

—昨年1月17日、兵庫県南部地震の発生から早や2年が過ぎた。土木構造物や建築構造物のあのすさまじい破壊を目の当たりにしたとき、わが国の構造物の設計基準は欧米に比べてtoo conservative と一方的に思っていた私にとって、こんな破壊が本当に起こるのだろうか？ 夢でも見ているのではないだろうか？ と自分を疑い、そして一体どんな力が加わったらこんな破壊が発生するのか？これが本当ならば、土木構造工学を専門とする自分は一体いままで何を理解し、何を学生に教えてきたのか？突然頭から大きな石でなぐられた思いであり、まさにショックであった。

あれから2年、膨大な調査と議論があり、昨年末には道路橋示方書（耐震設計編）も改正されるに至っている。しかしながら、いま、あの時の被災構造物の写真を眺め直してみると、自然力のすさまじさには依然として畏怖の念を禁じ得なく、とても制御できる代物とは思えそうにない。

1. 阪神・淡路大震災からの教訓

(1) 地盤に支えられた構造システムとしてのバランスの取れた設計の必要性

高架橋を例にとると、橋脚の柱部および支承の被害が目立った。なぜ、上部工や基礎工に比べて橋脚や支承に被害が集中したのか？それは橋脚や支承が他の部位より弱かったからである。それでは、同じ下部工でも、なぜ、壁より柱部が弱かったのか？。一つの橋梁を構成する部位の設計にバランスが取れているのか？、等など、今後の設計に検討すべき多くの課題を与えている。

(2) 破壊モードを想定した設計の必要性

当然のことながら、直下型地震による構造物が受ける力は、地震の大きさ（エネルギー）だけではなく、震源からの距離に大きく支配される。不幸にして、構造物のすぐ直下の極く近距離に震源をもつ地震に見舞われたならば、想定した設計荷重よりはるかに大きな力が構造物に作用する。どのような構造物でも設計荷重よりはるかに大きな地震力を受けたならば破壊する。ところで、構造物を構成する多くの部位が同時に破壊することはなく、一つの部位が破壊すれば、蓄えられたひずみエネルギーが解放され、他の部位の破壊が免れる。したがって、どの部位が最初に破壊するか、その破壊に伴う2次的な被害はどの程度か？これらを予測した設計が必要であるといえる。たとえば、落橋防止装置はこのようなコンセプトに基づいたものである。

2. 今後の耐震設計の方向について

(1) 道路橋示方書の改正

阪神・淡路大震災を教訓にして、昨年末に道路橋示方書は改正された。そこでの改正の焦点は、発生確率は低くても、一旦発生すれば、甚大な被害をもたらす大地震に対する安全性の確保に置いている。そこでは、レベル2の地震に対する構造物の非線形挙動の評価と早期に破壊に至らさないための、エネルギー吸収能力の必要性を強調している。レベル2での想定地震動の最大加速度は構造物の固有周期や地盤特性によって変えているが、最大で2gを取っている。この値は非常に大きなもので、レベル1で降伏応力に近い許容応力度を認めた設計では、レベル2に対して非常に大きな塑性率を構造物に要求することになる。

(2) エネルギー規準に基づく耐震極限設計法

新道路橋示方書でのレベル2の地震動に対する構造物の塑性変形能の考慮は、エネルギー規準に基づいている。地震時に構造物に与えられるエネルギーは、

$$W_e + W_p + W_h = E \quad (1)$$

ここに、 W_e ：弾性振動エネルギー、 W_p ：構造物の塑性変形により吸収されるエネルギー、 W_h ：減衰エネルギー、 E ：地震による構造物への入力エネルギー。兵庫県南部地震では、不整形な地形の影響で、地震波における物体波と表面波が重畳し、大きな速度成分をもつ孤立波が現れ、これが構造物に大きな被害を与えたのではないかとされている。いま高架橋

