

# 土木構造設計法の変遷と今後の方向

池 田 尚 治\*

## 1. はじめに

土木構造設計法と一言で表現しても、その対象となる造物は当然のことながら極めて多岐にわたっている。って、土木構造設計法として総括し、その変遷と展望について考えることはあまりに気宇壮大であり、まさにくべき立場にあることに気がつく。そこで、このようテーマの広さと重大さを意識したのでは筆を進めることが困難であると思われる所以、ここでは単に表題に連すると思われる私見を述べさせていただくことと

読者諸賢のご寛容を賜りたい。

比較的最近の本誌や同類の出版物には、コンクリート造に関連した概況や展望に関する貴重な論説の類が多く見られる<sup>1)~11)</sup>。このような記事が求められているの

我々が常に未来を模索し、絶えず何か頼りになる新しい方向を求めるとしているからと思われる。土木構造設計技術についてのこのような背景として思い浮かぶは、第1に、社会の価値観の変動と計算技術の進歩によって構造設計に論理性を強く求める気運となり、限状態設計方法の概念が登場して、従来から用いられてる許容応力度設計法が絶対的なものでなくなってきたと、第2に、新しい材料、新しい施工方法が間断なく生ずる一方で、資源、エネルギー、環境の問題が境界条件として存在すること、などであろう。本稿は、主として前者に焦点を当てて検討を試みるものである。

## 2. 安全度の割付け

近代の力学が芽生えたガリレオの頃は、構造物の設計材料の破壊強さを基本に考えていたが、その後弹性論

状態に対しては許容値を適宜割増しするような工夫も図られ、設計体系としては、それなりに妥当な形に整備されてきた。許容応力度設計方法は、材料に対する許容値を設定する段階でその中に安全度を考慮しているため、設計荷重が作用しても許容値以上の応力度が材料に生じないので、材料や部材の降伏近傍あるいは降伏以降の挙動に注意を払う必要がないような体系であることが理解できる。一方、計測技術の進歩により部材の破壊時の挙動が明らかにされるようになると、弾性理論からだけでは破壊時の挙動を推定したり説明したりすることが困難であることなどの理由により、材料の塑性的性質まで含めた算定方法が提案されるようになった。

また、許容応力度設計方法で設計する場合、死荷重と活荷重などを一体とした断面力から発生する応力度を求め、これと許容値とを比較するため、個々の荷重に対しどの程度の安全率が付与されているかを検討することは困難である。

これに対し、個々の荷重にそれぞれ妥当な安全率をかけて断面力を求め、これを部材の降伏耐力または終局耐力と比較する設計方法は、荷重の性質に応じて安全度を付与できる特徴がある。このような設計方法は荷重係数設計法 (load factor design)、または終局強度設計法 (ultimate strength design)、あるいは限界状態設計法 (limit state design) と呼ばれている。なお、安全率としては、部材の側にも材料の特性に応じた材料係数を導入して安全率を割り付けるのが合理的である。このように、荷重の側と材料の側の双方に安全度を付与する場合の安全率を部分安全率と呼んでおり、CEB-FIP Model Code や BS CP 110 に採用されている。我が国におい

さて設計方法の形態として、部分安全率を用いた限界状態設計方法が最も合理的なものであるとして、問題となるのは安全率の定め方である。一般に、安全率は広い意味での経済性と関連させて考えることが必要であって、破壊または使用不能になったときの経済損失や維持管理費まで建設コストに含めて最適の経済性となるよう定めることが本筋であろう。また実際に工事を計画する場合、わずかな安全率の差でも工事費に大きく影響することから、できるだけ正当な安全率を採用したくなることは当然である。すなわち、安全率が純理論的な必然性をもって定められれば最も好ましいと考えられている。その結果、材料のばらつきや荷重の大きさの不確実性を考慮した確率論的手法の導入が検討されている。また直接受けた確率論を適用することは現時点では困難な点が多いので、安全性指標  $\beta$  を介して信頼性理論を単純化した形で導入する方法も提案されている<sup>13)</sup>。しかしながら社会の経済変動や価値観の変化、社会の種々の機構の変化によって、単に過去の統計的な資料に基づいた確率論からだけでは最適の安全率を定めることは至難であろう。

