第26回橋梁等の耐震設計シンポジウム
講演論文集（2023年7月）

再生CFRPフープ筋を帯鉄筋とするRC柱の正負交番載荷実験

佐々木　智大[1]・萩尾　浩也[2]・平田　隆祥[3]・野村　敏雄[4]

[1]正会員　博(工)　(株)大林組　技術研究所（〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640）
[2]博(工)　(株)大林組　技術研究所（同上）
[3]正会員　博(工)　(株)大林組　技術研究所（同上）
[4]フェロー　博(工)　(株)大林組　技術研究所（同上）

1. はじめに

化石燃料は燃焼時に温室効果ガスを排出することから，カーボンニュートラルの実現に向け，大幅に削減することが求められている．そのため，輸送時のエネルギー削減を目的として，軽量・高強度な炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の自動車・航空機分野での利用が急速に拡大している．また，化石燃料に変わるエネルギー源として，温室効果ガスを排出しない水素に注目が集まっており，水素と酸素を化学反応させて直接電気を発電する水素燃料電池車(FCV)が開発され，すでに市販されている．

炭素繊維は，密度が鋼材の1/4程度と非常に軽い材料でありながら，一般的な鋼材(SS400材)の10倍以上の強度を持ち，錆びず，化学的・熱的にも安定している優れた材料である．そのため，FCVに搭載される水素タンクは，少ないスペースに大量の水素を貯蔵するために，70MPaもの高圧に耐えられ，かつ軽量なタンクとなるようにCFRPが用いられる．しかし，このタンクは，高圧ガス保安法の制限により，基本的には損傷・劣化がない状態であっても15年で使用できなくなるため，適正な処理が求められる．

炭素繊維は製造時に多大なエネルギーが必要であり，非常に高価にもかかわらず，そのリサイクル技術は確立していないことから，現状は廃CFRP製品を埋め立て処分することが一般的である．資源循環型社会の形成の観点から，炭素繊維のリサイクル技術が求められており，活発に研究開発が進められている．CFRP製品のリサイクルでは，何らかの形で炭素繊維を樹脂に分離して炭素繊維を回収する方法がとられる．樹脂と炭素繊維を分離する方法としては，加熱して樹脂部分を炭化・焼成し繊維を取り出す方法(熱分解法)と，薬品により樹脂部分を溶解させて繊維を取り出す方法(熔解法)などがある[1)]が，いずれの方法も，処理の過程で繊維が分断されることが多く連続繊維の状態で取り出すことが難しいこと，取り出した炭素繊維の強度が新品の50～85%程度に低下することから，新品の炭素繊維を再生炭素繊維に置き換えることはできず，普及には至っていない．

そこで，炭素繊維に戻してから再度製品に再加工するのではなく，廃棄予定のCFRP製タンクを，その形状や特性を生かしたまま部品に加工して構造物を構築できないかを考えた．炭素繊維を建設材料に応用する事例は1980年代頃から研究されてきており，短繊維に加工した炭素繊維をコンクリートに練り混ぜ繊維補強コンクリートとする方法例えば[2)]，ストランドのままあるいはシート状に加工した炭素繊維を柱や梁に巻き付けて補強する方法例えば[3)]や，CFRPロッドを補強筋として利用する方法例えば[4)]，CFRP成形版を部材表面に貼り付けて補強する方法[5)]などがこれまでに検討されてきている．

本研究では，廃棄予定のCFRP製高圧水素タンクを，そのまま輪切りにしてフープ状に加工した再生CFRPフープ筋が鉄筋の代替として循環利用できないかについて検証するため，再生CFRPフープ筋を帯鉄筋とするRC柱を製作して正負交番載荷実験を行い，その曲げ耐力と変形性能について確認した．

