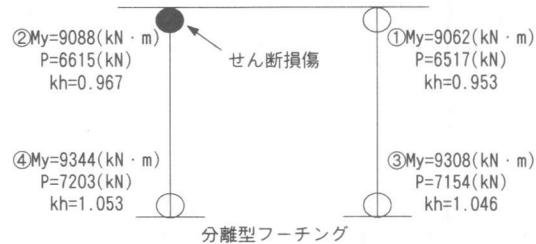
神P-346



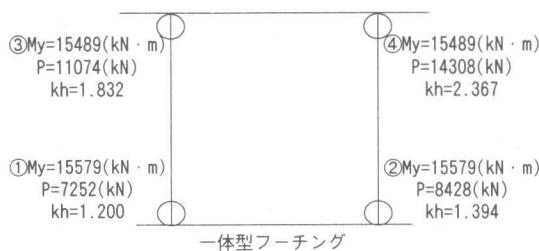
神P-347



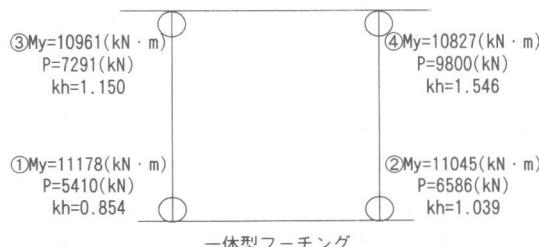
神P-348



神P-550



神P-570



● : 実損傷状況を表す

図-11 曲げ降伏耐力に対する損傷パターン

降伏する位置に注目すると分離型が柱上端、一体型が柱基部となっており、構造的に似ている橋脚は同じ様なパターンで損傷が進んでいくことが分かる。2 タイプの橋脚で損傷箇所が異なる原因としてフーチング基礎部分の固定度が挙げられる。一体型フーチングは分離型に比べて固定度が高く、柱基部にかかるモーメントの負担が大きくなると考えられる。

6.まとめ

被災したRCラーメン橋脚の損傷度を簡易せん断耐力評価手法およびフレーム解析法を用いて評価した結果を以下にまとめる。

- 1) 被災したRCラーメン橋脚において柱部分のみにしか損傷が認められなかった要因の1つとしては、一般に梁よりも柱のせん断耐力が小さい場合が多いことが考えられる。
- 2) 損傷度が大きい橋脚では柱のせん断耐力等価水平震度は小さい傾向にあり、柱のせん断耐力等価水平震度と損傷度には相関が認められた。
- 3) フレーム解析を実施した5基のRCラーメン橋脚は、単柱形式橋脚に比べて、いずれもせん断耐力、曲げ耐力ともに大きな抵抗値を示した。
- 4) 本解析では5基ともせん断破壊先行型の損傷モードを示し、実際の損傷モードと異なる結果となった。これは解析時に軸力変動の影響を考慮していないことが原因の一つと考えられる。
- 5) 5基のRCラーメン橋脚のうちフーチングが一体型であり、柱高が低く、幅員が広い形状の橋脚では終局曲げ耐力が大きくなる傾向が認められた。

参考文献

- 1) 田中, 幸左, 藤井: 兵庫県南部地震で被災したRCラーメン橋脚の損傷評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, 1999.
- 2) 阪神高速道路公団: 阪神高速道路3号神戸線RC橋脚の損傷分析中間報告書, 1997.
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 平成2年2月および平成8年12月。