

論文 衝撃荷重を受けるせん断補強筋を有しない RC 梁のせん断破壊性状

安藤智啓*1・岸 徳光*2・三上 浩*3・松岡健一*4

要旨:本研究では、せん断に対する RC 梁の合理的な耐衝撃設計法を確立することを目的とし、主として静載荷時にせん断破壊が卓越する RC 梁に着目した漸増繰り返し載荷実験法による重錘落下衝撃実験を行った。実験結果より、せん断破壊型 RC 梁に関して、1) 重錘衝撃力と支点反力波形の主波動は正弦半波的な波形形状を示し、両者で大略類似する。2) 荷重載荷時の変位波形は重錘衝撃力および支点反力波形と同様な形状を示す。3) 耐衝撃設計は、動的耐力を計算より得られる静的耐力の 1.5 倍と評価することで可能である、等が明らかになった。

キーワード: RC 梁, 耐衝撃性, せん断破壊型, 静的耐力, 動的耐力, 動的応答倍率

1. はじめに

著者らは、これまで道路落石防護施設等の耐衝撃用途を目的に造られる鉄筋コンクリート (RC) およびプレストレストコンクリート (PC) 製梁、柱、板の耐衝撃性に関する研究を継続して行ってきた。その結果、RC 梁に関しては衝撃荷重載荷時の曲げ破壊性状が徐々に明かにされてきており、曲げに対する合理的かつ簡易な耐衝撃設計法が提案されるに至っている^{1),2)}。しかしながら、静載荷時の曲げに対するせん断耐力比 (以下、せん断余裕度 α) が小さい構造部材の衝撃荷重載荷時における破壊性状は十分に解明されておらず、未だ合理的な耐衝撃設計法は確立されていないのが現状である。

本研究では、せん断に対する RC 梁の合理的な耐衝撃設計法を確立することを目的として、主として静載荷時にせん断破壊が卓越する RC 梁に着目した漸増繰り返し載荷実験 (以下、繰り返し載荷実験) 法による重錘落下衝撃実験を行った。用いた試験体は主鉄筋比およびせん断スパン比の異なる RC 梁であり、これらパラメータの影響も考慮して各 RC 梁の耐衝撃性に関する検討を行った。なお、本研究ではコンクリートと主鉄筋から

成る RC 梁の動的なせん断破壊性状に限定して検討を行うため、全ての試験体に対してせん断補強筋を配置しないこととした。

2. 実験概要

本実験に用いた試験体の一覧を表-1 に示す。試験体は主としてせん断余裕度 α が 1.0 以下で静載荷時にせん断破壊が卓越する RC 梁である。ここで、せん断余裕度 α は土木学会コンクリート標準示方書³⁾に基づき算出される静的せん断耐力 V_{usc} を静的曲げ耐力 P_{usc} で除した値である。また、試験体数は、主鉄筋比 p_t 、せん断スパン比 a/d が異なる計 6 体であり、試験体名はこれら試験体の主鉄筋径 (D13, D19)、純スパン長 ($L = 1.0, 1.5, 2.0$ m) を組み合わせ示している。なお、表中には重錘の RC 梁への衝突速度 V および別途行った静載荷実験での静的耐力 P_{us} も合わせて示している。

図-1 に試験体の形状寸法および配筋状況を示す。試験体はいずれも断面寸法 15×25 cm の単鉄筋矩形 RC 梁である。各試験体は鉄筋の定着長を節約するために梁端面に 9mm の鋼板を設置し、

*1 室蘭工業大学大学院 工学部建設システム工学科 工修 (正会員)

*2 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科 工博 (正会員)

*3 三井建設 (株) 技術研究所 主任研究員 工博 (正会員)

*4 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科 工博 (正会員)

