高力ボルト摩擦接合部を有する架構の地震応答解析

第2報 エネルギー応答に関する考察

正会員 金 多 潔*
正会員 西 澤 英 和**

1. 序

前報 (I) では、高力ボルト摩擦接合部を有する鉄骨架構のオンライン地震応答載荷実験の結果について論じた。(文献1)

本報では前報に引き続き、主としてエネルギー的な観点から、同架構の応答性状について考察を加える。

1930年代の前半、棚橋は“速度ポテンシャル理論”と称せられる、耐震工学上、極めて先駆的な研究を展開し、地震の入力エネルギーについて論ずるとともに、架構部材の靱性の重要性を指摘し、さらに不静定架構の水平荷重時の終局耐力や部材の履歴性状に関しても重要な研究を行って、今日の極限耐震設計の基礎を築いたことはよく知られている。(例えば文献2~4)

一方、1950年代になり、Housnerも同様の観点から一連の研究を報告している。Housnerは地震動を受けて塑性変形したボルトに注目し、この塑性変形は地震の入力エネルギーから弾性エネルギーを除いたエネルギーと強い相関のあることを指摘し、さらに入力エネルギーは、最大速度スペクトルと直接結びつけられると仮定して、Housner spectrumを提唱した。(文献5,6)

その後、1970年代にはいり、加藤、秋山等は、地震動によって投入される総エネルギー量は、構造物の強度、変形性状にあまり依存しないこと、および多層骨組の塑性歪エネルギー分布は、各層の強度分布に支配されることなどを示した上で、構造物の損傷に寄与するエネルギーと骨組のエネルギー吸収能力を対比させることにより、終局強度に基づく耐震設計法を行うことができるとしている。(文献7,8) その後、入力エネルギーが構造物の復元力特性に関係なく比較安定していることや、この値が、固有周期によらずほぼ一定値をとる速度スペクトルから評価しうるなどから、終局的な耐震設計の基準値をエネルギーの次元で設定しようとする試みが、数多くなされるようになった。(文献9,10)

しかしながら、これらの結果の多くはbi-linearやslip系など現象論的な履歴法則に基づく数値シミュレーションによって導かれたものであるため、架構部材の動的破壊試験による、実験面からの検証が今後の重要な課題として残されている。特に架構の終局的な耐震安全性を評価するためには、エネルギー吸収能力の限界や破壊性状などの部材の力学性状や材料特性との関連が深い。オンライン地震応答載荷実験法は、復元力特性のモデル化を前提としないことや、実部材の破壊試験が行えることなどの点で、方法論としてのメリットが大きい。

このような基本的な立場から、本報は高力ボルト摩擦接合部を有する鉄骨架構のオンライン実験の結果に着目して、エネルギー的な観点から考察を加えるものである。

なお、従来の研究では地震の全継続時間における総入力エネルギーや総履歴吸収エネルギーに着目したものが多く、本研究では、実地震下のエネルギー応答の大勢は、主要動近傍の極めて短時間の間に決定されるという点に注目し、主要動付近における衝撃的なエネルギー入力の問題について詳細な検討を加えることにした。

2. 地震時のエネルギー応答について

2.1 入力エネルギーの評価

文献(7)にしたがい、外乱 $\ddot{y}$ を受ける1自由度系の振動方程式(1)に対し、地動の終了時刻 T までの単位質量当たりのエネルギーを以下のように定義する。

$$\ddot{x} + 2h\omega\dot{x} + R(x) = -\ddot{y} \cdots \cdots (1)$$

$$W_k = \int_0^T \dot{x} \cdot \dot{x} dt \cdots \cdots (2)$$

$$W_h = \int_0^T 2h\omega\dot{x}^2 dt \cdots \cdots (3)$$

$$W_s = \int_0^T R(x) \cdot \dot{x} dt \cdots \cdots (4)$$

$$W_i = \int_0^T -\ddot{y} \cdot \dot{x} dt \cdots \cdots (5)$$

ここに W_k は地震終了時の運動エネルギー、 W_h は粘性減衰による総消費エネルギー、 W_s は総歪エネルギー W_p と地震終了時の弾性歪エネルギー、 W_i は総入力エネルギーである。

