

論文 RC ディープスラブのせん断破壊における有効幅について

古内 仁^{*1}・高橋義裕^{*2}・上田多門^{*3}・角田與史雄^{*4}

要旨：RCはりりとRCスラブの中間的な構造でせん断スパン比の小さなディープスラブについて、主に幅方向に対する載荷板および支持板の長さを変化させて実験を行った。破壊に起因したひび割れは、側面に現れた斜めひび割れと異なるひび割れが内部に存在し、破壊面が3次的に広がっていることが観察された。また、せん断耐力についてディープビームのせん断耐力算定式を用いる場合の有効幅について検討を行い、変数である載荷板長さ、支持板長さおよびせん断スパンの大きさによって関係があることを見いだした。

キーワード：RCディープスラブ、せん断破壊、有効幅

1. はじめに

通常のRCはりおよびRCスラブのせん断破壊に対する実験データは豊富にあり、多くの研究者によって検討が行われている。しかしながら、はりおよびスラブの中間的な形状の構造物に部分的集中荷重が作用したり、部分的な支持が行われた場合には、その破壊形式が明確なはり型のせん断や押抜きせん断破壊とはならないことがある。特にせん断スパンが小さくディープビーム的な構造においては、データが十分にあるとはいえない（本研究ではディープビーム的な構造のスラブをディープスラブと呼ぶこととする）。例えば、フーチングやコーベル等の構造はそれに類した構造となるが、土木学会コンクリート標準示方書²⁾では、せん断耐力について前者は独自の設計を行い、後者はディープビームとして設計を行うこととなっている。その際、荷重分布の大きさによる影響については明確なものが示されていない。

本研究は、ディープスラブを対象に主として載荷板長さ、支持板長さおよびせん断スパン比

を変数とし実験を行った。実験結果より、ディープスラブをディープビームとして取り扱い、せん断耐力を求める場合の有効幅について検討を行った。

2. 実験概要

本研究において用いた供試体の形状寸法を図-1に示す。供試体の有効高さおよび鉄筋比はすべての供試体で同一とし、せん断スパン比、載荷板長さ、支持板長さおよび全幅を実験変数とした。変数の値は表-1に示すとおりである。図-2に載荷方法を示す。支点は、棒球座により支持し部材軸方向に自由とし、載荷は油圧ジャッキより鋼製分配桁を介して行った。このとき、供試体は安定性を考慮し右側支点を全幅支持し、試験区間を左側のせん断スパンとした。なお、載荷板・支持板とも厚さ10mm、橋軸方向の幅50mmの鋼板を用いた。コンクリートは、早強ポルトランドセメント、海砂（比重2.67または2.69）および川砂利（比重2.75または2.76）を使用して作製した。