表-1 試験体の一覧

試験体名	衝突速度 V (m/s)	主鉄筋径	主鉄筋比 p_t (%)	純スパン長 L (m)	せん断スパン比 a/d	静的曲げ耐力 P_{usc} (kN)	静的せん断耐力 V_{usc} (kN)	静的せん断余裕度 $\alpha (=V_{usc}/P_{usc})$	実験による静的耐力 P_{us} (kN)
D13-L1.0	1~2	D13	0.80	1.0	2.38	75.9	45.7	0.60	71.2
D13-L1.5	1~4	D13	0.80	1.5	3.57	50.6	45.7	0.90	61.8
D13-L2.0	1~4	D13	0.80	2.0	4.76	37.9	45.7	1.20	45.8
D19-L1.0	1~2	D19	1.82	1.0	2.38	150.1	60.0	0.40	114.6
D19-L1.5	1~2	D19	1.82	1.5	3.57	100.1	60.0	0.60	82.0
D19-L2.0	1~4	D19	1.82	2.0	4.76	75.1	60.0	0.80	78.1

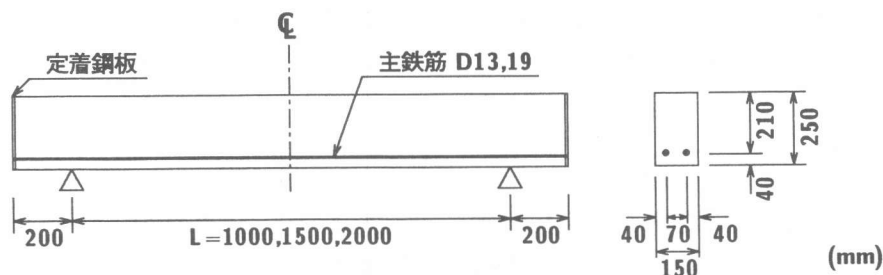


図-1 試験体の形状寸法および配筋状況

この鋼板に鉄筋を溶接している。

衝撃荷重の載荷は、RC梁のスパン中央部に重量 2.94 kN、載荷部直径 15 cm の円柱状鋼製重錘を所定の高さより自由落下させることにより行っている。載荷方法は重錘の初速度および増分速度を 1 m/s、かつ載荷方向を同一とする繰り返し載荷とし、RC梁が破壊に至るまで実験を続行することとした。なお、RC梁の破壊は、せん断破壊が主であることより、目視により梁側面に明瞭な斜めひび割れが発生した状態とした。しかしながら、破壊形態が曲げ型となる場合には、既往の研究^{1),2)}と同様に梁スパン中央部の累積残留変位が純スパン長の 2% 程度に達した状態と定義した。

測定項目は重錘衝撃力 P 、支点反力 R およびスパン中央部の変位（以下、載荷点変位） δ である。重錘衝撃力、支点反力の測定にはそれぞれ容量および応答周波数が 1470 kN、DC ~ 4.0 kHz および 500 kN、DC ~ 2.4 kHz のひずみゲージ型ロードセルを、載荷点変位の測定にはストローク 200 mm、応答周波数 915 Hz のレーザ式変位計を用いた。なお、表-2 および表-3 には、実験時の

表-2 コンクリートの力学的特性

実験時材令 (日)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
28	21.1	20.2	0.21

表-3 主鉄筋の力学的特性

主鉄筋名称	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
D13	380	550	206	0.3
D19	388	559	206	0.3

コンクリートおよび主鉄筋の力学的特性を示している。

3. 実験結果および考察

3.1 ひび割れ分布

図-2には、繰り返し載荷実験終了後のRC梁のひび割れ分布および破壊形態を一覧にして示している。図より、せん断余裕度 α が 0.6 以下の D13-L1.0、D19-L1.0/1.5 の場合には明瞭なせん断破壊を示し、斜めひび割れが載荷点直下より支点

