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）

低温環境下でのスプリング拘束型鉛プラグ入り高減衰積層ゴム支承の実時間ハイブリッド実験

鍋島 信幸[1]・党 紀[2]・濱田 由記[3]・姫野 岳彦[4]・新名 裕[5]・五十嵐 晃[6]・沈 捷[7]

[1]正会員　(株)長大　つくば構造技術・解析部（〒305-0812 茨城件つくば市東平塚730）
[2]正会員　博(工)　埼玉大学准教授　環境社会デザイン学科（〒338-8670 さいたま市桜区下大久保255）
[3]非会員　川金コアテック　技術本部（〒307-0017 茨城県結城市若宮8-43）
[4]正会員　博(工)　川金コアテック　技術本部（〒332-0015 埼玉県川口市川口2-2-7）
[5]正会員　川金コアテック　営業本部（〒332-0015 埼玉県川口市川口2-2-7）
[6]正会員　Ph.D. 京都大学教授　防災研究所（〒611-0011 京都府宇治市五ケ庄）
[7]学生会員　M.E.　京都大学大学院工学研究科博士後期課程（〒611-0011 京都府宇治市五ケ庄）

1. はじめに

道路橋の免震支承として用いられる高減衰ゴム支承(HDR-S支承)や鉛プラグ入りゴム支承(LRB支承)は，力学的特性を把握するために多くの実験や研究が行われており，これらの免震支承のせん断剛性や復元力特性は，温度に依存することが知られる．免震支承の温度の依存性をテーマにした実験・研究としては，奥井ら[1)]や斎藤ら[2)]の研究があり，特に奥井らの研究により支承の周辺温度の影響の他にも，繰り返し生じるせん断変形による自己発熱による内部温度の影響も存在することが明らかにされている．また，HDR-S支承やLRB支承よりも高い履歴減衰性能を有するスプリング拘束鉛プラグ入り高減衰ゴム支承(SPR-S支承)においても，同様の性質が報告されている[3)]．

一方，これらの既往の研究は，準静的載荷実験や仮動的載荷実験などの低速載荷実験を基に行われているが，着目する支承の温度上昇や支承内部の温度分布は，支承のせん断変形速度に関連することが予想される．

そこでここでは，低温環境下でのSPR-S支承を対象に実時間のハイブリッド実験を行い，低温環境下でのSPR-S支承の履歴特性や実時間載荷の影響などを整理した．なお本報告は，低温環境下でのSPR-S支承の荷重-変位関係の変化に着目し，支承の温度上昇や支承内部の温度分布，およびそれが支承の挙動に及ぼす影響の評価は，別の報告とする．

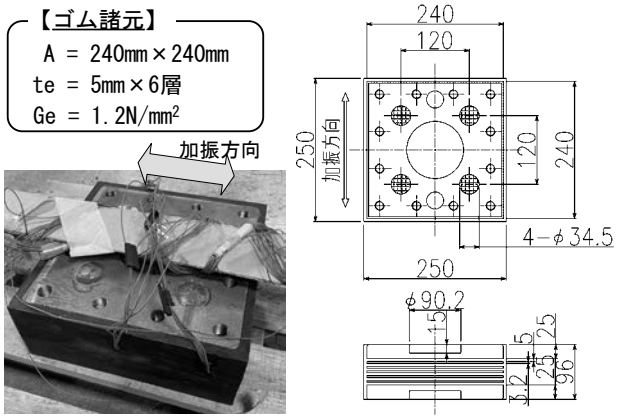


図-1 SPR-Sの供試体詳細図

2. 実験計画

(1) 供試体

本実験で用いるスプリング拘束鉛プラグ入り高減衰ゴム支承（SPR-S支承）の供試体の図を，**図-1**に示す．ゴムの有効面積が240mm×240mmの標準サイズの供試体であり，両側に5mmの被覆ゴムを有する．また，Ge=1.2N/mm²，ゴム総厚30mm（5mm×6層）であり，φ34.5の鉛プラグを4面に配置し，１次形状係数はS1=12.0，2次形状係数S2=8.0とした．

写真の計測機器は，いずれも支承内部の温度を計測する熱電対に対するものであり，熱電対については後者に後述する．



図-2　載荷装置外観(試験機)



