

論文 区間強度法による地震動を受けるボックスカルバートのせん断耐力評価

山谷敦*1・檜貝勇*2・足立正信*3・中村光*4

要旨：ボックスカルバート型の地中埋設構造物は、土圧・水圧等の常時荷重の他に、地震時には慣性力・地震時土圧の作用も加わって複雑な荷重状態に置かれる。このような任意の荷重を受けるRC部材のせん断耐力の評価方法として、「区間強度法」が提案されている。本研究では、「区間強度法」を適用して地震動を受ける地中ボックスカルバートのせん断耐力を評価するとともに、現行設計法による結果と比較することにより、この種構造物のせん断耐力の評価方法について考察を行った。

キーワード：区間強度法、せん断耐力、地震動、ボックスカルバート

1. はじめに

破壊機構を考慮したせん断照査方法として土木学会は、「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震設計に関する安全性照査マニュアル」[1]（以下「マニュアル」と称す）を提案している。「マニュアル」の方法では、破壊断面位置を“等価せん断スパン”の中央として、断面力分布に基づき棒部材式あるいはディーブビーム式によりせん断耐力の評価を行う。一方、檜貝[2][3]は、断面位置から支点および載荷点までの距離とせん断耐力との関係を「区間強度式」として明らかにしており、これにより部材各断面のせん断耐力および破壊断面位置の算定が可能となった。

本研究では、地震動を受け複雑な荷重形態となる地中埋設ボックスカルバートのせん断耐力照査を「区間強度法」により行い、「マニュアル」および「コンクリート標準示方書（平成3年），土木学会」[4]（以下「示方書」と称す）の現行設計法による結果と比較しつつ、この種構造物のせん断耐力の評価方法について考察を行った。

2. 地震応答解析

解析に用いる地中埋設構造物は、図-1に示す2連ボックスカルバートとした。内空スパンと部材高さの比は $l/h=7$ である。また、引張鉄筋比 p_w は全部材一律0.5%とし、コンクリートの圧縮強度は $240\text{kg}/\text{cm}^2$ とした。

地盤モデルは3層の水平成層構造とし、図-2に示す二次元有限要素法を用いて地震応答解析を行った。入力地震動は最大加速

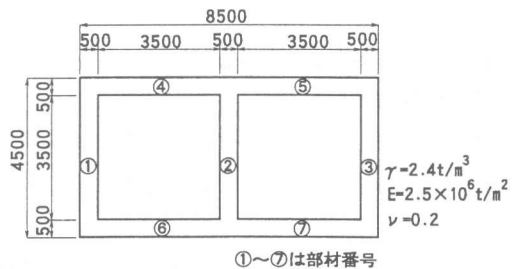


図-1 構造物の形状

度振幅 300gal の模擬地震波とし、地震応答解析は地盤物性値のひずみ依存性を考慮した等価線形化法で行ったが、構造物については一律50%の剛性低下を仮定している[1]。常時荷重と鉛直地震

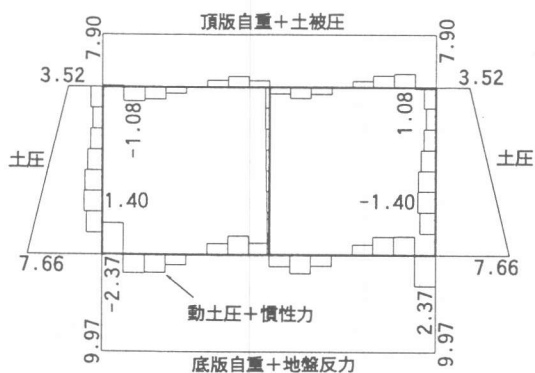
*1 東電設計（株）技術開発本部耐震技術部課長代理（正会員）

*2 山梨大学教授 工学部土木環境工学科、工博（正会員）

*3 東電設計（株）技術開発本部耐震技術部部長代理（正会員）

*4 山梨大学助教授 工学部土木環境工学科、工博（正会員）

力 ($k_v=0.15$)に対する解析はフレーム解析により行った。常時荷重と鉛直地震力の荷重分布、および、時刻歴応答解析の結果から定めた、最も危険と考えられる隅角部の曲げモーメントが最大となる時刻の動土圧と慣性力の分布を図-3に示す。これらの荷重を用いた解析により得られた検討用断面力分布を図-4に示すが、曲げモーメント分布から、構造物は頂底板間の相対変形が卓越した変形モードと言える。