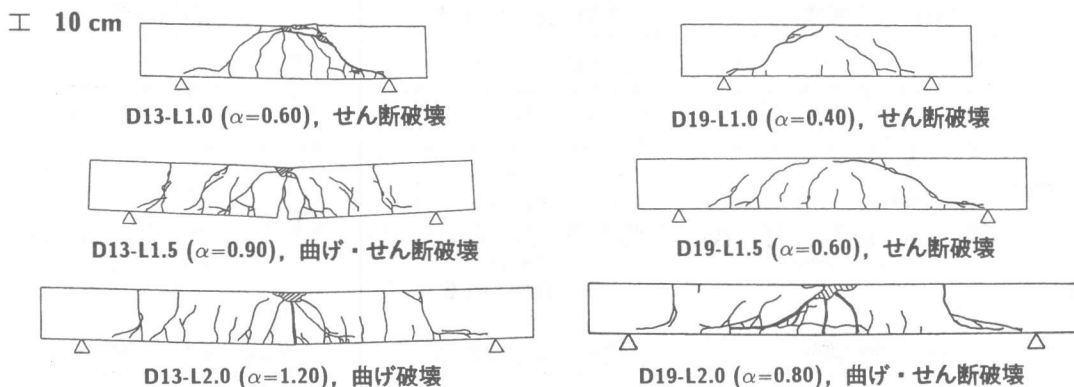


図-2 実験終了後のひび割れ分布

部近傍まで大きく進展していることがわかる。中でも、せん断余裕度が $\alpha = 0.4$ でせん断スパン比が小さい D19-L1.0 は、曲げひび割れの発生も少なく最も顕著にせん断破壊した。

せん断余裕度が $\alpha = 0.9$ および 0.8 である D13-L1.5, D19-L2.0 の場合には、衝撃荷重載荷の初期段階で梁全体に曲げひび割れが発生し、衝突速度の増大とともに梁下面の損傷が進行することを目視により確認している。しかしながら、最終的にはこれらスパン中央部下縁に生じた曲げひび割れが斜めひび割れに進展して終局に至る曲げ・せん断型の破壊形態を示している。一方、せん断余裕度 α が 1.0 以上でせん断スパン比も大きい D13-L2.0 の場合には、曲げひび割れの本数も多く、最終的には載荷点部が圧壊し角折れ状態となる曲げ破壊型の破壊形態を呈している。

3.2 重錘衝撃力波形、支点反力波形および載荷点変位波形

図-3 は、各 RC 梁の重錘衝撃力波形、支点反力波形および載荷点変位波形を示したものである。ここで、各波形は重錘が RC 梁に衝突する 30 ms 前の時刻を 0 ms とし、150 ms までの時間に対して整理している。なお、支点反力波形は各支点部の反力を独立に測定し足し合わせた合計としている。ここでは、紙面の都合により、せん断余裕度 α の異なる 3 試験体 D19-L1.0 および D13-L1.5/2.0 (それぞれ $\alpha = 0.4, 0.9, 1.2$) のみに着目して検

討を行うこととした。

まず、重錘衝撃力および支点反力波形についてみると、せん断余裕度が $\alpha = 0.4$ でせん断破壊した D19-L1.0 の場合には、重錘衝撃力と支点反力の主波動がほぼ類似な正弦半波的な波形形状を示し、最大応答値、継続時間が類似していることがわかる。一方、せん断余裕度が $\alpha = 1.2$ で曲げ破壊した D13-L2.0 の場合には、重錘衝撃力波形は正弦半波の周期が 20 ~ 30 ms 程度である主波動に高周波の正弦一波が衝撃初期に合成された形状を示し、初期に高周波成分が現れない主波動のみの支点反力波形とは異なった性状を示していることがわかる。また、両波形の主波動最大値を比較すると、衝突速度の増大とともにそれらの値に差異が生じてくることがわかる。しかしながら、重錘衝撃力波形の衝撃初期における第 1 波の最大値と支点反力波形の主波動最大値は大略等しい。なお、せん断余裕度が $\alpha = 0.9$ で曲げ・せん断破壊した D13-L1.5 の場合には、上述のせん断破壊型および曲げ破壊型梁の中間的な波形形状を示していることがわかる。