図-3　低温環境の再現装置



図-4　断熱プレート（試験体上）

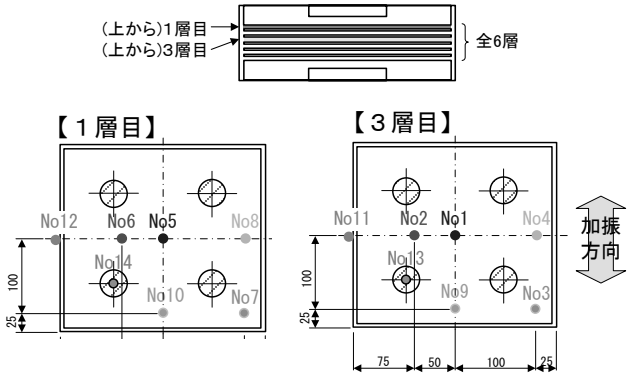


図-5　熱電対の配置

(2) 載荷装置

本実験で用いる動的載荷装置は，**図-2**に示す2軸試験機である．水平方向の最大荷重は400kN，最大荷重は200mm，鉛直方向の最大圧縮荷重は2000kN，引張で1000kN，最大変位は150mmである．

本実験では，装置上方の鉛直方向のアクチュエータにより，支承に所定の鉛直荷重（6MPa）が作用するように設定した．また，実験時には水平アクチュエーターを用いて，変位制御により供試体下の載荷台を加振した．

(3) 低温環境装置

供試体および供試体の周辺温度を条件の気温に設定できるよう，**図-3**に示すように，断熱材を用いて供試体の周りに低温チャンバーを構築した．加振していない時は，図にあるようなテープで上下に接着することで隙間を埋めているが，加振時にはテープは一時撤去した．供試体と低温チャンバーとの間には十分なクリアランスを確保しており，載荷しながらでも支承周りの温度を保持できるようにした．図の配管の先は冷却機に繋がっており，冷気を冷却機から吹き込む送気パイプと供試体の周囲の空気を冷却機に送る排気パイプの1本のパイプが配置されている．

また，載荷装置は室温と同程度の温度となっていることから，載荷装置から供試体に不要な熱が伝達しないよう，上下鋼板には**図-4**に示す断熱プレートを配置した．ただし，せん断力を確実に伝達するための中央のせん断キーには断熱プレートの配置は困難であることから，せん断キー部だけは断熱プレートを配置していない．

供試体自体と供試体の周りの温度の管理は，**図-5**に示す供試体の内部および供試体の側面に取り付けられた熱電対を用いて行った．供試体内部には，供試体内の温度分布の変化も計測できるよう，全10カ所で計測を行った．ただし，本報告では低温環境下がSPR-S支承の荷重-変位関係に及ぼす影響に着目して考察することから，代表して供試体真ん中（No1）の熱電対の計測結果を整理した．

(4) 載荷スケジュール

載荷実験は，１週間(5日間)を１サイクルとして行った．具体的には，**表-1**に示すように1回目のハイブリッド実験を実施した後に準静的載荷実験を行い，最後に2回目のハイブリッド実験を行った．実験期間中は低温キャンバー内は常に設定温度になる制御し，2回目のハイブリッド実験後に常温状態で解体作業を行った．

表-1　載荷スケジュール

日にち	実験	備考
1日目	設置 温度設定	
2日目	ﾊｲﾌﾞﾘｯﾄﾞ実験(1回目)	供試体としての 初期載荷
3日目	温度設定	
4日目	準静的載荷 実験	ﾊｲﾌﾞﾘｯﾄﾞ試験より 24hr以上あけて実施
5日目	ﾊｲﾌﾞﾘｯﾄﾞ実験(2回目) →常温解体	

※)表記サイクルを設定温度ごとに実施

設定温度ごとに表のサイクルで載荷実験を行い，設定温度+23℃,±0℃,-20℃の順に実験を行った．また，各実験は，設定温度に対してゴムの中心温度が±2℃，かつ表面温度が±3℃以内であることを確認した上で実施した．また，準静的載荷実験の各サイクルは，設定温度になるまでインターバルを設けて実施した．

3. 準静的載荷実験

(1)載荷方法

準静的実験では，一定面圧6MPaの鉛直荷重を維持しながら，水平方向にゴム支承のせん断ひずみを50%, 100%, 150%, 175%, 200%, 250%となる変位正負交番載荷で，各6サイクルを繰り返し載荷した．載荷時の設定温度は，前述したように，それぞれ23℃, 0℃, -20℃とした．