※荷重は構造物の外側から作用するときが正 (+)。また、側壁、隔壁の自重は表示していない。

図-3 荷重分布 (単位: t/m^2)

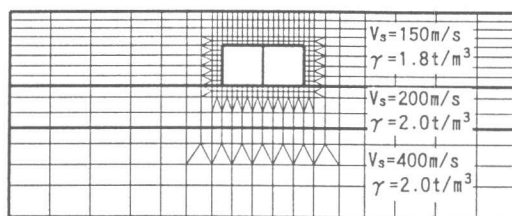


図-2 解析モデル

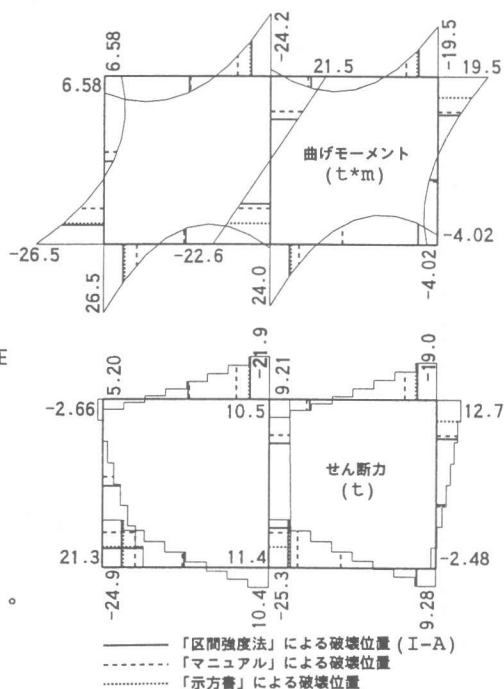


図-4 検討用断面力および破壊位置

3. せん断耐力の算定方法

(1) 区間強度法

檜貝は、集中荷重を受け、せん断補強筋がない単純梁のせん断耐力を断面位置から支点までの距離および載荷点までの距離の関数として表し、これを区間強度式として下式を提案している。

$$V_u = R \cdot V_o = 0.958 [\coth(x/d)]^{1.360} \cdot [\coth(a/d-x/d)]^{1.484} \cdot V_o \quad (1)$$

ここで、R : 耐力係数

a : 支点から載荷点までの距離 (cm)

x : 断面から支点までの距離 (cm)

V_o : 基本的せん断耐力 ($V_o = 0.94 f'_c \cdot p_w^{1/3} \cdot (100/d)^{1/4} \cdot (1 + 2M_o/M_u) \cdot bd$) (kg)

f'_c : コンクリートの圧縮強度 (kg/cm 2)

p_w : 引張鉄筋比 ($= 100A_s/bd$) (%)

M_o : デコンプレッションモーメント

M_u : 曲げ破壊モーメント

d : 有効高さ (cm), b : ウェブ幅 (cm)

また、複数の集中荷重を受ける場合には「直線被害則」を仮定し、さらに、スパン内に曲げモーメントの反曲点を有する場合には、部材を複数の単純な梁部材に置き換えて、それぞれに区間強度式を適用すれば良いことを示している。ただし、その際、支承部で直接支持されない、いわゆる間接支持となる区間に対しては、次式で表される K により耐力を低減する。

$$K=1+0.5(\ell_2/d-1) \quad (1.0 \leq K \leq 1.5) \quad (2)$$

ここで、 ℓ_2 : 間接支持となる点から、直近の支承までの距離 (図-5参照)