安全率はかつて無知率とも呼ばれ、材料特性や荷重との応答特性に関し不明の点を補完するための方便とも考えられた。現在では構造技術の進歩と信頼性理論の発達により安全率の持つ意味が単なる無知率としてではなく、構造設計上のかなめとして認識されるようになってきた。しかしながら、確率論的な検討からだけでは安全度を決定することが困難である以上、次のように全く別り観点からの検討も必要であろう。

昨冬は北国では豪雪に見舞われ、人々は屋根の雪降しき多忙であった。雪降しをしなければ家が押しつぶされてしまうからである。人々は雪荷重に対する家屋の安全度を経験的に知っており、危険のないように対処しているのである。つまり、安全率は構造技術者のみが苦悩して定めるのではなく、構造物の使用者、所有者との合意によって決定するのであれば話は比較的簡単となる。すなわち、構造技術者は荷重や材料の特性を専門的な立場から説明し、使用者、所有者側は経済性と安全性とを勘案して安全度を選択するのである。道路橋や鉄道橋のように公共の用に供される構造物の場合には、少なくともよりよう付与された安全率を市民に分かりやすく情報として提供する義務があろう。橋りょうをはじめとし

モード、耐久性、経年変化等も反映させが必要である。また確率論的に考えるならば、構造物を計画しているときの安全性と、実際にその構造物が架設された後の安全性とは異なるものであることも認識する必要がある。なぜなら、無事に架設されたという事実は、一概に設計時に懸念した不確実性の一部をクリアしているからである。土木構造物は、建設の各段階で所定の施工管理がなされるのが常であり、また他の工業製品と比べて寿命も長いので、破壊の確率を  $10^{-6}$  以下にするといつて議論はあくまで単純化した確率モデルでの話であって、実際には破壊や損傷の因果関係を追求する方が重要であろう。

安全度について、以上に述べたような認識に立っての割付けをする場合、次のような荷重係数マトリックスを用いて表現すると設計に便利であると思われる。

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & \cdots & \cdots \\ \vdots & & & \\ a_{m1} & \cdots & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} b_1 & R_1(\beta_1, \beta_2, \dots) \\ b_2 & R_2(\beta_1, \beta_2, \dots) \\ \vdots & \vdots \\ b_m & R_m(\beta_1, \beta_2, \dots) \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここで  $a$ : 荷重係数、 $S$ : 荷重作用、 $\beta$ : 材料係数、 $R$ : 部材強度、 $b$ : 安全率の余裕。

このような表現方法を用いることによって、ある限界状態におけるある荷重にどの程度の安全度の余裕があるかが容易に理解できる。

また安全度を割り付けるに際し、破壊が好ましいモードで生ずるよう、材料強度の上限を定めることも必要であろう。これはフェイルセイフ設計に関する考え方である。

### 3. 示方書の変遷と方向

我が国のコンクリート土木構造物の設計の基本として土木学会のコンクリート標準示方書の果たしてきた役割は極めて大きい。この示方書は昭和6年に初めて制定されて以来、昭和11年、15年、24年、31年、42年、49年、52年、55年と改訂され現在に至っている。この間、コンクリートや鉄筋の品質が大幅に向上したため、許容応力度をそれに伴って増大させたり、中心軸方向荷重を受ける柱の設計に終局強度設計法を採用したりしたが、基本的には昭和6年制定時の設計概念を踏襲している。ただし、せん断力に関連する設計方法については、

昭和 55 年改訂時にそれまで徐々に引き上ってきた許容せん断応力度が、斜引張鉄筋の計算を考慮する場合に、斜引張鉄筋以外が負担するせん断力としての  $S_c$  を考慮してよいこととした<sup>14)</sup>。

$$S_c = \frac{1}{2} \tau_{a1} b_0 j d \quad (2)$$

ここで  $b_0$ : 腹部の幅,  $j d$ : 断面の腕長

$\tau_{a1}$ : 斜引張鉄筋の計算をしない場合の許容せん断応力度

したがって、最小スターラップ量として 0.15% を規定し、せん断破壊に対する安全度の向上を図ることとした。許容せん断応力度の引下げは、実務上大きな問題を提起したのは至る所であるが、腹鉄筋が配置されていない鉄筋コンクリートばかりの斜引張破壊が、曲げひびわれの影響を受けて常に低いせん断応力度のもとで生ずることが明らかとなった以上、やむを得ないことである。式(2)で係数をとしたのは我が国獨得のものであって、腹鉄筋の配筋していないばかりの斜引張破壊時の挙動が図-1(a)のような韌性ある形式ではなく、図-1(b)のような脆性のものであるため、単に斜引張抵抗を腹鉄筋による抵抗そのまま累加することが不適当であること、最小腹筋比 0.15% のすり付けを満足すること、などの理由によるものである。事実、この係数をとせずに 1 として設計した場合、正負交し載荷によって曲げ引張破壊のモードから部材がせん断破壊のモードに移行する可能性が高いので、我が国のような地震では、この係数を 1/2 程度にすることが妥当であると思われる。