(2)各温度条件下の復元力履歴

各温度条件で得られた準静的載荷の履歴曲線を図-6に，等価剛性と等価減衰の変化を図-7, 図-8に示す．

今回得られた実験結果は，従来の研究で得られた知見と同様，低温時に等価剛性が大きくなる結果となった．その比率は+23℃を基準とすると，1サイクル目には±0℃時には約1.4倍，−23℃時には2倍程度となり，5サイクル目には±0℃時には1.3倍，−20℃時には1.6倍程度であった．

等価減衰の変化をみると，5サイクル目には設定温度による優位な差はみられなかった．一方，1サイクル目にはせん断ひずみ150%までは設定温度の低下に伴い等価減衰が小さくなるのに対し，200%以降では-20℃時の等価減衰が大きくなった．ただしこれは，図-6に記載したように，−20℃時の200%以降の載荷では実験装置の最大水平荷重に達したことで，-20℃時の履歴ループがより四角に近づいたことが

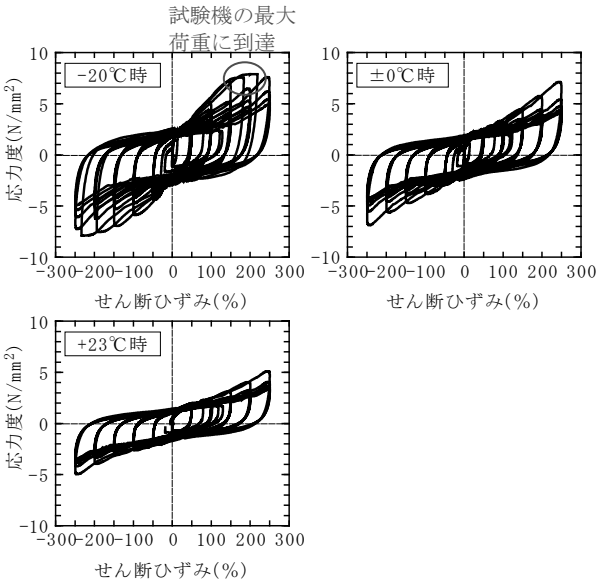


図-6　準静的載荷実験の応力-ひずみ関係

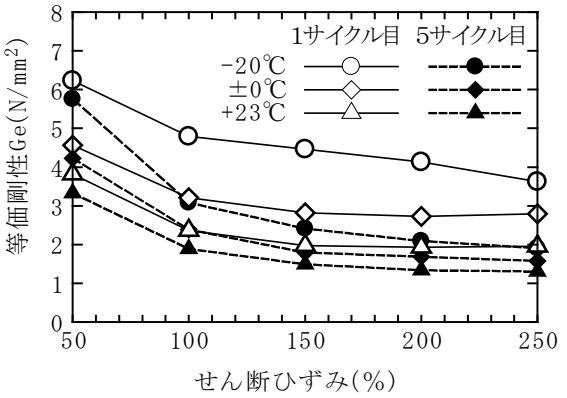


図-7　準静的載荷実験の等価剛性の変化

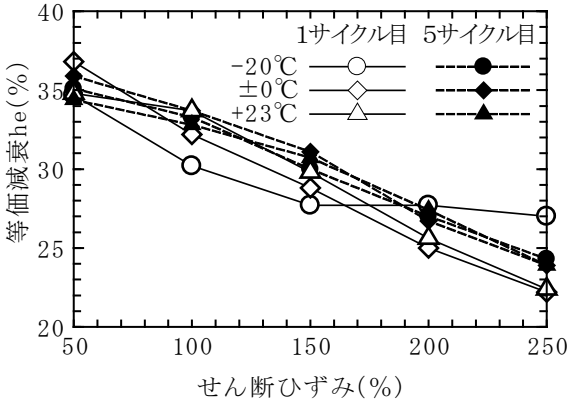


図-8　準静的載荷実験の等価減衰の変化

要因と思われる．

表-1で示した通り，準静的載荷実験は一度目のハイブリッド実験の後に実施しており，純粋な初期載荷には該当しないが，図からもわかるように，初期ループに対して2回目以降のループの水平力は低下した．また，その傾向は低温時において顕著である．