2.2 エネルギーの時刻歴応答について

* 京都大学 教授・工博

** 京都大学 助手・工博

(昭和58年11月4日原稿受理日、昭和59年7月13日改訂原稿受理日、討論期限昭和60年3月末日)

解析に用いた架構の詳細は前報1と同様である。入力地震波は *El Centro* 1940 (NS) および十勝沖 (八戸港湾) 1968 (NS) で、以後それぞれ *El Centro* NS および十勝 NS と称する。

高力ボルト摩擦接合継手の迂り発生が、モデル架構のエネルギー応答に及ぼす影響を検討するために、オンライン実験で得られた応答の時刻歴に (2)~(5) 式を適用して、各エネルギーの時刻歴を計算した。

固有周期 $T_0=1.0$ 秒の架構の *El Centro* NS, $I=2.5 A_r$ (ただし I ; 入力レベル, A_r ; 降伏加速度) に対する結果を図 1.a に示す。最上段は入力加速度の時刻歴、中段は対応する入力エネルギー、下段は歪エネルギーの累積過程で、図中の破線は主迂り発生材、実線は未発生材の結果である。また、対応する履歴曲線を図 1.b に示す。

図 1.a にも明らかなように、エネルギーの時刻歴の応答には以下の一般的傾向が認められた。

1) 主迂りが発生すると、地震時の総入力エネルギーは 10~20 % 減少する。この差異は主として主要動近傍でのエネルギー吸収能力の変化に起因すると考えられる。

2) 実地震時の入力エネルギーの累積過程は、極めて非定常性が強く、その大半は、主要動近傍の数秒以内に

図 1.a エネルギーの時刻歴

図 1.b 架構の復元力特性の比較

投入されている。図 1 の例では、20.48 秒間の全入力エネルギー W_i の内の 80 % は初期の 4.5 秒間に入力されたものである。

2.3 迂り発生に伴う総入力エネルギーの変化について

継手の迂りが、架構の総入力エネルギー量に及ぼす影響について検討するため、迂り発生材と未発生材における W_i , W_p および W_h の値を計算した。1 例を図 2 に示す。図 2 は、 $T_0=1.0$ 秒の系列の結果である。この実験では、同一の供試体に対し、 $I=1.0 A_r \rightarrow 1.5 A_r \rightarrow 2.0 A_r \rightarrow 2.5 A_r$ と入力加速度強度 I を順次増加させてオンライン実験を 4 回行ったが、主迂りの発生が認められなかったため、 $I=2.5 A_r$ の条件で載荷を続行した所、 $I=2.5 A_r$ の 3 回目で主迂りが発生した。主迂り発生後は、図 1.b のように、復元力特性は明瞭に変化したので、迂りによるエネルギー吸収量の差を調べるため、さらに 2 回の載荷を行っている。図 2 の棒グラフの白地の部分は、粘性による消費エネルギー W_h 、ハッチ部は履歴消費エネルギー W_p である。また、下段の図は前報の表 7 の条件による bi-linear 系の数値計算の結果を示している。

図より以下の傾向が指摘される。

1) オンライン実験による W_i , W_p の値は、下段の数値解析値とほぼ一致しており、bi-linear モデルによって実験の傾向を大略把握することが可能である。

2) 主迂りの発生に伴って、 W_i の値は 10~20 % 減少する傾向が認められる。

図 2 迂り発生に伴う総入力エネルギーの変化

3. 速度応答スペクトルとエネルギー応答

本節では地震の全継続時間における総入力エネルギー W_i と、架構の応答速度との関係について検討する。

3.1 オンライン地震応答載荷実験での最大応答速度

オンライン実験で得られた最大速度と、弾性系および bi-linear 系での最大速度との関係を示したものが、図 3 である。図中 4 本の細線は、*El Centro NS* 波に対し入力レベル I を 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 A_v と変化した時の、bi-linear 系の速度応答スペクトルで、太線はオンライン実験で得られた 15 系列の標本点をつないだものである。(黒く塗りつぶした点は主たる発生材を示す。) また、曲線 A, B は、各々 $I=2.0 A_v$, $1.0 A_v$ に対する弾性系の速度応答スペクトル S_v を比較のために示したものである。