一方、プレストレストコンクリートの普及に伴い昭和 30 年に土木学会で定められて以来、昭和 36 年の改訂版で昭和 53 年にプレストレストコン

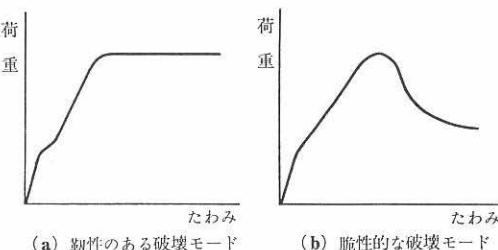


図-1 破壊モード

針と大きくは変わっていないと思われる。これと同時期に、日本道路協会では、プレストレストコンクリートと鉄筋コンクリートとを一体として規定した道路橋示方書コンクリート橋編を制定している。

現在、土木学会の終局強度設計小委員会では、限界状態設計方法を基本としたコンクリート構造設計指針の試案を提案中であり、いずれ現行の示方書や諸外国の設計基準と共に今後の示方書改訂時の資料となるものである。今後の土木構造設計の示方書の方向としては間違いない限界状態設計方法へと移行してゆくであろうが、通常の使用状態においては部材はあくまで弾性範囲にあることが必要であり、かつ、ひびわれの悪影響も引張鉄筋の応力度の大きさと密接に関係があることから、あらた

表-1 コンクリート標準示方書における許容応力度の変遷

示方書 制定年	鉄筋の許容 引張応力度 (kg/cm²)	コンクリートの許容せん断応力度 (kg/cm²)						
		$\tau_a$	設計基準強度 (kg/cm²)					
			—	160	180	240	300	400 以上
昭和 6 年	1200	$\tau_{a1}$ (はり)	4.5	—	—	—	—	—
		$\tau_{a1}$ (スラブ)	4.5	—	—	—	—	—
		$\tau_{a2}$	14	—	—	—	—	—
昭和 15 年	1200	$\tau_{a1}$ (はり)	4.5	—	—	—	—	—
		$\tau_{a1}$ (スラブ)	4.5	—	—	—	—	—
		$\tau_{a2}$	14	—	—	—	—	—
昭和 24 年	1200	$\tau_{a1}$ (はり)	4.5	5.5	—	—	—	—
		$\tau_{a1}$ (スラブ)	6	8	—	—	—	—
		$\tau_{a2}$	14	16	—	—	—	—
昭和 31 年	SS 41 など	1400	$\tau_{a1}$ (はり)	4.5	5	5.5	6	6.5
	SSD 49 など	1600	$\tau_{a1}$ (スラブ)	6	7	8	8.5	9
			$\tau_{a2}$	14	15	16	17	18
昭和 42 年	SD 40	2100	$\tau_{a1}$ (はり)	—	—	6	7	8
			$\tau_{a1}$ (スラブ)	—	—	8	9	10
昭和 49 年	SD 40 (疲労)	1800	$\tau_{a2}$	—	—	17	20	22
						24		
昭和 52 年 (修正)	SD 40 (一般)	2100	$\tau_{a1}$ (はり)	—	—	6	7	8
	SD 40 (疲労)	1800	$\tau_{a1}$ (スラブ)	—	—	8	9	10
	SD 40 (降伏)	2200	$\tau_{a2}$	—	—	17	20	22