*1 北海道大学大学院助手 工学研究科社会基盤工学専攻（正会員）

*2 北海学園大学教授 工学部土木工学科 工博（正会員）

*3 北海道大学大学院助教授 工学研究科社会基盤工学専攻 工博（正会員）

*4 北海道大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 工博（正会員）

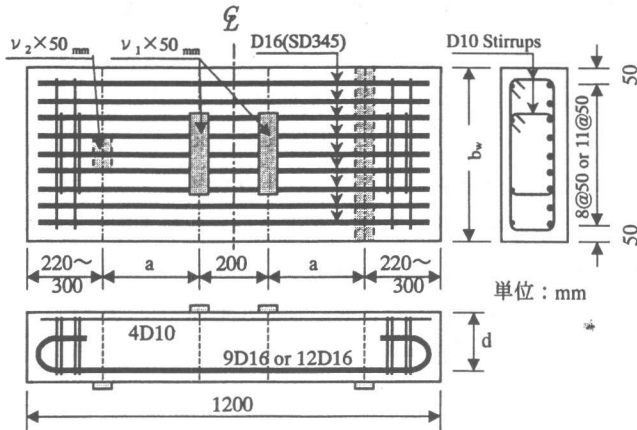


図-1 供試体概要

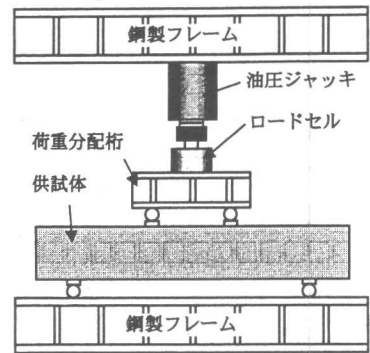


図-2 載荷方法

表-1 供試体の諸元および実験結果

記号	a (cm)	b_w (cm)	d (cm)	a/d	p ^{注1)} (%)	v_1 (cm)	v_2 (cm)	f'_c ^{注2)} (MPa)	P_B ^{注3)} (kN)	P'_B ^{注4)} (kN)	V_{test} ^{注5)} (kN)	$b_{e.test}$ ^{注6)} (cm)
A-10-10	28	50	16	1.75	2.23	10	10	26.1	294	323	161	34.72
A-10-20	"	"	"	"	"	10	20	20.2	294	383	191	41.19
A-10-30	"	"	"	"	"	10	30	23.8	333	389	194	41.82
A-20-10	"	"	"	"	"	20	10	19.6	340	452	226	48.60
A-30-10	"	"	"	"	"	30	10	23.8	450	525	263	56.51
B-10-10	"	65	"	"	2.29	10	10	29.4	368	373	186	39.84
C-10-10	20	50	"	1.25	2.23	10	10	34.6	480	436	218	29.63
C-20-10	"	"	"	"	"	20	10	32.1	525	502	251	34.07
C-30-10	"	"	"	"	"	30	10	31.5	626	606	303	41.14
C-50-10	"	"	"	"	"	50	10	34.9	811	733	367	49.77
C-10-20	"	"	"	"	"	10	20	36.4	483	425	212	28.82
C-10-30	"	"	"	"	"	10	30	30.7	520	512	256	34.76
D-10-10	36	"	"	2.25	"	10	10	35.2	294	264	132	42.44

注1) 引張鉄筋比 注2) 圧縮強度 注3) 破壊荷重 注4) $P'_B = P_B \cdot (30/f'_c)^{2/3}$ 注5) せん断耐力 注6) 有効幅

軸方向鉄筋には、熱間圧延異形棒鋼 SD345-D16 を 5cm 間隔で配置し、端部では定着のために SD295A-D10 のスターラップを用いた。記号AおよびBを付した供試体は目標圧縮強度を 24.5 MPa、記号CおよびDを付した供試体は 30.0 MPa として、7日間湿潤で養生した後、試験を実施した。なお、コンクリートの配合は単位水量 150~160kg、水セメント比 50~60%、細骨材率 43~45%とした。

3. 実験結果および考察

3.1 ディープスラブの破壊性状

各供試体のコンクリート圧縮強度、破壊荷重およびせん断耐力は表-1に示すとおりである。表中の P'_B は圧縮強度を 30.0 MPa として得られるときの破壊荷重に換算したものである。このとき、せん断耐力はディープビームのせん断破壊に類似していると仮定し、その耐力は圧縮強度の 2/3 乗に比例することとした（後述の耐力算定式参照）。せん断耐力 V_{test} は対称載荷な