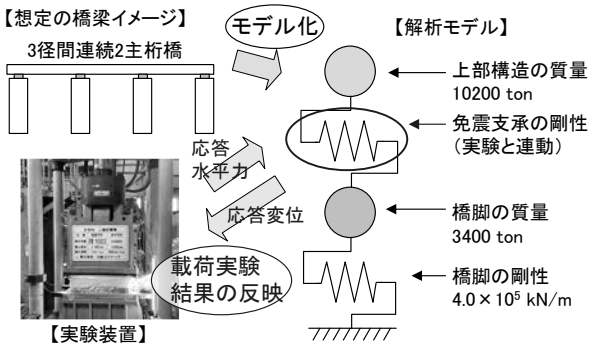


図-9　想定橋梁と実時間ハイブリッド実験のイメージ

表-2 実験ケース数

	実時間ﾊｲﾌﾞｯﾘｯﾄﾞ		仮動的※)
	1回目	2回目	
-20℃	1_-20	2_-20	3_-20
0℃	1_±0	2_±0	3_±0
23℃	1_+23	2_+23	3_+23

※)事前に静的正負交番載荷を実施のため
動的2回目と比較

4. ハイブリッド実験

(1)実験方法

想定する構造物とその諸元，および実時間ハイブリッド実験のイメージを**図-9** に，実験のケース数とその呼び方を**表-2** に示す．想定の橋梁は，8 基(2×4 支承線)の免震支承を有する 3 径間連続橋とし，固有周期は，約 1 秒である．固有値解析時のゴム支承の剛性は，常温時で行われた 175%の予備載荷で得られた支承の履歴特性で同定したものとした．

数値解析上では，基部固定の2質点（上部構造，橋脚）系のばねマスモデルでモデル化し，免震支承は実験供試体の荷重-変位関係とリンクさせた非線形ばね要素，橋脚は線形ばね要素でモデル化した．入力地震動は道示の標準加速度波形II-II-1とし，支承の面圧は6MPaとした．

本実験では，想定した実構造物と相似則(1/6)である供試体モデルを用い，供試体の水平荷重をリアルタイムで実構造物の応答解析にフィードバックして行った．なお，この方法では変位と速度は 1/6 に縮小されるが，支承高も 1/6 になるため，支承のせん断ひずみ速度は実物と一致する．支承および周辺の設定温度は，前述したように，23℃，0℃，-20℃の 3 パターンとした．また，載荷速度の影響が考察できるよう，別の実験シリーズで実施した仮動的載荷実験（10mm/s で載荷）の結果も併記した．

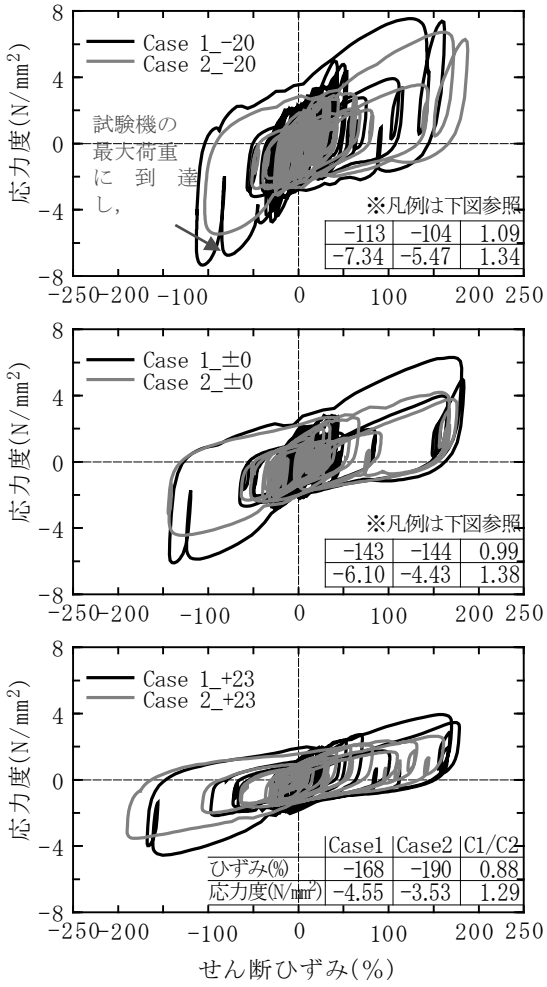


図-10　初期載荷の影響比較

(2)Mullins効果による地震応答の影響

図-10 に，初期載荷が履歴ループに及ぼす影響を，設定温度ごとに示す．なお，図右下の各ケースの最大応力度と最大ひずみは，負側の応答値に着目しており，後述する**図-11** と**図-12** も同様である．これは，正側及び負側の最大応力度が生じるループは，いずれのケースも負側の応答が先に生じるため，正側最大ひずみは直前に生じた負側最大ひずみの影響を大きく受けるためである．