強くなりつつある。一方、両者の中間的な存在である PRC 構造や鉄骨と鉄筋を補強材とする SRC 構造、あるいは鋼合成げたやプレビーム工法のような合成構造、混合構造等がある。これら個々の設計手法を健全に発展させるためには、コンクリートや鋼材の特性等をよく把握した上で土木構造物に共通な設計理念を確立することが必要であると思われる。しかしながら、設計概念は個々の構造形式で異なっているので、設計基準や示方書はいたずらに統一を図る必要はないものと思われる。設計基準や示方書は具体的に構造物を設計する場合に用いるものであるから、構造物の使用目的や使用材料をどこに限定するかから基準や示方書の作成作業が始まるのである。PRC 構造<sup>15)</sup>が提案されてから既に相当の年数が経過したが、まだあまり普及しないのは、PRC の設計概念に基づいた固有の示方書がないためだと思われる。また、SRC 構造というと累加方式のみが特徴のように思われがちであるが、もっと本質的な SRC の設計概念を把握することが必要である。形鋼と鉄筋とを併用した新しい設計概念<sup>16)</sup>も提案され実施に移されている例のように、今後種々の材料の特性を生かした多くの設計概念が誕生することを期待したい。設計は一つの主観的行為であるから、個々の設計概念は独立して存在する方が適用しやすいものと思われる。

圧縮強度が 1000 kg/cm<sup>2</sup> に及ぶ超高強度コンクリートの出現、乾燥収縮を補償する膨張コンクリートや引張特性を改善する鋼纖維補強コンクリートの出現は新しい設計概念の誕生を求めているものと思われる。また、押し出し工法や移動支保工方式のような新しい架設工法の出現、PC 斜張橋や LNG 地下タンク、PCCV<sup>17)</sup> 等の新しい構造物の出現等は、種々の設計概念にとって将来の発展のための格好な機会となるものと思われる。

## 5. おわりに

以上に述べてきた事柄のほか、土木構造設計法を考える場合に注目すべきものとして、コンピュータの利用による自動設計や標準設計の手法、有限要素法や地震時の応答解析等による構造解析手法の応用、環境を考慮した構造計画の問題等、多くの事柄が思い浮ぶが、ここでは

目前の計算テクニックや単なる示方書の形式にばかりらわれることなく、後世において評価に耐え得るよな構造物を建設するための設計概念や設計理念の発展努めることも重要であると思われる。

## 参考文献

- 樋口芳郎：コンクリート工学における将来の展望、コンクリート工学、Vol. 17, No. 8, 1979.8, pp. 1~5
- 岡田 清：コンクリート構造工学における将来展望、コンクリート工学、Vol. 19, No. 1, 1981.1, pp. 22~3
- 松本嘉司、小田純夫：コンクリート橋りょう上部構造の現状と展望、コンクリート工学、Vol. 18, No. 1 1980.11, pp. 21~25
- 山口、毛見、渡辺、笠井：コンクリートの発展、コンクリート工学、Vol. 18, No. 2, 1980.2, pp. 58~67
- 国分正胤：土木におけるコンクリート施工の移り変り講座、コンクリート工学、Vol. 18, No. 6, 1980.6, pp. 71~78
- 猪股俊司：プレストレストコンクリートの歴史と展望、コンクリート工学、Vol. 16, No. 6, 1978.6, pp. 2~7
- 前田幸雄：コンクリートに期待するもの、セメントコンクリート、No. 399, 1980.5
- 前田幸雄：土木構造における合成構造の応用、創立 15 年記念大会研究集会報告集、日本鋼構造協会、昭 55.
- 小寺重郎：鉄筋コンクリート橋（コンクリート橋の歴史と将来の展望）、橋梁と基礎、1979.4, pp. 10~16
- 莊田信彦、阿部源次：プレストレストコンクリート（コンクリート橋の歴史と将来の展望）、同上、pp. 16~24
- 佐藤浩一：海外の話題（コンクリート橋の歴史と将来展望）、同上、pp. 24~32
- 土木学会構造工学委員会 構造物安全性研究 小委員会：全性照査のための構造設計基準策定のガイドライン案について、土木学会誌、1980.9, pp. 69~76
- Cornell, C.A. : A Probability-Based Structural Code Journal of ACI, Dec. 1969
- 池田尚治：無筋および鉄筋コンクリート標準示方書・計編の一部改訂について、土木学会コンクリートライラリー、第 46 号、1980
- 横道英雄：PRC について、プレストレストコンクリート、Vol. 6, No. 6, 1964.12
- 池田、上田、樋口、山口：形鋼鉄筋併用コンクリート造の実験的研究、第 3 回コンクリート工学年次講演会論文集、1981.6
- 青柳征夫：コンクリート格納容器に関する内外における研究の概況、プレストレストコンクリート、Vol. 2 No. 1, 1981
- 土木学会：土木工学ハンドブック、第 11 編、構造設計法、昭 49.11
- 川田忠樹：だれがタコマを墜としたか、建設図書、1975