$T_0=0.8\sim 1.0$ 秒の長周期領域では、入力レベル I によらず、bi-linear 系の応答と弾性系の応答の差は小さいが、短周期領域 ($T_0=0.4\sim 0.6$ 秒) では、入力レベル I が増加するほど、両系の差が増大する傾向を示し、弾性系の応答は、オンライン実験に比して過大な評価を与えている。これに対し、bi-linear 系での最大速度応答は、オンライン実験での値の良好な近似解となっている。

3.2 最大速度と総入力エネルギー、総歪エネルギー

既往の研究では、総入力エネルギーの平方根値と最大速度応答の間に比例関係が成立することを指摘したものが多く、この点をオンライン実験結果について検討したものが図 4, 5 である。各図の縦軸は、総入力エネ

図3 最大速度応答値の比較

ギー W_i および総歪エネルギー W_p の平方根値で、横軸は、オンライン実験で実測された最大速度応答 V_{max} を示している。(図中黒塗りの点は主たる発生材に対応している。) 実験点は、*El Centro NS* および十勝沖 NS の結果を含んでいるが、図より明らかなように、総

図4 最大速度応答の実測値と総入力エネルギーの関係

図5 最大速度応答の実測値と総歪エネルギーの関係

入力エネルギー W_i および総歪エネルギー W_p の平方根値と最大速度 $V_{\max}$ との間には、以式で示されるような明瞭な線型関係が認められる。

$$\begin{cases} \sqrt{W_i} = 2.42 V_{\max} - 59.2 \cdots \cdots \cdots (6) \\ \sqrt{W_p} = 2.39 V_{\max} - 72.4 \cdots \cdots \cdots (7) \end{cases}$$

しかしながら、図中の黒塗りの点の分布から分るように、総入力エネルギー W_i および総歪エネルギー W_p 、あるいは実験で得られた最大速度 $V_{\max}$ と、り発生の有無との間には明確な相関性は認められない。すなわち $V_{\max}$ 値が小さくともりを生ずる場合もあれば、その逆の場合も存在する。

通常、高力ボルト摩擦接合部のり発生の有無は、接合部に作用する荷重が、り荷重に達するかどうかによって判別しうることを考慮すれば、架構の速度応答の大きさと、り発生の有無とが必ずしも関係しないのは当然とも言えるが、今回のオンライン実験の結果もこの傾向を裏付けている。

3.3 最大靱性率応答と総入力エネルギー

オンライン実験で得られた最大応答変位を δ 、モデルの降伏変位を δ_y とする。

最大靱性率応答 (δ/δ_y) と総入力エネルギーの平方根の値 ($\sqrt{W_i}$) との関係をプロットしたものが図6である。図中の黒塗りの点は、り発生材に対応する。オンライン実験で得られた (δ/δ_y) の値は2~6であるが、この範囲での $\sqrt{W_i}$ の値のバラツキは大きく、明瞭な相関性は認められない。この原因として、実験での応答変位は、り発生時の偶発性によって、応答変位のドリフト

図6 最大変位応答の実測値と総入力エネルギーの関係

の傾向が異なることが指摘される。

4. 瞬間損傷エネルギーについて

4.1 実地震応答におけるエネルギー入力性状

2.2 節エネルギーの時刻歴応答でも指摘したように、実地震時の架構への入力エネルギーは、全継続時間にわたって定常的に累積していくのではなく、主要動近傍の極めて短時間の間に、大量のエネルギーが衝撃的に投入される点に著しい特色があり、それ以外の応答過程では繰り返し回数が多いために拘らず、概して入力エネルギーの累積は緩慢である。