2. 試験体と載荷方法

(1) 試験体

図-1に本実験に用いた試験体を，**写真-1**に各試験

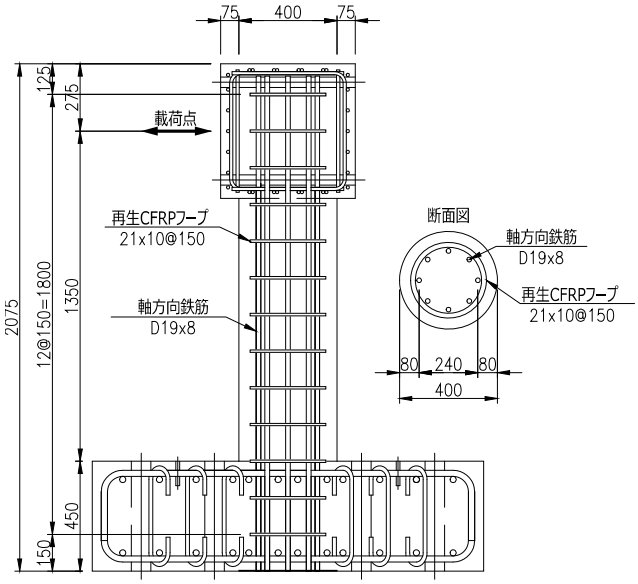
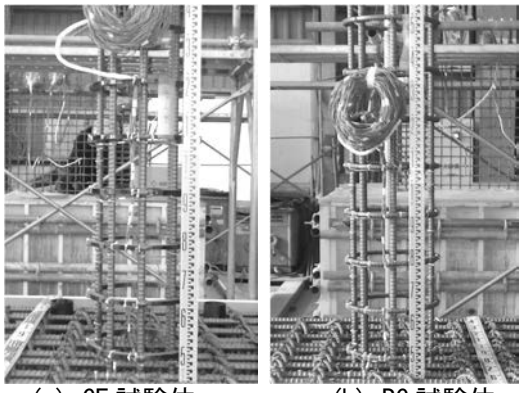


図-1　CF 試験体



(a) CF 試験体　　(b) RC 試験体

写真-1　試験体の配筋状況

体の配筋状況を，**表-1**に試験体の諸元を示す．試験体は2体製作した．いずれもφ400mmの円形断面を有し，載荷点高さ1350mmのRC柱である．また，軸方向鉄筋には通常の異形鉄筋のD19を8本配置した．試験体2体のうち1体は，後述する再生CFRPフープ筋を帯鉄筋としたCF試験体であり，残りの1体は比較用として通常の異形鉄筋D16を帯鉄筋とするRC試験体である．いずれの試験体も帯鉄筋は150mm間隔で配置した．

(2) 再生CFRPフープ筋

写真-2に今回実験に用いた再生CFRPフープ筋を示す．再生CFRPフープ筋は，FCV用水素タンクの円筒部の構造を模擬する内径270mm，厚み21mmのCFRP製円筒パイプをフィラメントワインディング法で製作してから，これを切断加工することで製作した．フィラメントワインディング法とは，あらかじめ樹脂を含浸させた繊維束を，ライナーもしくはマンドレルと呼ばれる型に張力をかけながら巻き付けて成形した後，熱を加えて樹脂を硬化させて製品を製造する方法[6]であり，FCV用タンクの製造に用いられる方法である．

使用材料には，引張強度4900MPa，弾性係数230GPaの炭素繊維と，熱硬化性のエポキシ樹脂を使用し，繊維量は全体の体積の60%程度となるように調整した．炭素繊維の巻き付け方向は，円筒軸に対して18度，33度，50度，90度とした．炭素繊維の円筒軸に対する巻き付け角度とそれぞれの層厚を**表-2**に示す．この巻き付け角度と層厚は，事前に実施した繊維方向の直交異方性を考慮したFEM解析に基づいて設定した．

再生CFRPフープ筋の強度に直接寄与する90度方

表-1　試験体諸元

試験体		CF 試験体	RC 試験体
載荷点高さ		1350mm	
断面形状		φ400mm 円形	
コンクリート強度		46.6MPa	41.0MPa
軸方向鉄筋	径-規格	D19-SD345	
	本数	8	
	引張鉄筋比p_t	0.684%	
	降伏強度f_y	392MPa	
帯鉄筋	断面-規格	21mm×10mm 再生 CFRP	D16-SD345
	配置間隔	150mm	
	体積比ρ_s	2.07%	1.96%
	降伏強度f_{sy}	-	388MPa
	引張強度f_{st}	470MPa	568MPa
	弾性係数E_s	52.3GPa	196.1GPa
	面積比p_w	0.790%	0.747%
	拘束応力$p_w f_{sy}$	3.71MPa	2.90MPa
道路橋示方書[7]に基づく骨格曲線	初降伏水平耐力	49.1kN	47.3kN
	終局水平耐力	73.3kN	72.8kN
	初降伏変位	3.7mm	3.7mm
	降伏変位	5.5mm	5.7mm
	限界状態 2 の水平変位	76.6mm	77.0mm
	限界状態 3 の水平変位	105.7mm	106.2mm