を例にとって、地震動による構造物の最大応答速度を V とし、上部工の質量を M とすれば、式(1)で、 $E=MV^2/2$ となり、パルス状の孤立波によって高架橋が破壊しないためには、次式を満足しなければならない。

$$W_p > \frac{M}{2} V^2 \quad (2)$$

ここに、 W_p は高架橋の破壊に至るまでのエネルギー吸収量であり、通常、上部工の質量の中心に作用させた水平荷重(P)が水平変位(δ)に対して成す仕事量で評価される。すなわち、同じ大きさの強度を持つ高架橋でも、破壊に至るまでの δ の大きなじん性に富んだ場合と δ の小さなじん性に乏しい場合とでは、その耐震性に大きな違いが出てくる。

(3) RCおよび鋼部材の弾塑性解析の必要性

新道路橋示方書において、単柱およびラーメン柱式橋脚では、レベル2の地震動に対して、前述の $P-\delta$ 曲線を求めるために、弾塑性解析を義務づけている。従来、線形骨組解析に慣らされてきた構造設計者にとって、弾塑性解析は取っつきにくいかもしれない。なぜならば、線形骨組解析の解は唯一であり、どのような方法によっても同じ答えが得られる。また、多くの解析例が教科書や公式集にあり、容易にチェックできる。それに対して、弾塑性骨組解析では、厳密解なるものは、ほとんどの場合、求められなく、近似解に頼らざるを得ない。したがって、解析のためのモデル化や解析手法が異なれば、得られる結果も異なってくる。特に、鋼製橋脚の場合は、局部座屈は避けられなく、座屈後の変形能の評価が重要となる。それゆえ、構造設計者は、常に、コンピュータ解析によって得られた結果の妥当性を評価し、場合によっては、複数の方法での結果を比較し再評価し、自らの技術的判断を下さなければならない。

(4) 耐震性に優れかつ経済的な構造設計に向けて

前述したように、新道路橋示方書では、レベル2の地震動の最大加速度は $2g$ という大きな値を取っている。これは阪神大震災での大きな被害に対する教訓から産まれたものであり、直下形地震に対する構造物の安全性の確保に大きな配慮されている。しかしながら、このような示方書で設計した構造物でもどのような地震に対しても安全であるとは言えないことは1.(2)で述べたとおりである。また2.(3)で述べたレベル2に対する弾塑性解析法にしても、示方書はその解説において一つの方法を提案したに過ぎなく、完全なものでないことは言うまでもない。たとえば、示方書では、単柱およびラーメン柱式橋脚の $P-\delta$ 曲線の作成のために、塑性ヒンジ法を推奨している。しかしながら、塑性ヒンジ法はもともと終局強度を求めるために開発された解析法であるので、弾塑性変形解析にはその適用に注意する必要がある。新示方書では、破壊に至るまでの最大変位量の算定に塑性ヒンジの回転容量(rotation capacity), θ_p を導入しており、次式、 $\theta_p = \phi_u L_p$ 、ここに ϕ_u : 断面の限界曲率、 L_p : 塑性ヒンジ長、で与えている。しかしながら、断面の限界曲率は平面保持の仮定に基づく一つのモデルで、軸力の存在によって大きく変わり、その数値的評価が難しい。また、塑性ヒンジ長なるものも一つのモデルに過ぎなく、それを単独に決めることも難しい。このような手法は、多くの実験結果から産まれたものであるが、実際問題として重要なのは、破壊に至らないための部材の最大相対変形角の評価であり、これを的確に行わなくてはならない。

兵庫県南部地震では、阪神高速道路公団の高架橋のRC橋脚は多くの被害を受け、その復旧に多大の努力がなされた。その際、被災を受けたRC橋脚の柱部が1度以上の残留相対変形角を有するものは、たとえ倒壊に至ってなくても、上部工との取り合いの関係上、撤去されて、新しい橋脚に作り替えられたと聞いている。すなわち、1度(0.017rad.)は、機能的な面からの一つの許容限界相対変形角と考えられる。したがって、この経験を活かせば、新示方書で設計された橋脚は、レベル2の地震動に対して、塑性ヒンジの発生を許しても、その回転容量は0.017rad.以上なければならないと言えるであろう。

以上のことより、耐震性にも優れ、経済的にも優れた設計の実現には、単に示方書を追随することだけではなく、実際に起こった損傷や破壊例を熟知し、また過去に行われた類似の部材の多くの実験例をも参照し、構造設計者の総合的な技術的判断が不可欠といえる。

以上