代表的な例を図7に示す。この図は、十勝沖 NS 波 (入力レベル 1.5 A_v) に対する $T_0=0.6$ 秒の架構のオンライン実験結果である。本例では矢印で示した時刻 ($t=8.24$ 秒) で最大応答速度を生じた後、約 0.3 秒後に最大変位応答を経験している。一方この間の入力エネルギーおよび歪エネルギーの時刻歴を見ると、応答速度がピークを迎えた後の、約 0.3 秒間に総入力エネルギー W_i の約 20 % 近くが投入されており、歪エネルギーにおいては実に 45 % 近い急激なエネルギーが蓄積されており注目される (図中のハッチ部分)。このようなエネルギー累積曲線の大きな立ち上がりは、10.6 秒および 13.0 秒付近 (↑部) にも存在するが、その他の部分の応答は、繰り返し数が、はるかに多いにも拘らず、入力エネルギーや歪エネルギーの増加は僅かである。このことは、地震から架構に投入されるエネルギーは、定常的

図7 主要動近傍におけるエネルギー入力

な増加過程をたどるのではなく、主として主要動近傍で、衝撃的に入力される点で、極めて非定常性の強い現象であることを示している。

以上のような激しいエネルギー応答を評価するために次節で“瞬間損傷エネルギー”の概念を導出する。

4.2 瞬間損傷エネルギーの概念

(8) 式に示すような1自由度系の振動方程式を考える。

$$\ddot{x} + 2h\omega\dot{x} + R(x) = -\ddot{y} \quad (8)$$

この振動系が、図8に示すように、時刻 $t=t_1$ において、復元力図の X 軸上の A 点を、応答速度 v_1 で横断し、時刻 $t=t_2$ の B 点において変位が反転して除荷を開始するものとする。

この時間間隔 t_1 から t_2 までの応答の1/4サイクルにおけるエネルギー平衡を考えると(9)式が成立する。

$$\int_{t_1}^{t_2} \dot{x} \cdot \dot{x} dt + \int_{t_1}^{t_2} 2h\omega \dot{x}^2 dt + \int_{t_1}^{t_2} R(x) \dot{x} dt = - \int_{t_1}^{t_2} \ddot{y} \cdot \dot{x} dt \quad (9)$$

上式左辺第1項は、 $t_1 \sim t_2$ 間における運動エネルギーの変化 w_k 、第2項は粘性減衰による消費エネルギー w_h 、第3項は歪エネルギー w_s 、右辺は入力エネルギー w_i を示している。(全継続時間に対するエネルギー W と区別するため、小文字の w を用いる。)

(9) 式の積分において、左辺第1項 w_k は、 B 点の応答速度が0であるから、 A 点での速度 v_1 を用いて次式で評価できる。

$$w_k = -\frac{1}{2} v_1^2 \quad (10)$$

図8 瞬間損傷エネルギーの概念

(10) 式を(9)式に代入することによって(11)式が導かれる。

$$w_a = w_s + w_h = w_i + \frac{1}{2} v_1^2 \quad (11)$$

左辺の w_s と w_h の和 w_a を、全継続時間における累積損傷の概念と対比する意味で、以後“瞬間損傷エネルギー w_a ”と称する。以上の定義から明らかなように、瞬間損傷エネルギー w_a は、時刻 t_1 から t_2 に到る載荷経路に於て、一自由度の架構が保有すべき歪エネルギー w_s の上限値を与えるもので、(11)式より w_a の値は時刻 t_1 における応答速度 v_1 による運動エネルギー w_k と、ゼロクロス点 A を $t=t_1$ に横断してから時刻 t_2 で静止するまでの1/4ループの間に投入される入力エネルギー W_i の和で与えられる。

なお、Housner は、入力エネルギー E は、速度スペクトル値 S_v と直接結びつけられると仮定して(12)式を提示しているが、

$$E = \frac{1}{2} m S_v^2 \quad (m; \text{質量}) \quad (12)$$

(12) 式は、(11)式と対比して明らかなように、弾性系の瞬間損傷エネルギー w_a の内、入力エネルギー項 W_i を除く、運動エネルギー項 $w_k (= \frac{m}{2} v_1^2)$ を速度スペクトル S_v によって近似的に評価したものを見なすことができる。