次に、各梁の載荷点変位波形についてみると、D19-L1.0 の衝撃荷重載荷時の変位波形は、重錘衝撃力および支点反力波形と同様な波形形状を示している。また、衝撃荷重除荷後は直流成分のみとなり応答は終了している。これは、せん断補強筋がないことにより斜めせん断ひび割れが梁の上下に貫通し、その結果梁が二分され両者が主鉄

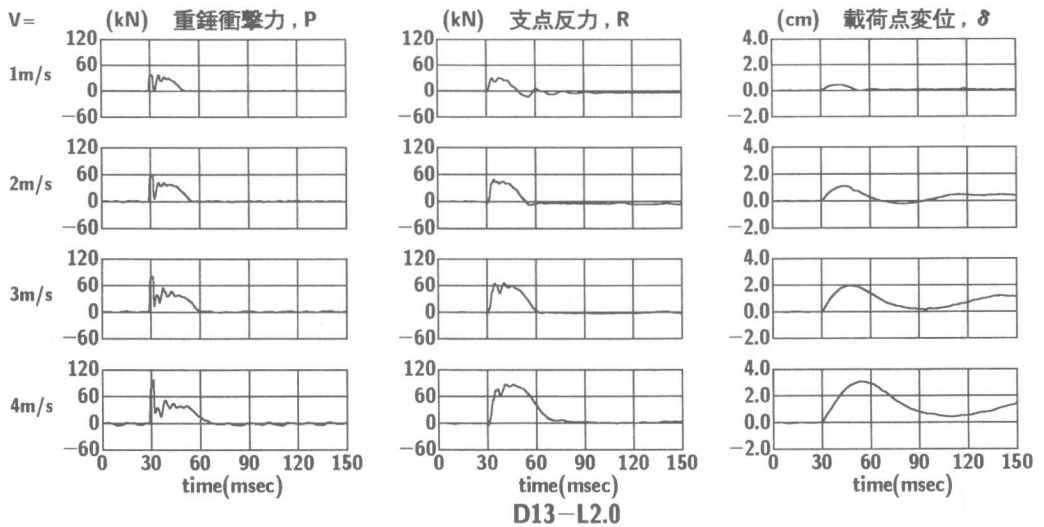
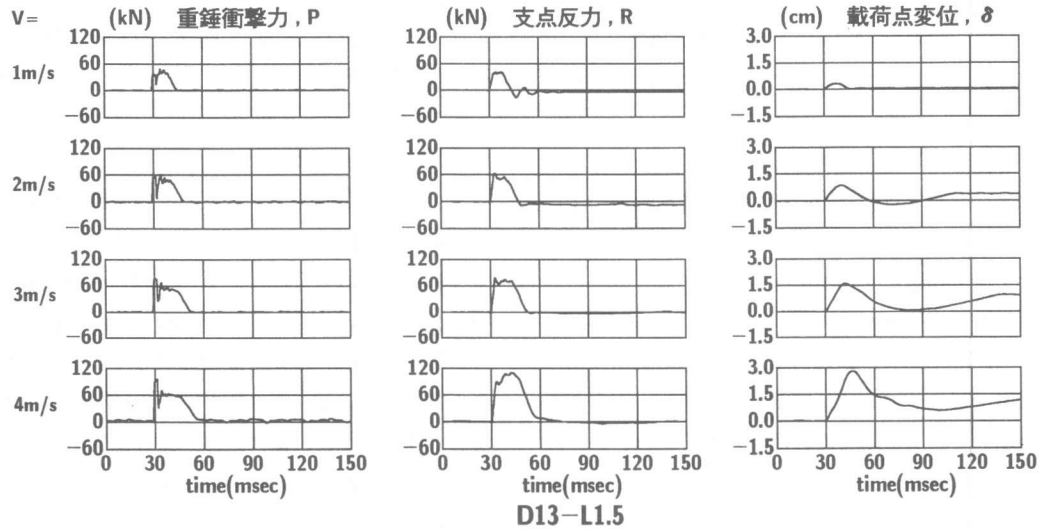
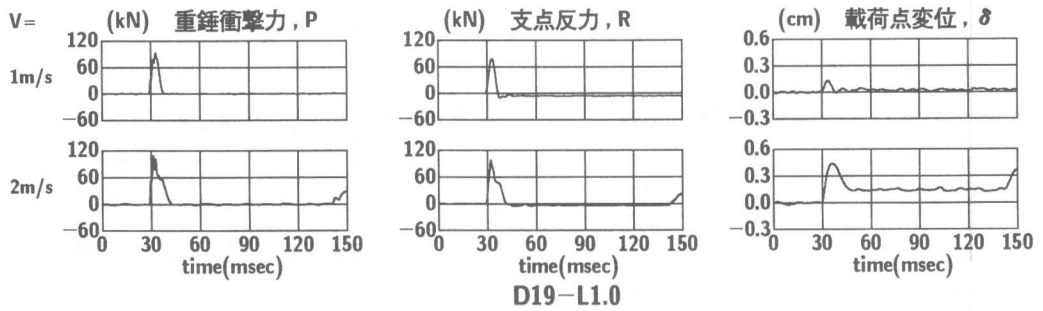