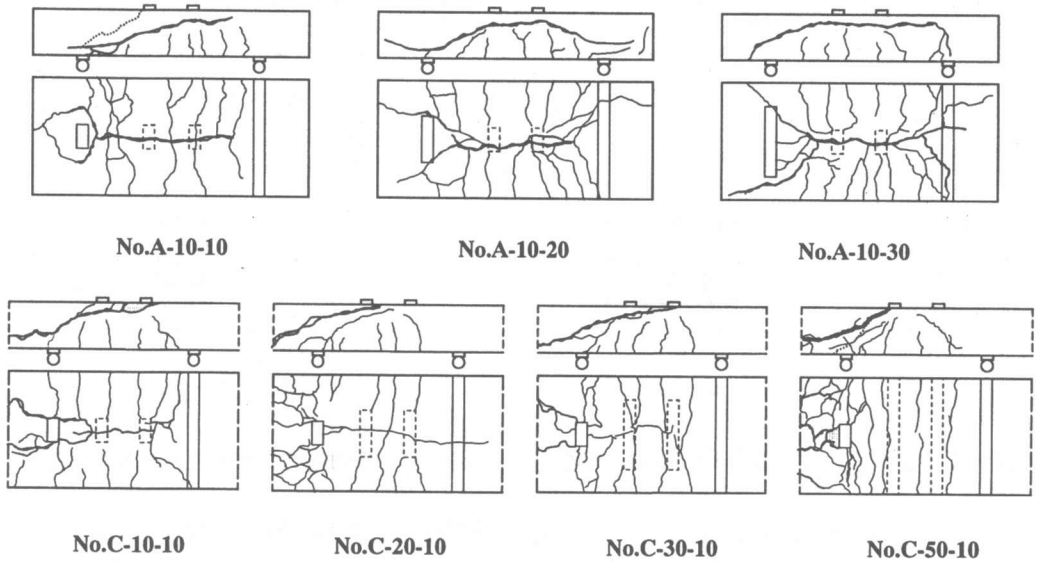


図-3 供試体破壊状況の一例

ので P_B' の $1/2$ である。

図-3は、供試体の破壊状況の一例を示したもので、せん断スパン比が 1.75 と 1.25 の供試体である。いずれの供試体も破壊直前までは曲げひび割れまたは曲げせん断ひび割れが徐々に発達する様子が観察された。終局時には供試体側面に斜めひび割れが現れると同時にそれが大きく開口して破壊に至った。この時の破壊は脆性的である。しかしながら、ここで観察された斜めひび割れは破壊時における2次的なひび割れで、破壊に起因したと思われるひび割れは供試体の内部で荷点と支点を結ぶような形で発達していると考えられる。その理由としては、供試体 A-10-10 および C-50-10 の2体について試験終了後、上面のコンクリートを除去したところ、側面に現れている斜めひび割れとは異なるひび割れが内部に観察されたためである(図中の点線)。したがって、荷板長さおよび支持板長さが供試体全幅より小さい場合には内部において3次元的な破壊面が発達しているようである。

3.2 有効幅の検討

本研究では、前述したようにディープスラブをディープビームとして検討することとした。示方書で示されているディープビームのせん断耐力算定式の原式³⁾は次式で示される。

$$V_{wd} = \frac{0.24 f_c'^{2/3} (1 + \sqrt{p_w})(1 + 3.33 r/d)}{1 + (a/d)^2} b_w d \quad (1)$$

ここに f_c' : コンクリート圧縮強度 (MPa)

$$p_w = 100 A_s / (b_w \cdot d)$$

A_s : 引張鋼材の断面積 (cm²)

r : 支圧板幅 (cm)

a : せん断スパン (cm)

d : 有効高さ (cm)

b_w : 腹部の幅 (cm)

表-1に示されている $b_{e, test}$ は、実測されたせん断耐力から有効幅を未知量として算定した値である(式中の b_w を $b_{e, test}$ と置き換えて)。すなわち、各供試体をディープビームとして算定する場合の必要とする有効幅を表している。これらの実測された有効幅をもとに各パラメータについて検討を行った。