今回用いた「区間強度法」の概要を図-5に示す。まず、地震応答解析により得られた曲げモーメント分布に基づき、部材を単純梁でモデル化される区間Ⅰと片持ち梁でモデル化される区間Ⅱに分割する。その際、区間Ⅰに端モーメントが存在する場合には2通りの考え方によってモデル化する。方法Ⅰ-Aは、端モーメントの存在によるせん断耐力の低下を考慮するために ℓ_1 の2倍を全スパン長としたモデルとし、実スパンから張り出した仮想部分には、実際に作用している荷重の平均値を等分布荷重として作用させる方法である。この方法は、等分布荷重については厳密に部材の断面力分布を再現するものであり、作用荷重が等分布に近い場合には妥当な近似であると考えられる。方法Ⅰ-Bは、簡単のため端モーメント M_s の影響を無視して、スパン長を実際のその区間の長さ $\ell_1 + \ell'_1$ としてモデル化する方法である。

次に、分割したそれぞれの区間について、スパンを n 等分して断面 i を設定し、作用する分布荷重を n 個の集中荷重 P_j に置換してそれらを各隣接断面間の中央に載荷する。区間Ⅱの自由端にはモーメント反曲点でのせん断耐力に相当する荷重 P_s も作用させる。断面 i のせん断耐力 V_{ui} は、個々の荷重によるせん断力 V_{ij} と有効せん断力 $V_{o,ij}=V_{ij}/R_{ij}$ (R_{ij} は P_j に対する断面 i の耐力係数である)を計算し、 n 個分の全荷重によるせん断力と有効せん断力の総和 $V_i = \sum V_{ij}$, $V_{o,i} = \sum V_{o,ij}$ を計算して、次式により算定する。

$$V_{ui} = V_i \cdot (V_o / V_{o,i}) \quad (3)$$

また、破壊安全率 SF_i は、構造解析により得られた i 断面位置での実際の作用せん断力 V_{di} とせん

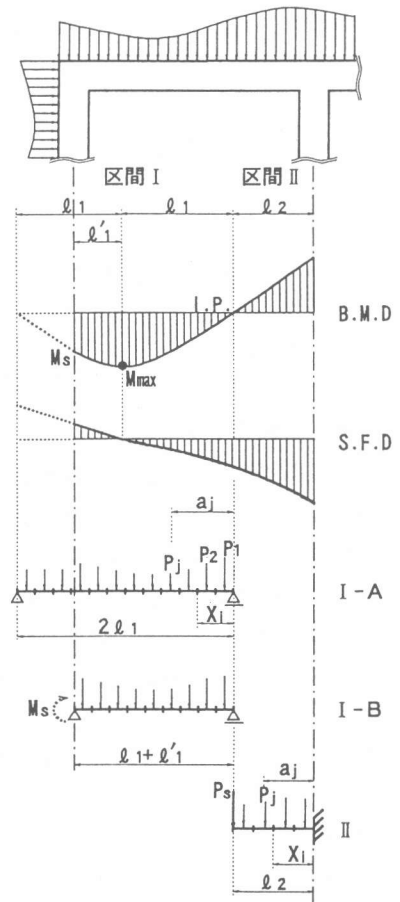


図-5 「区間強度法」の概念図

断耐力 V_{ui} を用いて式(4)から求められ、 SF_i が最小となる断面が破壊断面である。

$$SF_i = V_{ui} / V_{di} \quad (4)$$

なお、本研究では、破壊断面位置を約 $0.1d$ の精度で算定していることから、各部材の断面分割数 n は約100である。

(2) 「マニュアル」の方法

「マニュアル」による照査方法でも区間強度法と同様に、区間Ⅰ、Ⅱ(等価せん断スパン)に分割して照査を行う。ただし、区間Ⅰでは、最大曲げモーメント点でさらに2つに分割してそれぞれの区間で照査を行う。また、区間Ⅱのせん断スパンおよび検討断面までの距離を定める際の始点は支承前面とする。照査位置は原則的にそれぞれのスパンの中央とするが、支承前面から照査位置までの距離が $h/2$ 以下の場合にはこれを $h/2$ とし、 $1.5d$ を超える場合はこれを $1.5d$ とする。せん断耐力は直接支持となる区間に対しては棒部材式とディープビーム式を適用し、どちらか大きい方で評価する。間接支持の区間に対しては棒部材式のみを用いる。両式とも基本的には「示方書」に示される式と同じであるが、せん断スパンの定義が異なる。なお、「マニュアル」の方法を適用する場合の安全係数は全て1.0としている。