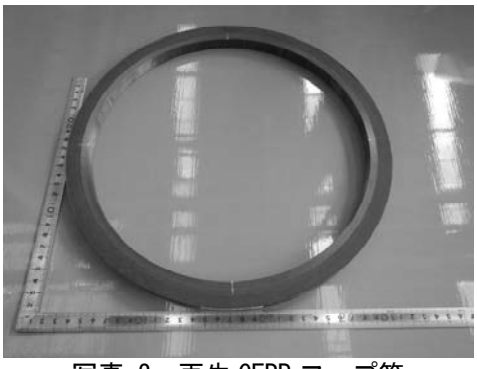


写真-2　再生 CFRP フープ筋

向に巻き付けた有効炭素繊維量は，全体の断面積の37%である．再生CFRPフープ筋の切断幅は，D16と同等の断面積となるように10mmとした．

図-2に帯鉄筋に用いた再生CFRPフープ筋とD16異形鉄筋の引張試験により得られた応力～ひずみ関係を示す．CFRPフープ筋の破断時荷重を断面積で割って求めた引張強度は470MPaであり，RC試験体に用いたD16帯鉄筋の降伏強度は388MPaである．**図-2**より明らかなように，CFRPフープ筋の初期剛性は52.3GPaと小さく，異形鉄筋の1/4程度であった．

(3) 載荷方法

写真-3に実験のセットアップを示す．載荷点高さの0.5%に相当する水平変位6.75mmを基準として，これの整数倍の変位振幅を漸増させながら繰り返して与えた．これ以降，実験中に計測した試験体の載荷点高さの変位を水平変位と，水平変位を載荷点高さ1350mmで除した値を変形角と定義する．また，各載荷ステップにおける変位振幅を載荷変位とし，載荷変位を載荷点高さ1350mmで除した値を載荷変形角とする．

ある載荷変位における繰返し回数は3回とした．なお，本実験は再生CFRPフープ筋の適用可能性を検討するための基礎データの取得を目的としたため，軸力は導入していない．

表-2　CFRP製タンクの層厚

巻き付け角度	層厚
90度	8.4mm
50度	3.8mm
33度	3.8mm
18度	4.6mm
合計	20.6mm

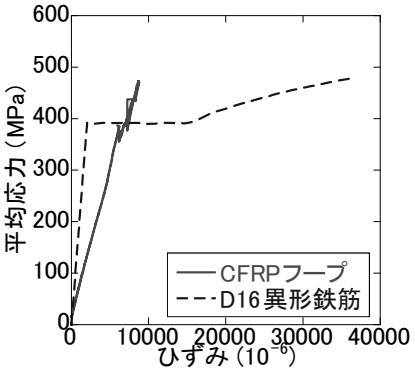


図-2　帯鉄筋の引張試験結果



写真-3　実験セットアップ

3. 正負交番載荷実験

(1) 損傷状況

写真-4にCF試験体の損傷状況を，**写真-5**にRC試験体の損傷状況を示す．CF試験体は，水平変位10.9mm(変形角0.8%)で軸方向鉄筋が降伏し，その後，載荷変位40.5mm(載荷変形角3.0%)でかぶりコンクリートが剥落しはじめ，載荷変位67.5mm(載荷変形角5.0%)で基部の鉄筋が座屈した．最後に，載荷変位94.5mm(載荷変形角7.0%)で鉄筋が破断し実験を終了した．

RC試験体は，載荷変位67.5mm(載荷変形角5.0%)で基部鉄筋が座屈し始めるところまではCF試験体とほぼ同様の損傷の進展状況を示した．基部鉄筋が座屈した後は，CF試験体よりも早めの載荷変位87.8mm(変形角6.5%)で鉄筋が破断して実験を終了した．