4.3 瞬間損傷エネルギーの算出結果

瞬間損傷エネルギー w_a を算出するため、オンライン地震応答解析によって得られた時刻歴から、履歴ループのゼロクロス時刻 t_1 と反転時刻 t_2 の一連の値を求め、各区間ごとに(11)式を適用して W_i 、 w_k 、および w_a を計算した。

結果の一例を図9および図10に示す。図9は、 $T_0=1.0$ 秒、 $I=2.0 A_r$ 、図10は、 $T_0=0.4$ 秒、 $I=1.5 A_r$ の *El Centro NS* 波に対する結果である。図9.a、10.aの横軸は時刻で、縦軸は評価区間ごとの w_a の値である。

ただし、縦軸左側の座標は総入力エネルギー W_i に対する瞬間損傷エネルギー w_a の比率を示し、右側の座標は、 w_a を弾性限歪エネルギーで除した、降伏エネルギー比を示す。また w_a の内、ハッチ部分は、入力エネルギー項 w_i 、白地部は運動エネルギー項 w_k の割合を示している。ただし図中負側に示してある黒地の部分は、 w_i の値が負となる場合で、1/4ループの載荷経路で、入力加速度が、瞬間損傷エネルギーを減少させる方向に作用したことを意味している。

図9の応答例について具体的に検討を加える。

図9.aの場合、2.5秒近傍からのハッチ部で示す載荷経路での、 w_a の値(矢印A)は、地震の全継続時間(本例では20.48秒間)における、総入力エネルギー W_i の

a. 瞬間損傷エネルギーの時刻歴

b. 応答の時刻歴

c. 復元力特性

図9 瞬間損傷エネルギーの時刻歴

約 1/3 の大きさであり、その内の約 70 % は、復元力ループがゼロ点を横断してから、反転するまでの、僅か 0.28 秒間に投入された w_i によって占められている。

一方、4.2 秒付近からの w_a (矢印 B) では、その 90 % 近くは、ゼロ点を横断する時の初速度 v_i による運動エネルギー項 w_k である。

さらに、次の 4.6 秒近傍からのループ (矢印 C) では、入力加速度が系の応答変位を急激に抑制する方向に作用し、以後 12 秒前後までの振動はエネルギー応答にはほとんど寄与していない。

なお、大きな加速度振幅が一但収まる 6.0 秒までに、この系が、消費したエネルギーは、20.48 秒間の全継続時間に消費される総入力エネルギー W_i の 78 % に及んでおり、エネルギー応答の大勢は、系が定常的な振動を開始するまでに決まっている。

同様の傾向は、図 10 でも認められる。本例では、図 9 と異り、応答の時刻歴 (図 10. b) および復元力特性 (図 10. c) から明らかなように、矢印の位置で主応答が発生している。主応答発生時の载荷経路における w_a の値は、(矢印 A) 降伏エネルギー比で約 10 程度であり、 W_i の約 1/4 に相当する。またこの経路での w_a の 75 % は、この間に投入された w_i であり、初速度 v_i

a. 瞬間損傷エネルギーの時刻歴

b. 応答の時刻歴

c. 復元力特性

図10 瞬間損傷エネルギーの時刻歴

による w_k は 25 % を占めるにすぎない。

これに対し矢印 B では、A とは逆に入力加速度が系の w_a を抑制する方向に作用している。4~6 秒の間にも瞬間損傷エネルギーが比較的大きい領域が存在するが、それ以外の区間における振動は、入力エネルギーの累積は少ない。

なお、図 10 の例では、初期 6 秒までに W_i の 77 %、3 秒までに 42 % のエネルギーが投入されており、図 9 の場合と同様の傾向を示している。

以上のような瞬間損傷エネルギーの検討から以下の結論が得られる。

- 1) 架構の主要動近傍における激しいエネルギー応答やエネルギー吸収能力を評価する上で、瞬間損傷エネルギー w_a は有効な指標となる。
- 2) 主要動近傍での w_a の最大値は、全継続時間にわたる総入力エネルギー W_i の 1/2 に及ぶことがある。(補足参照)