図に示したように，Case1_-20では，載荷荷重が大きくなったことで実験装置の最大荷重に達し，負側最大応答が生じ前に一時的に除荷されてしまったことを注記するが，全体的な傾向としては，いずれの設定温度においてもCase1にはMullins効果が現れており，設定温度の低下に伴いMullins効果による等価剛性の増加程度も大きくなる傾向があった．具体的な等価剛性の増加程度は，(5)に示す．ただし，Case1_-20では前述した実験の一時中断により，最大応答を過小評価している可能性はある．

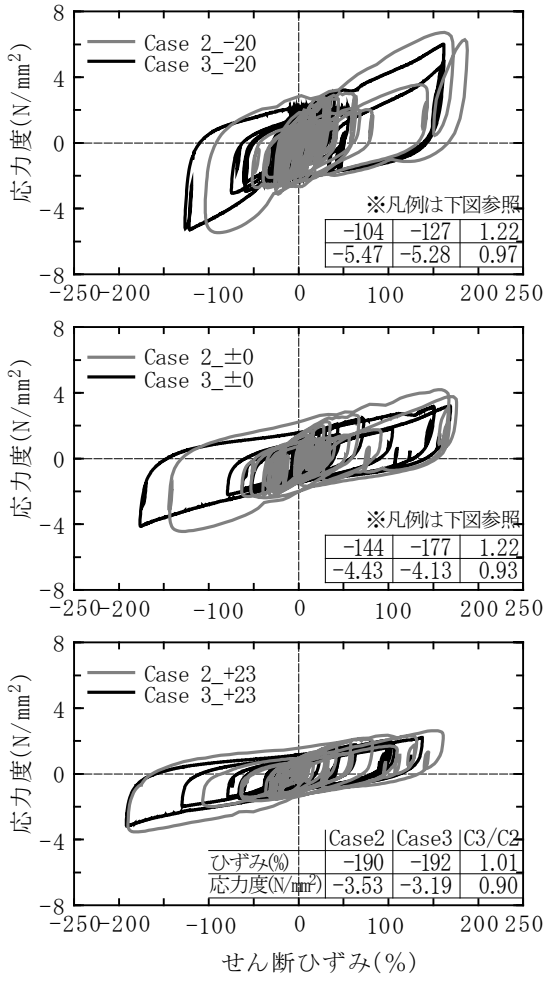


図-11　載荷速度の影響検比較

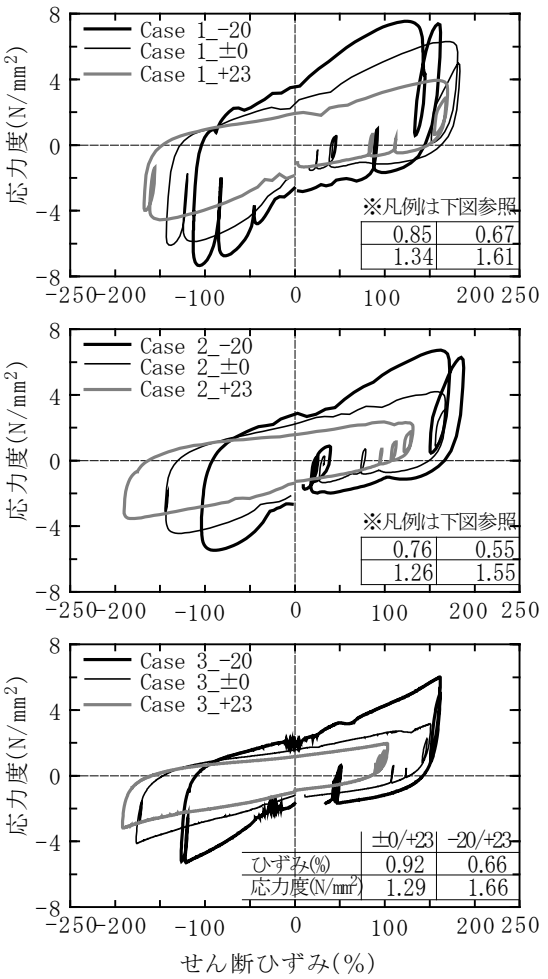


図-12　温度の影響比較（最大ループ）

(3)載荷速度による地震応答の影響

図-11に，載荷速度が履歴ループに及ぼす影響を，設定温度ごとに示す．いずれの設定温度時も実時間ハイブリッド載荷(case2)の方が応力度は増加，せん断ひずみは低下しており，せん断ひずみ速度の増加により等価剛性が大きくなったことがわかる．ただし，図-13に示す内部温度の上昇はCase2の方が大きく，既往の設定・内部温度とゴムのせん断剛性の関係と異なる結果となった．

今後詳細な比較検討が必要だが，両者とも最大ループ中の温度上昇が大きく，先に生じる負側最大応答時までの温度上昇では差が小さく，速度依存性の影響の方が大きく現れた可能性はある．

(4)履歴特性の温度依存性

図-12に，設定温度が最大ループに及ぼす影響を，ケースごとに示す．いずれも設定温度の低下に伴い応力度の増加とせん断ひずみの低下の傾向があり，応力度では，-20℃時は+23℃時に対して6割程度増加した．また，-20℃時にはせん断ひずみが小さい段階からハードニングに類似した挙動が確認された．