(2) 荷重～変位関係と履歴吸収エネルギー

図-3に実験で計測された荷重～変位関係とその包絡線を示す．**図-3**中には，比較のため，道路橋示方書[7]に基づき評価した骨格曲線も示している．

CF試験体では，変位10.9mm(変形角0.8%)で軸方向鉄筋が降伏した後，変位19.9mm(変形角1.5%)で正側最大水平力98kNに，変位-34.1mm(変形角-2.5%)で負側最大水平力97kNに達した．その後は安定した履歴ループを描きながら載荷変位67.5mm(載荷変形角5.0%，図中a点)で基部の軸方向鉄筋が座屈するとともに水平力が低下し始め，載荷変位94.5mm(載荷変形角7.0%)で軸方向鉄筋の破断で終了した．

RC試験体の場合には，変位9.2mm(変形角0.7%)で軸方向鉄筋が降伏し，変位20.1mm(変形角1.5%)で正側最大水平力96kNに，変位-27.2mm(変形角-2.0%)で負側最大水平力98kNに達した．CF試験体と同様に，水平力が最大になった後も，軸方向鉄筋が座屈し始める載荷変位67.5mm(載荷変形角5.0%，図中b点)までは水平力の急激な低下はない．軸方向鉄筋の座屈後は急激に水平力が低下し，載荷変位87.8mm(載荷



(a) 変形角 3.0%



(b) 変形角 5.0%



(c) 変形角 7.0%

写真-4　CF 試験体の損傷進展状況



(a) 変形角 3.0%

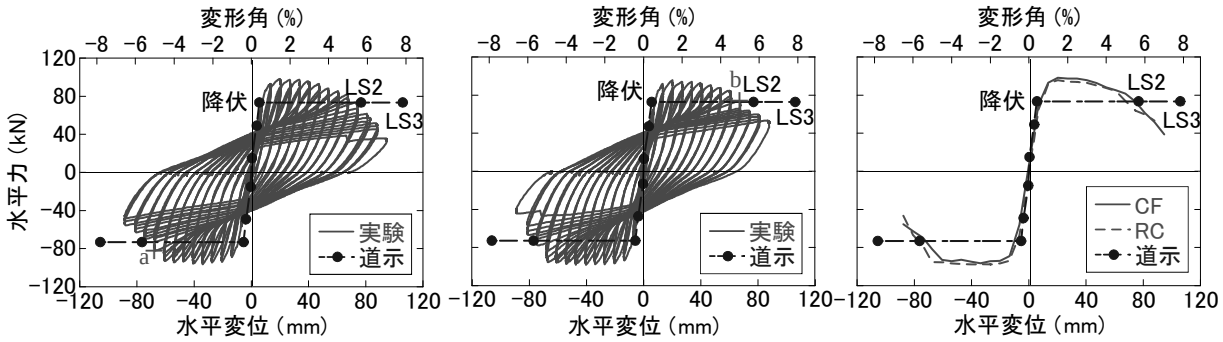


(b) 変形角 5.0%



(c) 変形角 6.5%

写真-5　RC 試験体の損傷進展状況



(a) CF 試験体　(b) RC 試験体　(c) 包絡線

図-3　荷重～変位関係

変形角6.5%)で軸方向鉄筋が破断し実験を終了した．

道路橋示方書の手法で終局耐力を評価すると，73.3～72.8kNである．前述の通り2つの試験体の最大水平力は96～98kNであり，計算上の終局耐力の1.3倍の曲げ耐力を発揮した．道路橋示方書の手法での終局耐力の計算では，かぶりコンクリートを無視することで安全側に評価しようとするのに対して，実験において最大水平力を発揮したタイミングではかぶりコンクリートが健全であったため，このような差が生じている．

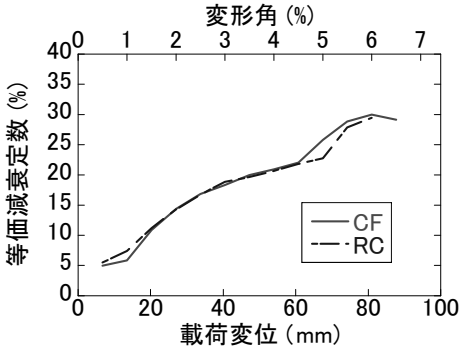
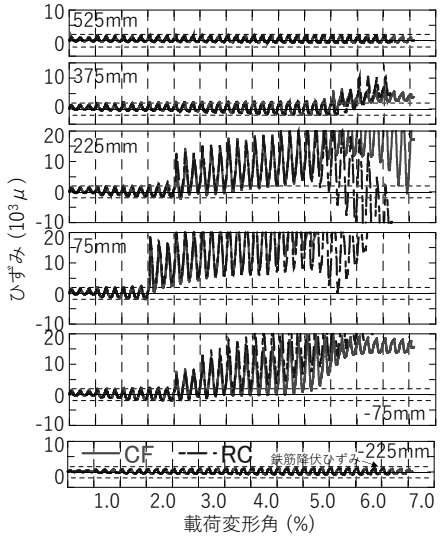