図-3 重錘衝撃力波形，支点反力波形，載荷点変位波形

筋のみで繋がれた状態になったためと推察される。一方、D13-L2.0の場合には、 $V = 2 \text{ m/s}$ 以上において低次の自由振動状態を示しており、曲げ破壊

型の挙動を示している。また、D13-L1.5の場合には、 $V = 2 \text{ m/s}$ で低次の自由振動状態が励起されているが、衝突速度の増大とともに直流成分が増

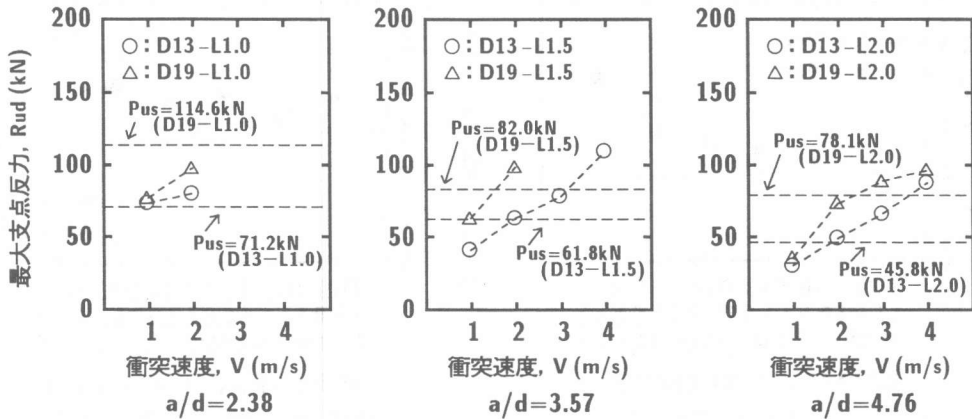


図-4 各せん断スパン比 a/d における最大支点反力と衝突速度の関係

加しかつ振動周期が延びており、せん断破壊を示した D19-L1.0 に近い性状となっていることがわかる。このように D13-L1.5 はせん断破壊と曲げ破壊の双方の特徴を有する波形分布となっており、その破壊形態が曲げ・せん断型であったことに対応している。

3.3 最大支点反力と衝突速度の関係

図-4には、各せん断スパン比 a/d における RC梁の最大支点反力 R_{ud} と衝突速度 V の関係を示している。図中には、静載荷実験より得られた静的耐力 P_{us} の値も合わせて図示している。なお、前節3.2の考察より、重錘衝撃波形の第1波の最大値と支点反力波形の主波動最大値は概ね類似することより、ここでは最大支点反力のみに着目して検討することとした。