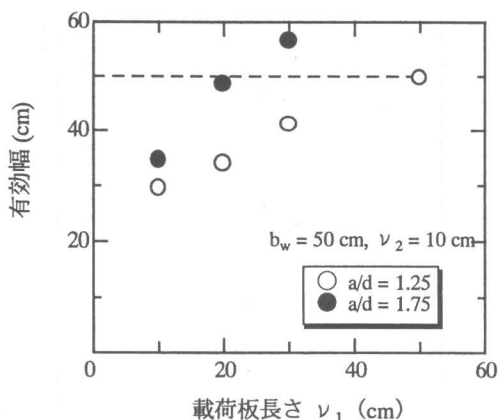


図-4 有効幅に対する載荷板長さの影響

図-4は、支持板長さを10cmと固定し、載荷板長さを変化させたときの有効幅を示したものである。なお、図中の破線は供試体の全幅を示している。せん断スパンの異なるいずれの供試体においても載荷板長さが大きくなるにつれて有効幅は直線的に増加する傾向にあるが、載荷板長さがある大きさになれば有効幅は供試体全幅に達するようである。その大きさは、 $a/d=1.75$ の供試体では20cmよりやや大きく、 $a/d=1.25$ の供試体では40cmから50cmの間にあると予想される。図-5は、載荷板長さを10cmと固定し支持板長さを変化させたときの有効幅を表している。この場合でも、支持板の長さが大きくなれば有効幅は増加傾向にあるが、前者ほど影響は大きくない。仮に支持板長さが

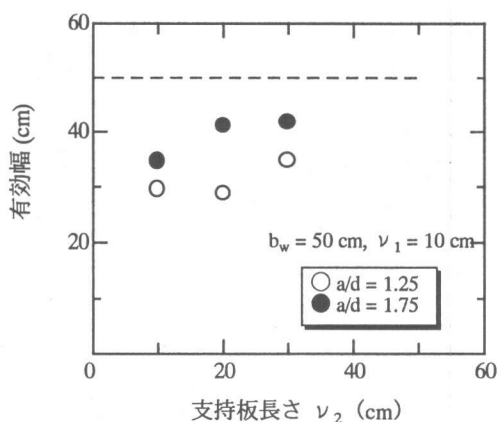


図-5 有効幅に対する支持板長さの影響

全幅と同じ大きさ(50cmのとき)の場合でも、有効幅が全幅に達するかどうかは疑わしい。これらの結果から、有効幅に与える影響は支持板長さよりも載荷板長さの方が大きいと考えられる。

有効幅に与えるせん断スパンの大きさの影響を図-6に示す。この図は、載荷板および支持板とも長さ10cmの場合である。この結果からいえることはせん断スパンが大きくなるにつれて有効幅が直線的に増加していることである。この傾向は、図-4と図-5にも現れており、有効幅に与えるせん断スパンの影響は少ないと考えられる。