図-4　等価減衰定数



※図中の数値は柱基部からの高さを示す

図-5　軸方向鉄筋ひずみ

実験ではいずれの試験体も軸方向鉄筋の座屈に伴う水平力の低下が変形角5.0%より始まっており，載荷変形角5.0%の時の3サイクル目の水平力に対する1サイクル目の水平力の比はCF試験体で83.8%，RC試験体で86.4%であったことから，この変位がおおむね限界状態2に相当すると考えることができ，2つの試験体の変形性能はほぼ同等であるといえる．

なお，道路橋示方書の手法で限界状態2の変位を求めると76.6～77.0mmであり，変形角5.7%に相当する．実験値よりも計算値の方が大きく，危険側の評価となるが，**図-3(c)**に示したように，水平力が終局耐力の計算値を下回るのは限界状態2の変位(LS2の点)であり，道路橋示方書の手法で適切に評価できるといえる．

図-4に等価減衰定数を示す．等価減衰定数h_eは履歴吸収エネルギーΔWと弾性エネルギーW_Eの比から次のようにして求められる．

$$h_e = \frac{1}{4\pi}\frac{\Delta W}{W_E} \qquad (1)$$

ここで，履歴吸収エネルギーΔWは各載荷変位の2サイクル目の履歴ループの吸収エネルギーを積分して求めた．また，弾性エネルギーW_Eは2サイクル目の履歴ループの最大水平変位と，水平変位が最大となったときの水平力Fから求められる弾性エネルギーとした．

図-4に示すとおり，2つの試験体に大きな差はなく，CF試験体の等価減衰定数は，RC試験体と同等かそれ以上の性能であった．

(3) 軸方向鉄筋ひずみ

図-5に軸方向鉄筋ひずみを示す．少なくとも軸方向鉄筋の座屈が確認された載荷変位67.5mm(変形角5.0%)までは，CF試験体とRC試験体で軸方向鉄筋ひずみの応答に有意な差がないことがわかる．いずれの試験体も載荷変位27.0mm(変形角2.0%)において，柱基部から75mm高さで軸方向鉄筋が塑性化し，続けて載荷変位33.8mm(変形角2.5%)で柱基部から225mmの高さにまで塑性化の範囲が広がっている．載荷変位67.5mm(変形角5.0%)以降は，軸方向鉄筋の座屈により基部から375mmの高さでも塑性化した．