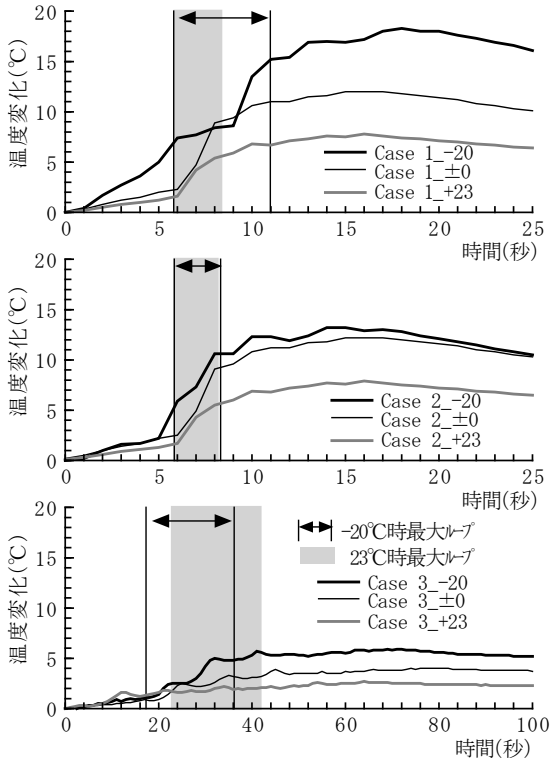


図-13　内部温度の上昇

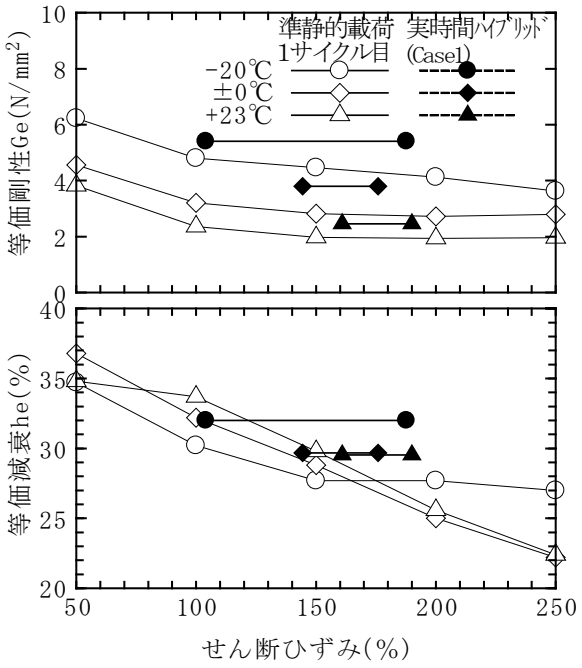


図-14 等価剛性と等価減衰（初期載荷時）

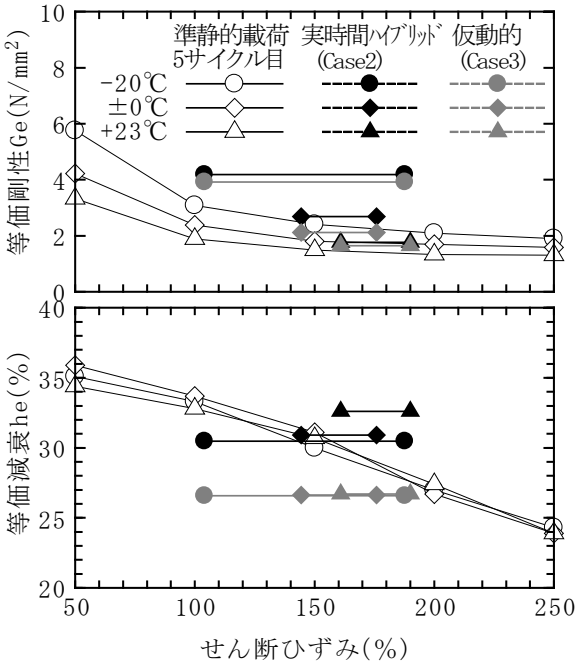


図-15 等価剛性と等価減衰（2度目以降）

(5)等価剛性と等価減衰

最大ループ時の等価剛性と等価減衰の関係について，初期載荷と 2 回目以降に分けて整理したものを，**図-14** と**図-15** に示す．比較のため，準静的載荷実験結果も併記した．ハイブリッド実験結果は，各載荷の最大ループ時の正側と負側のせん断ひずみをプロットしたため，せん断ひずみは幅を有する．

等価剛性は，初期載荷および2度目以降の傾向は同様で，実時間ハイブリッド実験結果は，準静的載荷実験結果に比べて1割～2割程度大きい．また，その増加率は，初期載荷の場合は温度の違いによる差は小さいが，2回目以降では差が大きく，低温時の増加率がより高い結果となった．なお，**図-15**をみると，実時間ハイブリッドと実験と仮動的実験では，等価剛性には大きな差は現れていない．

等価減衰は，実時間ハイブリッド実験結果と準静的載荷実験結果を比較して，同等か若干前者が大きいことがわかる．温度の違いによる影響は，初期載荷時と2回目以降で傾向が異なり，その要因については今後詳細に調査が必要である．また，等価剛性の傾向と異なり，等価減衰では実時間ハイブリッド実験と仮動的実験では傾向に差が生じ，実時間ハイブリッド実験の方がより大きな減衰が得られる結果となった．これは，**図-12**にも見られたように，実時間ハイブリッド実験の履歴は丸みを帯びたループであったのに対し，仮動的実験では全体的にシャープな履歴で且つ最大ひずみ付近でハードニングが生じているためである．