図-7は、同一載荷・支持条件下で、供試体の幅を変化させたときの有効幅を示したもので

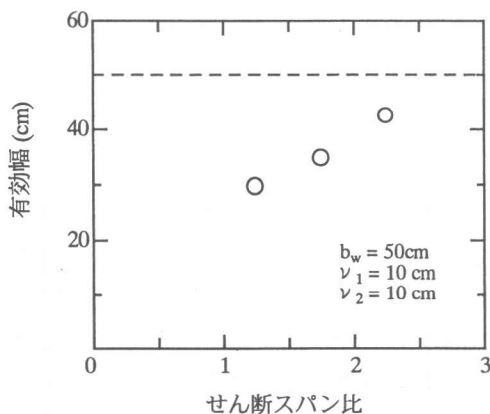


図-6 有効幅に対するせん断スパン比の影響

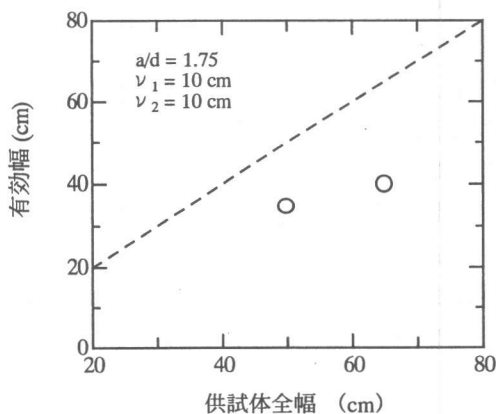


図-7 有効幅に対する供試体全幅の影響

ある。全幅 50cm の供試体と 65cm の比較でしかないが、全幅が大きい方がやや有効幅が大きい。もし、この載荷板と支持板の長さを変え、ことなく供試体全幅を徐々に小さくしていったとしたら、有効幅も徐々に小さくすると予想される。もちろん、全幅が 10cm に達すれば完全なディープビームになるので、その場合は全幅と有効幅が一致するが、前述の図-4 の傾向から判断すれば全幅が 10cm よりも大きいところで両者は一致すると考えられる。逆に供試体全幅を徐々に増加させた場合は、ある程度の大きさで有効幅は限界値に達すると思われる。当然のことながら、載荷板・支持板長さに比べ全幅が極端に大きい場合は、幅方向のある程度離れた位置では応力の伝達が行われないからである。したがって、有効幅と全幅の関係は、曲線的な増加傾向を示し、有効幅の大きさには限界値があると予想される。

以上のことを踏まえて、有効幅について次のような仮定を設けた。ディープスラブのせん断破壊がディープビームに類似してせん断圧縮型の破壊であると考えれば、載荷板付近のコンクリートがクリティカルとなる。したがって、有効幅を算定する位置は、支持板よりも載荷板の方が近いと考えられる。図-8 は供試体を上面から示したもので、図中の実線は載荷板と支持板の端部を結ぶ線である。先ず、この実線で囲

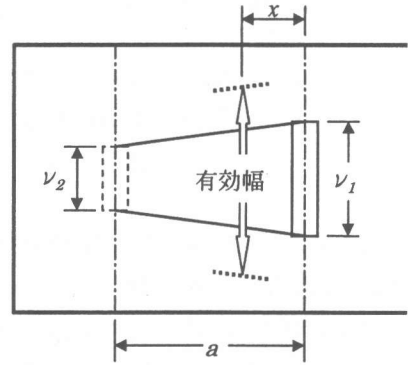


図-8 有効幅の概念

まれた台形の幅が有効幅に対して相関性があると考えた。しかしながら、載荷板長さが全幅まで達しなくとも有効幅が全幅に一致することから、有効幅は図中の x の位置における台形（載荷板と支持板の端部を結んだ領域）の幅よりも大きいことが考えられる。これは、載荷板から支持板に力が伝達される時、その間に形成されるコンクリートの圧縮ストラットは、実線で表される直線的な形状ではなく、多少幅が大きくなることを示している（図中破線）。おそらく、有効幅は位置 x における台形の幅とこの圧縮ストラットの幅の増加分を考慮して表すことができると思われる。従って、有効幅は以下の式によって表すことができる。