このことは、地震時のエネルギー入力、瞬間的に衝撃力に近い形で行われることを示唆している。

- 3) 主要動近傍で架構に要求されるエネルギー吸収能力は、その系の応答速度 v_i による運動エネルギー w_k だけではなく、履歴ループのゼロクロス点からの 1/4 サ

イクルの間に地震波から投入される w_i に大きく依存する。

そのため、架構の必要エネルギー吸収能力を評価するためには、最大速度応答値のみでは不十分で、固有周期の $1/4$ 程度の極く短時間の間に投入される入力エネルギー w_i を重視する必要がある。特に、主要動近傍の大変形時の応答サイクルでは、 w_i が、 w_a を著しく増加させる方向に作用する場合が多い。

4.4 瞬間損傷エネルギー、総入力エネルギーと速度応答

瞬間損傷エネルギーおよび総入力エネルギーと速度応答との関係を調べるために、*El Centro* NS 波に対する 14 系列のオンライン結果について検討する。

4.4.1 W_i , w_a と S_v との関係

図 11 は、同一の固有周期と入力レベルの地震波に対する弾性系の速度スペクトル値 S_v と実験で得られた総入力エネルギー W_i および瞬間損傷エネルギー w_a の関係を示したもので、横軸は S_v (kine)、縦軸は $\sqrt{W_i}$ および $\sqrt{w_a}$ で定義される等価速度 (kine) である。

●印は $\sqrt{W_i}$ 、△は $\sqrt{w_a}$ であるが、両実験点は、 S_v に対して大略線型関係を満足しており、各々ほぼ原点を通る以下の式で記述される。

$$\sqrt{W_i} = 1.18 \cdot S_v - 44.2 \quad \cdots \cdots (13)$$

$$\sqrt{w_a} = 0.54 \cdot S_v - 16.4 \quad \cdots \cdots (14)$$

両者の勾配比は $1:2.2$ である。このことから、同一の S_v に対する系の w_a の値は、平均的には、 W_i の大略 $1/5$ となると推定される。

4.4.2 正規化された W_i , w_a , S_v との関係

図 11 総入力エネルギー、瞬間損傷エネルギーと弾性速度応答スペクトル

図 12 総入力エネルギー、瞬間損傷エネルギーと弾性速度応答スペクトル

図 11 を降伏速度 V_y 、および弾性限度エネルギー E_y で正規化して再プロットしたものが図 12 である。

総入力エネルギー W_i を E_y で正規化した総入力エネルギー ($\sqrt{W_i/E_y}$) と、正規化速度スペクトル (S_v/V_y) との間には明瞭な相関性は認められないが、瞬間損傷エネルギー w_a を、 E_y で無次元化して得られる ($\sqrt{w_a/E_y}$) 値と (S_v/V_y) との間には次式の線型関係が存在する。

$$\sqrt{w_a/E_y} = 0.24 \cdot (S_v/V_y) + 1.09 \quad \cdots \cdots (15)$$

4.4.3 正規化 W_i , w_a と V_{max} との関係

図 4 では、オンライン実験で得られた最大速度応答

図 13 総入力エネルギー、瞬間損傷エネルギーと実測降伏速度比

$V_{\max}$ と、総入力エネルギー W_I との関係を示したが、図 13 では、弾性限歪エネルギー E_Y および降伏速度 V_Y で除した、正規化総入力エネルギー $(\sqrt{W_I/E_Y})$ および正規化瞬間損傷エネルギー $(\sqrt{w_d/E_Y})$ と正規化最大速度 $V_{\max}/V_Y$ の関係を示す。

この図より $\sqrt{W_I/E_Y}$ と $(V_{\max}/V_Y)$ および $(\sqrt{w_d/E_Y})$ と $(V_{\max}/V_Y)$ との間には、次のような関係が成立する。

$$\begin{cases} \sqrt{W_I/E_Y} = 4.00 \cdot (V_{\max}/V_Y) - 7.20 \cdots \cdots (16) \\ \sqrt{w_d/E_Y} = 1.16 \cdot (V_{\max}/V_Y) - 1.06 \cdots \cdots (17) \end{cases}$$