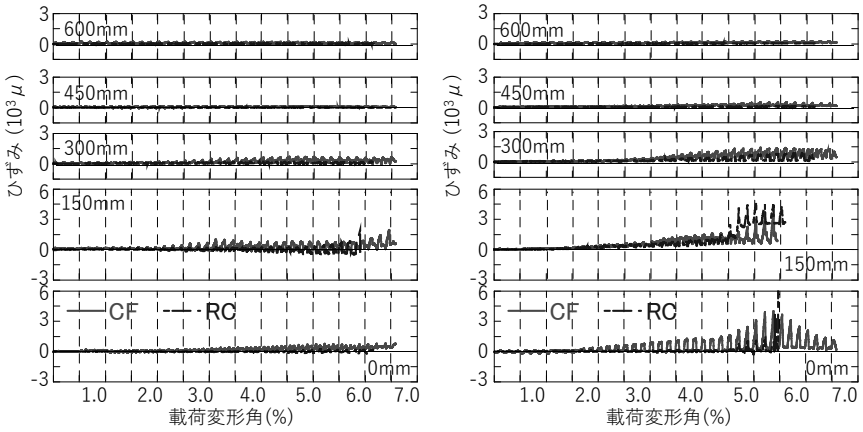
(4) 再生CFRPフープ筋および帯鉄筋ひずみ

図-6にCF試験体の再生CFRPフープ筋のひずみとRC試験体の帯鉄筋ひずみを示す．いずれもフープ筋の上面にひずみゲージを1枚貼り付け計測した．**図-6(a)**に示した載荷方向に平行な方向は，CF試験体試験体の再生CFRPフープ筋のひずみの方が，RC試験体の帯鉄筋ひずみよりも大きめのひずみが計測された．**図-2**に示したように再生CFRPフープ筋の剛性は小さいため，ひずみが大きくなりやすい傾向にあるといえる．なお，再生CFRPフープ筋は9000 μ ほどまでほぼ線形弾性の挙動を示していることから，破断まではまだまだ余裕がある．

図-6(b)に示した載荷方向に直交方向は，RC試験体では，軸方向鉄筋が座屈するまでは帯鉄筋にひずみが生じないのに対して，CF試験体では，柱基部の再生CFRPフープ筋のひずみが載荷変位の増加とともに漸増した．

軸方向鉄筋の座屈後はRC試験体の帯鉄筋のひずみは急激に増加して降伏したのに対し，CF試験体の再生CFRPフープ筋は増加が緩やかで最大でも4000 μ 程度と，破断までは余裕がある結果となった．

CF試験体の再生CFRPフープ筋は，RC試験体の帯鉄筋よりも剛性が小さいため，軸方向鉄筋の座屈によるはらみ出しを拘束する力が弱くなる．そのため，



(a) 載荷方向に平行な方向　　(b) 載荷方向に直交する方向

図-6　再生 CFRP フープ筋(CF 試験体)および帯鉄筋(RC 試験体)のひずみ

CF試験体の軸方向鉄筋の座屈長は長めに，RC試験体の軸方向鉄筋の座屈長は短めになったと考えられる．そのため，軸方向鉄筋が破断した変位が，CF試験体の方が，RC試験体に比較して大きめの値を示したものと考えられる．

4. まとめ

FCV用高圧水素タンクを切断加工して製造した再生CFRPフープ筋を鉄筋の代替として循環利用できないかを検討するため，再生CFRPフープ筋を帯鉄筋とするRC柱の正負交番載荷実験を行った．実験より得られた知見は以下の通りである．

1) 再生CFRPフープ筋を帯鉄筋としたCF試験体は，変形角3.0%でかぶりコンクリート圧壊し始め，変形角5.0%で軸方向鉄筋が座屈し，変形角7.5%で軸方向鉄筋が破断して破壊に至った．この損傷過程は従来の異形鉄筋を帯鉄筋とするRC試験体とほぼ同じであり，再生CFRPフープ筋は従来の鉄筋の代替として利用可能である．
2) RC試験体の帯鉄筋は軸方向鉄筋の座屈に伴い降伏した．これに対してCF試験体の再生CFRPフープ筋のひずみは最大で4000μ程度であり，引張試験により得られた破断ひずみの半分以下であった．CF試験体の再生CFRPフープ筋は剛性が小さく座屈長が長くなった結果，軸方向鉄筋の破断しにくくなり，破断時の変位はRC試験体よりも大きくなった．

参考文献

1) 守富寛：炭素繊維強化複合材料のリサイクル／CFRP廃棄物の再資源化，成形加工，Vol. 30，No. 2，pp. 59-63，2018
2) S. Sarkar and M. B. Bailly: Structural properties of carbon fibre reinforced cement, RILEM Symposium 1975, Fibre Reinforced Cement and Concrete, pp. 361-371, 1975
3) 勝俣英雄，小畠克朗，武田寿一：新素材による既存鉄筋コンクリート柱の耐震補強に関する研究（その1）－炭素繊維による円形断面柱の補強実験－，大林組技術研究所報，No. 33，pp. 67-71，1986
4) 木村耕三，小畠克朗，武田寿一：繊維系新素材の構造部材への適用に関する研究（その1）－炭素繊維を補強筋とした曲げ部材実験－，大林組技術研究所報，No. 34，pp. 119-123，1987
5) 木村耕三：炭素繊維強化プラスチック成形板による曲げ補強工法の開発，大林組技術研究所報，No. 59，pp. 37-44，1999
6) 瀬川浄一郎：フィラメントワインディング，高分子，Vol. 19，No. 4，pp. 285-290，1970
7) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，丸善出版，2017