4. まとめ

低温環境下でのSPR-S支承の性能を把握するための載荷実験より，以下のことが確認できた．

- 低温環境下において免震支承の等価剛性が大きくなる傾向は，これまでの既往の研究と同様の結果であり，これは初期載荷や2回目以降の載荷にかかわらず生じた．
- 低温環境下における実時間ハイブリッド実験では，等価剛性の増加に伴い発生するせん断ひずみは低減した．具体的には，発生応力度は＋23℃に対して±0℃は1.3倍程度，-20℃は1.6倍程度増加したが，発生せん断ひずみは，±0℃時は0.8程度，-23℃時は0.6程度に低下した．
- 等価剛性に及ぼす低温の影響は，準静的・動的ともに大きく表れ，±0℃や-20℃の低温下では+23℃時に比べて1.5倍程度または2倍程度と増加した．
- 等価減衰に及ぼす低温の影響は，初期載荷時の-20℃時のように詳細に検討が必要な応答もあるが，全体的には低温による影響は小さいと言えた．

参考文献

1) 奥井義昭ら：自己発熱を考慮した高減衰ゴム支承の温度依存特性，土木学会論文集 A1,Vol73, No1,2017
2) 斎藤剛彦ら：高減衰ゴム支承のひずみ量と面圧の違いによる温度依存性の実験的研究,土木学会論文集 A1(構造・地震工学),Vol.76,NO.4,Ⅰ_507-Ⅰ-515.2020
3) 寺地慶造ら：スプリング拘束型鉛プラグ入り高減衰積層ゴム支承の低温時ハイブリッド実験，2021,第 76 回年次学術講演会