(3) 「コンクリート標準示方書」の方法

構造物の内空スパンと部材高さの比は $l/h=7$ となることから、せん断耐力の算定には棒部材式を用いた。照査位置は支承前面から $h/2$ の位置とし、安全係数は全て1.0とした。

4. 区間強度法の適用結果および現行設計法との比較

「区間強度法」では、作用荷重の分布状態が重要になるので、図-6に側壁(①部材)および頂版(④部材)について荷重の分布を例示した。構造物各部材のせん断照査結果を表-1に示すが、各部材とも片持ち梁でモデル化される区間Ⅱの方が破壊安全率は小さくなる傾向にある。区間ⅠについてⅠ-A法とⅠ-B法を比較すると、材端モーメントの影響を考慮してスパンを仮想的に長くしたⅠ-Aの方が破壊安全率は10%程度小さくなる。また、構造物全体で破壊安全率が最小となるのは⑥部材(底版)の区間Ⅱであり、 $SF_{min}=1.61$ となる。

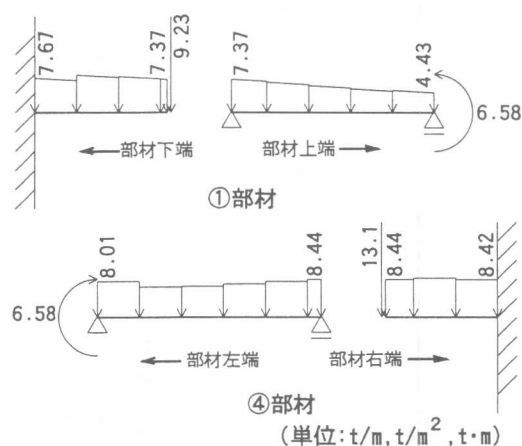


図-6 「区間強度法」で用いる荷重分布

この解析で対象とした構造物は比較のスレンダーであり、「マニュアル」の照査結果は全て棒部材式により決定されているが、最小安全率は

「区間強度法」と同様に⑥部材の区間Ⅱで $SF_{min}=1.69$ となり、両者は大差のない結果を与えている。一方、「示方書」では $SF_{min}=1.14$ と小さく、せん断耐力を過小評価することが明らかである。

破壊安全率および破壊断面位置について「区間強度法」と「マニュアル」を比較する。区間Ⅰ

表-1 セン断耐力算定結果 ($l/h=7$)

部材No. & 区間	「区間強度法」				「マニュアル」				「示方書」			
	x(cm)	$V_a(t)$	$V_u(t)$	SF	x(cm)	$V_a(t)$	$V_u(t)$	SF	$V_a(t)$	$V_u(t)$	SF	
①	I -A	38.4	9.23	32.3	3.50	60.0	5.69	28.0	4.92	19.3	26.3	1.37
	-B	38.4	9.23	35.7	3.86							
②	II	46.2	21.3	39.5	1.85	85.0	17.2	30.7	1.78	11.4	28.6	2.52
	II	96.2	11.3	28.7	2.54							
③	I -A	56.2	5.33	24.6	4.61	60.0	5.33	29.5	5.53	11.9	26.5	2.23
	-B	56.2	5.33	27.8	5.21							
④	II	92.3	11.1	29.9	2.70	85.0	11.1	28.8	2.59	19.7	24.9	1.26
	I -A	62.1	9.01	22.4	2.49							
⑤	-B	62.1	9.01	24.1	2.67	60.0	9.01	26.7	2.96	16.8	24.8	1.48
	II	46.2	21.9	37.6	1.72							
⑥	I	66.9	5.75	23.2	4.04	60.0	5.75	28.7	4.99	22.2	26.0	1.17
	II	46.2	19.0	39.2	2.07							
⑦	I	64.0	7.97	25.4	3.19	60.0	7.97	30.7	3.85	22.4	25.6	1.14
	II	46.2	24.9	40.1	1.61							
⑧	I -A	45.9	9.28	21.2	2.28	60.0	8.51	27.8	3.27	19.4	25.5	1.83
	-B	34.1	13.8	35.4	2.57							
⑨	II	46.2	25.3	42.5	1.68	68.6	19.4	35.5	1.83			