4.5 瞬間損傷エネルギーと最大靱性率応答

瞬間損傷エネルギー w_d は、図 8 の定義から明らかなように、履歴ループの原点からの載荷経路に対して定義されたものではない。従って w_d の最大値を与える経路が必ずしも、最大応答変位を生じるループに対応するとは限らない。

さらに、実地震では応答変位が一方にドリフトする場合もあるため、同じく w_d が最大となる経路から定まる変位によって、全継続時間における最大変位を予測しうるとも限らない。

しかしながら、一般的傾向として w_d の最大値は地動の初期の主要動近傍で生ずることが多く、また、応答変位の最大値も主要動近傍で経験することが少くないので、瞬間損傷エネルギーと最大靱性率応答との関係を検討することは興味深い。

瞬間損傷エネルギー w_d は、粘性項 w_h と歪エネルギー項 w_s の和であるが、 w_h を無視し、 w_d を一方載荷時の歪エネルギーと等置し、復元力特性を完全弾塑性と仮定することにより、 w_d に対する等価靱性率 μ_d を次式によって計算する。

$$\mu_d = \left(\frac{w_d}{E_Y} + 1 \right) / 2 \cdots \cdots (18)$$

El Centro NS 波を用いたオンライン実験で得られ

図 14 総入力エネルギー、瞬間損傷エネルギーと実測靱性率応答

た最大実測靱性率応答 μ と (w_d/E_Y) および (18) 式で算定された μ_d の関係をプロットしたものが図 14 である。

この図より、 (w_d/E_Y) と μ 、および w_d と μ との間には以下の関係が導かれる。

$$w_d/E_Y = 1.98 \mu - 1.07 \cdots \cdots (19)$$

$$\mu_d = 1.00 \mu - 0.08 \cdots \cdots (20)$$

(20) 式が原点を通る勾配がほぼ 1 の直線になることより、 w_d または (18) 式で換算される μ_d によって、架構の最大靱性率応答を推定しうることがわかる。

5. 結 論

高力ボルト摩擦接合継手を有する梁崩壊型一層鉄骨架構モデルのオンライン地震応答載荷実験に対し、エネルギー応答の観点から考察を加えた。得られた結論は以下に列挙する通りである。

i) 地震時の総入力エネルギー W_I は、ボルトの迂りに伴う復元力特性の変化にはあまり影響されない安定した量であり、その平方根値は架構の最大応答速度 $V_{\max}$ と良好な線型関係が成立する。

ii) 総入力エネルギー W_I と実測最大応答変位 μ との間には良好な線型関係は成立しなかった。

iii) 地震時の入力エネルギーは全継続時間にわたって定常的に投入されるのではなく、主として主要動近傍において大半のエネルギーが入力される点に特色があり、その他の応答過程では入力エネルギーの供給は僅かである。

iv) 主要動付近の激しいエネルギー応答を評価する上で、瞬間損傷エネルギー w_d は有効なパラメータとなる。

v) w_d の最大値は、速度応答スペクトル S_v 、実測最大応答速度 $V_{\max}$ 、最大靱性率応答 μ のいずれに対して明瞭な相関性が認められた。(図 15 参照) すなわち実験点を整理すると下式が得られた。

図 15 総入力エネルギーと瞬間損傷エネルギーとの関係

$$\sqrt{w_a} = 0.54 \cdot S_v - 16.4 \cdots \cdots (14)$$

$$\sqrt{w_a/E_v} = 0.24 \cdot (S_v/V_v) + 1.09 \cdots \cdots (15)$$

$$\sqrt{w_a/E_v} = 1.16 \cdot (V_{\max}/V_v) - 1.06 \cdots \cdots (17)$$

$$(w_a/E_v) = 1.98 \mu - 1.07 \cdots \cdots (19)$$

6. 結 語

今日、極限耐震設計の手法としては、総入力エネルギーや累積塑性変形能力など、地震の全継続時間に対する、エネルギー応答の総量によって、耐震安全性を判定するアプローチが種々提案されている。