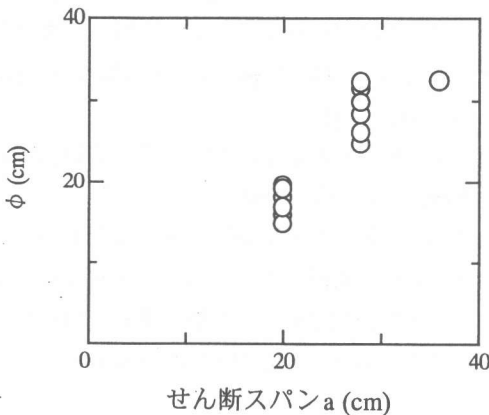


図-9 圧縮ストラットの膨らみとせん断スパンの関係

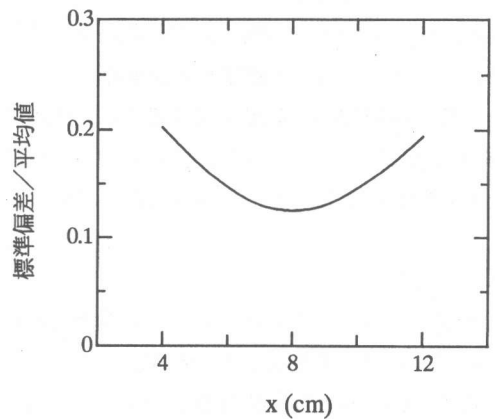


図-10 有効幅算定位置の検討

$$b_e = v_1 - (v_1 - v_2)x/a + \phi \quad (2)$$

ここに x : 有効幅を算定する位置
 ϕ : 伝達される斜め圧縮応力の供試体幅方向の膨らみ

ここで定義した ϕ について、せん断スパン a の大きさととの関係の一例を示すと図-9 のようになる。 ϕ の値は、式(2)の b_e を $b_{e, test}$ として求めたものである。なお、 ϕ は x によって算定される数値は異なるが、ここでは ϕ のばらつきが最も小さくなる時（具体的には ϕ/a の平均値に対する標準偏差が最も小さくなる時）の x を示したものである（図-10 参照）。

この結果を見る限りでは、全供試体で x は 8cm 程度が適している。なお、 x の値については同じせん断スパンの供試体ごとについても行ったが、 x が a とともに大きくなるような関係は見いだせなかった。 ϕ と a についてみると、両者はほぼ線形な関係にあることがわかる。したがって、 ϕ はせん断スパン a あるいはせん断スパン比 a/d が大きな影響因子であると思われる。仮に $\phi = a$ として有効幅を求めても、計算値はやや危険側ではあるが実験値とはよく一致する。しかしながら、 ϕ を定義するにあたって、供試体全幅を変数とした実験データが不足しているためその影響を取り入れることができないこと、また圧縮ストラットの幅方向の分布が各種変数によってどのように形成されるか明確でないことから、汎用性のある提案式は導くことは現時点では難しい。ストラットの分布については 3 次元弾性解析等によって、調べる必要がある。

4. まとめ

本研究におけるディープスラブの載荷実験によって得られた知見を以下に示す。

1) 載荷板長さおよび支持板長さがディープスラブ全幅より小さいときに観察される斜めひび割れは、側面に現れたひび割れと内部で発達

したひび割れは異なり 3 次元的な破壊面を形成している。

- 2) ディープスラブのせん断耐力についてディープビームとして検討した場合、算定に用いる有効幅は、載荷板長さ、支持板長さ、供試体全幅およびせん断スパンが影響因子であることが明らかとなった。
- 3) その場合、支持板長さよりも載荷板長さの方が有効幅に与える影響は大きく、その長さが全幅より小さくても有効幅は全幅に一致することが示された。
- 4) 有効幅は、載荷板と支持板の間で形成される圧縮ストラットを考えたとき、幅方向の膨らみは主にせん断スパンが大きな影響因子となっていることが示された。

謝辞：本研究の実験を行うにあたり、北海道大学工学部の木村勉技官、学生の富田早季氏、北海学園大学工学部の学生、嶋中祐介氏、西浦千絵氏に多大なるご協力をいただきました。ここに厚くお礼申し上げます。さらに本研究は、平成 9 年度文部省科学研究費（基盤研究(B)(2)、課題番号 08455203、研究代表者：角田興史雄）の助成を受けて行ったもので、ここに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 古内 仁、高橋義裕、角田興史雄：RCスラブの自由縁附近載荷に対する実用せん断設計法の研究、土木学会論文集、No.532/V-30, pp. 141-149, 1996
- 2) コンクリート標準示方書【平成 8 年制定】設計編、土木学会、1996
- 3) 二羽淳一郎：FEM解析に基づくディープビームのせん断耐力算定式、第 2 回 RC 構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集、pp.119-128, 1983