x:破壊位置 V_a :作用せん断力 V_u :せん断耐力 SF:破壊安全率
 なお、「マニュアル」は全て棒部材式で決定している。

表-2 セン断耐力算定結果 ($l/h=3$)

部材No. & 区間	「区間強度法」				「マニュアル」				*	「示方書」			
	x(cm)	$V_a(t)$	$V_u(t)$	SF	x(cm)	$V_a(t)$	$V_u(t)$	SF		$V_a(t)$	$V_u(t)$	SF	
①	I -A	32.1	4.67	38.0	8.15	42.8	3.20	34.1	10.7	S	8.13	24.6	3.02
	-B	32.1	4.67	60.0	12.8								
②	II	42.9	8.77	50.5	5.76	57.2	7.49	51.6	6.89	D	8.14	26.0	3.19
	II	50.0	8.14	39.6	4.87								
③	I -A	50.0	7.86	39.9	5.07	62.0	7.90	41.8	5.29	D	5.88	24.9	4.23
	-B	42.6	3.09	33.5	10.8								
④	II	46.4	6.12	41.8	6.82	64.4	5.63	37.9	6.73	D	9.24	24.1	2.60
	I -A	51.2	4.18	32.1	7.68								
⑤	-B	51.2	4.18	42.7	10.2	46.7	4.18	32.2	7.70	S	7.06	23.8	3.37
	II	35.7	10.3	72.4	7.06								
⑥	I -A	21.4	3.51	53.0	15.1	34.0	2.27	37.1	16.3	S	8.69	24.2	2.78
	-B	22.0	4.20	78.0	18.6								
⑦	II	35.7	8.00	67.7	8.46	50.0	7.06	74.0	10.5	D	10.3	24.3	2.36
	I -A	21.9	3.77	44.6	11.8								
⑧	-B	43.3	3.18	46.2	14.5	34.5	3.18	37.3	11.7	S	10.3	24.3	2.36
	II	39.3	9.72	64.9	6.68								
⑨	I -A	21.7	5.40	39.0	7.22	42.3	3.53	33.9	9.60	D	10.3	24.3	2.36
	-B	37.1	6.25	52.1	8.34								
⑩	II	21.4	14.3	116.	8.13	50.0	10.3	107.	10.4	D			

x:破壊位置 V_a :作用せん断力 V_u :せん断耐力 SF:破壊安全率
 * D:ディープビームで決定したケース S:棒部材式で決定したケース

について、図-4に示す破壊断面位置を比べると、側壁①および底版⑦部材を除き両者はよく一致している。破壊安全率は、全体的に「マニュアル」による値が「区間強度法」を上回る傾向にあり、端モーメントの影響を無視したI-B法の値も超えている。「マニュアル」の方法では、材端モーメントの影響は考慮されておらず、また、破壊断面位置の定め方に恣意的な面もあり、それらの影響で安全性を過大に評価する結果となったように思われる。区間IIについては、「マニュアル」による破壊断面位置xおよび破壊断面のせん断耐力 V_u を「区間強度法」による値と比較すると、xは大きく V_u は小さく評価するケースが多いのであるが、最終的な破壊安全率は「区間強度法」によるものとほぼ等しい値を与える結果となっている。

次に、内空スパンと部材高さの比を $l/h=3$ とした比較的ディープな部材を有するケースについても比較検討を行った(各部材の断面分割数nは約50である)。「示方書」のディープビーム式を分布荷重を受ける単純梁以外の構造物に対して適用する場合には、構造物を分解する、あるいはモーメント分布の影響を無視する、など何らかの仮定が必要になることから、「示方書」法による耐力算定には全て棒部材式を用いた。その結果を表-2、図-7に示すが、「区間強度法」のI-B法はI-A法に比べて耐力および破壊安全率とも15~40%程度大きい値を与えており、部材がディ