しかしながら、地震外乱下におけるエネルギー応答は非定常性が極めて強い点に注意する必要がある。すなわち、通常、地震時の入力エネルギーの累積曲線は、継続時間にわたって単調に増加するのではなく、主要動近傍の数ヶ所で、急峻な立ち上がりを伴って増加する場合が多く、また、この間の入力エネルギーのギャップが架構に要求される塑性変形能力や必要エネルギー吸収性能を支配すると考えられる。

極限耐震設計において、設計の指標を何に設定すべきかは架構の種別や材料によって様々であるが、少なくとも、全継続時間にわたって架構が十分なエネルギー吸収能力を保持しうるためには、その前提として地震の初期の瞬間的なエネルギー入力に耐えうるだけのエネルギー吸収能力、あるいは変形能力を架構に付与する必要があるが、このような急激なエネルギー入力は、瞬間損傷エネルギーの概念を用いることによって、合理的に評価しうる事が可能になると考えられる。

本報では主として *El Centro NS* 波を用いたが、他の構造部材や地震波に対する詳細な検討は今後の研究に期したいと思う。

謝辞

本研究を遂行するに当って、実験や解析に従事された清水建設(株)今木繁行氏(当時大学院生)に謝意を表します。

参考文献

- 1) 金多 潔, 西澤英和, 今木繁行: 高力ボルト摩擦接合継手を有する架構の地震応答解析(その1), 日本建築学会

論文報告集, 第330号, pp.78~85, 昭和58年8月

- 2) 棚橋 諒: 材料の靱性による構造物の耐震的終局強度の高められに関して, 建築学研究, 第13輯第73号, 昭和9年7月
- 3) 棚橋 諒: 地震の破壊力と建築物の耐震力に関する私見, 建築雑誌第48輯, 第599号, 昭和10年5月
- 4) 棚橋 諒: 耐震安全率の問題, 建築学会論文集第1号, 大会号, 昭和11年3月
- 5) G. W. Housner: Limit design of structures to resist earthquakes, Proc. WCEE, Berkeley California 1956
- 6) G. W. Housner: Behavior of structures during earthquakes, J. of. ASCE, EM4, pp.109~129, Oct. 1959
- 7) 加藤 勉, 秋山 宏: 強震による構造物へのエネルギー入力と損傷, 日本建築学会論文報告集, 第235号, pp.9~18, 昭和50年9月
- 8) 加藤 勉, 秋山 宏: 地震時におけるせん断型多層骨組の損傷分布則, 日本建築学会論文報告集, 第270号, pp.61~68, 昭和53年8月
- 9) 安藤範平, 手塚武仁, 峯岸 茂: 地震時に構造物が消費するエネルギーについて(その1, 2, 3), 日本建築学会大会学術講演梗概(中国) pp.691~696, 昭和52年10月
- 10) 五十嵐定義, 小川厚治: 鋼構造骨組の耐震設計用動力学モデルに関する研究(1, 2), 日本建築学会論文報告集, 第268号(昭和53年6月), 第284号(昭和54年10月)

補足

w_a の値が, W_t の値の1/2以上に及ぶ例として, 図16に *El Centro NS* ($I=1.0 A_v$), $T_0=1.0$ 秒の応答を示す。本例では w_a の最大値は W_t の59.2%であった。

図16 応答と瞬間損傷エネルギーの時刻歴

SYNOPSIS

UDC : 624.078.2 : 624.042.7 : 620.1

EARTHQUAKE RESPONSE ANALYSIS OF STEEL FRAMES WITH HIGH STRENGTH BOLTED CONNECTIONS

Part 2 On the energy response

by Dr. **KIYOSHI KANETA**, Prof. of Kyoto Univ., and
HIDEKAZU NISHIZAWA, Assistant of Kyoto Univ.,
Members of A.I.J

In this paper, the authors have dealt with the energy response of steel structures subjected to a severe earthquake and have proposed a concept of instantaneous damage energy w_d .

It is shown that the w_d value is advantageous in evaluating the nonstationary energy input of intense earthquake, and has a good correlation with parameters such as the maximum velocity and the maximum ductility.