井上一郎氏の討論に対する回答

THE AUTHORS' ANSWER TO DISCUSSION BY DR. KAZUO INOUE

(Kazuo INOUE, J. Struct. Constr. Eng., AIJ, No. 511, 169-170, Sep. 1998)

桑村 仁*, 伊山 潤**, 竹田 拓也***

Hitoshi KUWAMURA, Jun IYAMA and Takuya TAKEDA

The discussion is focused on the definition of energy input rate and the relationships between energy input rate and yield strength. First, Dr. Inoue proposed that energy input rate should not include an elastic component, because the elastic component is charged during the preceding cycle. However, the authors still insist that the energy input rate should include the elastic component from the viewpoint of earthquake load effect to structures which can be applied consistently to structures of poor to rich ductility. The energy input rate of Inoue's definition converges to zero for non-ductile linear-like systems which will cause an awful procedure in design. Second, Dr. Inoue stated that the energy input rate excluding the elastic component is regardless of system's yield strength. His statement obviously violates the theory of displacement conservation. The authors demonstrated that the energy input rate, even though the elastic component is excluded, is not constant but is influenced by the yield strength.

Keywords: earthquake load, energy input rate

地震荷重, エネルギー入力率

エネルギー入力率に関する筆者らの論文¹⁾に対してご意見を頂きありがとうございました。今後発展が期待されるエネルギー入力率を用いた耐震設計の研究に重要な一石を投じるものと思います。以下、ご質問の2点についてお答えいたします。

1. エネルギー入力率の定義について

「エネルギー入力率に弾性成分を含めるべきでない」というご指摘ですが、筆者らは「含めたほうがよい」と考えています。そのもっとも大きな理由は、弾性系と非弾性系への荷重効果の連続性を保つためです。図-1(b)のようにエネルギー入力率に弾性成分を含めないと、系の降伏せん断力係数 α が弾性最大応答せん断力係数 α_e に達した途端に、エネルギー入力率がゼロになってしまうという不自然なことが生じるからです。弾性系へのエネルギー入力率がゼロであるというのは、靱性の乏しい構造物にエネルギー入力率がそのままでは適用しにくくなるという事態を招きます。

ご指摘のように、最大エネルギー入力率が発生するときの出発点(図-1(a)の t_1 点)で、系は一般に速度を持っています。これに相当する運動エネルギーはそれ以前の入力によってもたらされたものであるから除くべきであるという入力に立脚した考え方も有りうとは思いますが、構造物への荷重効果の観点からは、弾性成分を含め

たほうが好都合で、図の t_1 点から t_2 点までのエネルギー入力率という荷重効果に対して構造物が耐えられるか否かが安全性の規範になると考えます²⁾。

2. エネルギー入力率と降伏耐力の関係

「弾性成分を含まないエネルギー入力率は降伏耐力にあまり影響されない」ということを文献³⁾を引用して主張されていますが、もし、それが正しいとすると1960年頃から経験的に知られ今も利用さ

図-1 エネルギー入力率の二つの定義

* 東京大学工学部総合試験所 助教授・Ph. D.

** 東京大学工学部総合試験所 助手・修士(工学)

*** 東京大学 大学院生(現三井建設)・修士(工学)

Assoc. Prof., Eng. Res. Inst., School of Eng., the Univ. of Tokyo, Ph. D.
Res. Assoc., Eng. Res. Inst., School of Eng., the Univ. of Tokyo, M. Eng.
Grad. Student of the Univ. of Tokyo (now, Mitsui Const. Co.), M. Eng.

図-2 エネルギー入力率に及ぼす降伏耐力の影響

れている変位一定説を覆すことになります。例えば、質量と弾性バネ定数は共通で降伏せん断力係数が α と 2α の2つの完全弾塑性1質点系（系1と系2）を考えてみます。上の主張が正しいとすると、系1と系2の最大変位応答 δ_1 と δ_2 は次のようになります。

$$\delta_1 = \delta_y + \delta_p \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\delta_2 = 2\delta_y + \frac{1}{2}\delta_p \quad \dots\dots\dots (2)$$

上式中の δ_y と δ_p は系1の降伏変形と塑性変形です。両者の比をとると、

$$\frac{\delta_2}{\delta_1} = \frac{2+\eta/2}{1+\eta} = 1 + \frac{1-\eta/2}{1+\eta} \quad \dots\dots\dots (3)$$

となり、これは常に1ではなく η ($=\delta_p/\delta_y$) に依存することになります。 η は α の影響を受けますから、結局、最大変位応答が α の影響を受けることとなり、変位一定説を否定することになります。

念のため、筆者らが当該論文¹⁾で用いた5種類の地震入力波を用いて、完全弾塑性1質点系 ($m=1 \text{ tonf} \cdot \text{sec}^2/\text{cm}$) へのエネルギー入力率を弾性成分を含む場合 $\Delta E_{\max}$ と含まない場合 $\Delta E_{p,\max}$ (討論の $\bar{\Delta E}_{\max}$ と同じ) を図-2に示します。これを見ると、 $\alpha/\alpha_e \rightarrow 1$ では $\Delta E_{p,\max} \rightarrow 0$ となってしまいますが、弾性成分を含む $\Delta E_{\max}$ は比例的に増大します。 $\alpha/\alpha_e \leq 0.5$ 程度では $\Delta E_{p,\max}$ も α の増大とともに増加する傾向を示し、決して一定ではありません。したがって、批判の対象となった「崩壊までの荷重-変形カーブの囲む面積が同じ構造物でも、強度の高いほうが大きなエネルギー入力率を被るので倒壊しやすい¹⁾」ということとはやはり肯定されます。

なお、ご教示いただいた小川らの論文³⁾には、「弾性成分を含まないエネルギー入力率は降伏耐力にあまり影響されない」ということを直接対象とした論考は見当たりません。ただ、同論文の図-1では、研究の目的が異なるため明瞭な図示はされていませんが、 α が

大きくなると（同論文では η が小さくなると）、やはり $\Delta E_{p,\max}$ が増加する傾向が見られます。

3. 結び

荷重効果としてのエネルギー入力率は地震が構造物に与える動力学的な影響に基づいて定義することが大切です。強度は低くても大きな塑性変形能力を保有している構造物もあれば、逆に、強度は高いものの変形能力の乏しい構造物もあり、それらに一貫して適用できる荷重効果として定義するには、エネルギー入力率に弾性成分を含める必要があります。

1960年頃から多くの応答解析を通じて経験的に知られている変位一定説に基づく、エネルギー入力率が構造物の降伏耐力の増加に伴って増大するということになり、その傾向は応答解析からも再確認されました。

参考文献

- 1) 桑村仁, 伊山潤, 竹田拓也: 地震動のエネルギー入力率スペクトルの特性 —変位一定説とエネルギー一定説の調和—, 日本建築学会構造系論文集, No. 498, pp. 37-42, 1997. 8
- 2) 桑村仁: 地震動のいかなる特性が構造物に被害をもたらすのか—鉄骨構造の場合—, 日本建築学会『強震記録と設計用地震動との関係』公開シンポジウム, pp. 129-136, 1997. 12
- 3) 小川厚治, 黒羽啓明, 待鳥賢治: 強震をうける1自由度系の正負2方向の損傷分布に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No. 481, pp. 117-126, 1996. 3

(1998年4月27日原稿受理, 1998年4月28日採用決定)