ープビームに近い場合に端モーメントの影響を無視すると、過大な破壊安全率の評価となりやすいことを示唆しているものと考えられる。「マニュアル」の方法では、区間Ⅰの破壊安全率をⅠ-A法よりも大きく評価する機会が多いことは、上記の $l/h=7$ の場合と同様であるが、区間Ⅱの破壊安全率も「区間強度法」より1~2程度大きく評価する機会が多い。最小破壊安全率は、「区間強度法」、「マニュアル」法 および「示方書」法で、それぞれ 4.87, 4.96 および 2.36であり、「示方書」の方法は極めて小さな破壊安全率を与えている。このようなディープな構造においては、特に前2者のような設計方法を採用するのが合理的であると考えられる。

5. 結論

「区間強度法」を適用して、地震力を受ける地中埋設ボックスカルバートのせん断耐力を評価し、現行設計法による結果と比較を行った結果、以下のような結論が得られた。

- (1) 「マニュアル」の方法は簡易であり、構造物のせん断破壊安全率を評価する方法として優れた面を持っている。ここで試算した構造物の破壊安全率も「区間強度法」による結果と大差ない値を与えている。しかし詳細に言えば、部材端モーメントがせん断耐力に及ぼす影響が考慮されていないため、スパン中央部付近の正の曲げモーメント区間でせん断破壊安全率を過大に評価する傾向があり、また、支点から破壊断面までの距離を大きく評価するため、隅角部付近の負の曲げモーメント区間で破壊安全率を過大に評価する傾向がある等の問題点が指摘される。
- (2) 「土木学会コンクリート標準示方書」の方法は、比較的ディープな構造のみならず、スレンダーなものについても、せん断破壊安全率を過小評価することが明らかであり、改善を要すると思われる。
- (3) 材端モーメントの存在が部材のせん断耐力に及ぼす影響については、今後とも検討が必要であり、特に等分布荷重で近似できないような荷重を受ける場合についての検討が重要である。

【参考文献】

- [1] 原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震設計に関する安全性照査マニュアル：土木学会 原子力土木委員会, 1992
- [2] 檜貝 勇：等分布荷重を受け、曲げモーメントの反曲点をスパン内に持つRCはりのせん断耐力, 土木学会論文集, 第460号/V-18, pp. 49~56, 1993
- [3] 檜貝 勇：区間強度法による腹鉄筋を用いないRC梁のせん断耐力の算定, 土木学会論文集, 第472号/V-20, pp. 69~76, 1993
- [4] コンクリート標準示方書【平成3年版】 設計編, 土木学会, 1991

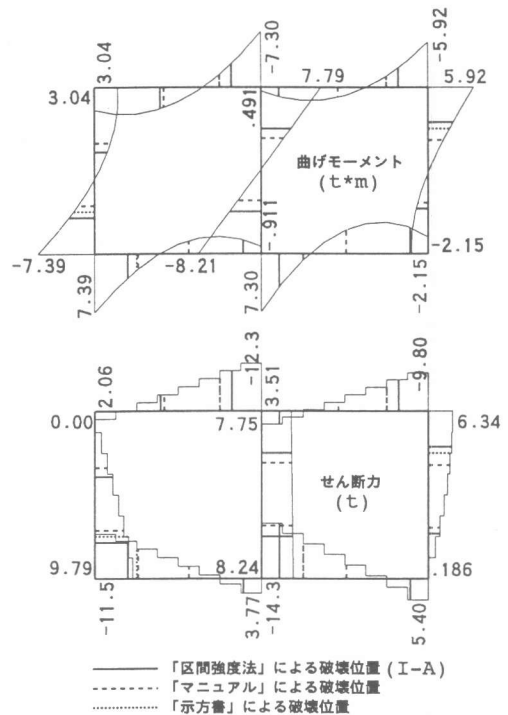


図-7 破壊位置 ($l/h=3$)