図より、最大支点反力は衝突速度の増加とともに増大していることがわかる。また、せん断スパン比 a/d に関わらず、主鉄筋比の大きい D19 試験体の最大支点反力が主鉄筋比の小さい D13 試験体のそれに比べて大きく示されていることがわかる。これは、表-1に示されるように、D19 試験体の静的耐力が D13 試験体のそれに比べて大きいことに対応している。また、せん断破壊した試験体 D13/19-L1.0 および D19-L1.5 では、最大支点反力が静的耐力を越えるかほぼ同等の値に達

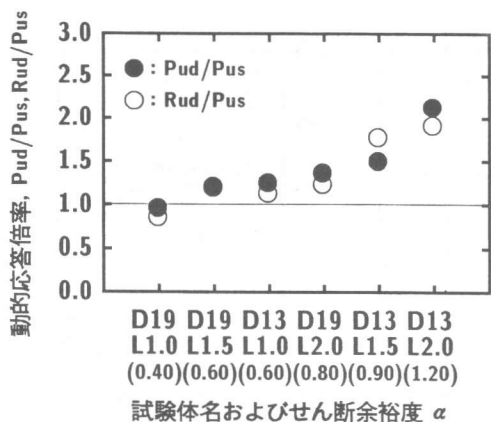
した時点で終局に至っているのに対して、曲げ・せん断破壊した D13-L1.5, D19-L2.0 および曲げ破壊した D13-L2.0 では静的耐力を越えた時点ではまだ終局に至っていないことがわかる。

これより、最大支点反力（あるいは最大重錘衝撃力）と静的耐力の関係は RC梁の破壊形態と密接に関連し、その関係を明らかにすることでせん断破壊する RC梁の耐衝撃設計も可能になるものと推察される。

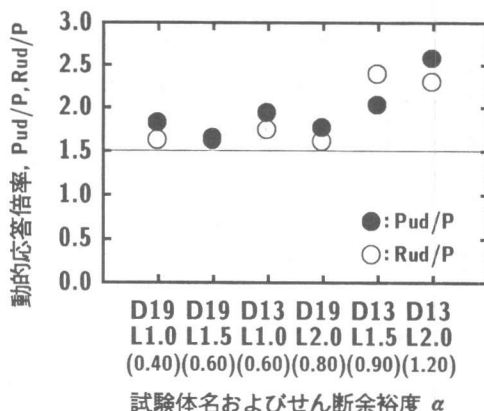
3.4 動的応答倍率

図-5には、繰り返し載荷の最終載荷時における各 RC梁の動的応答倍率（最大支点反力 R_{ud} および最大重錘衝撃力 P_{ud} を、実験より得られた静的耐力 P_{us} および計算より得られた静的耐力 P で除した値）をせん断余裕度 α の低い順に整理して示している。なお、計算静的耐力 P には静的曲げ耐力 P_{usc} と静的せん断耐力 V_{usc} の小さい方の値を採用している。

(a) 図の静的耐力に実験値を適用した場合は、せん断余裕度 α が大きくなると動的応答倍率は増加する傾向にあることがわかる。さらに、その動的応答倍率は曲げ破壊した D13-L2.0 および曲げ・せん断破壊した D13-L1.5, D19-L2.0 ではそれぞれ 2.0 および 1.5 程度、せん断破壊した D13/19-L1.0, D19-L1.5 では 1.0 程度であること



(a) 静的耐力に実験値を適用した場合



(b) 静的耐力に計算値を適用した場合

図-5 動的応答倍率

がわかる。一方、(b) 図の静的耐力に計算値を適用した場合には、動的応答倍率は曲げおよび曲げ・せん断破壊した試験体で 2.0~2.5 程度、せん断破壊した試験体で 1.5 程度であることがわかる。

これより、せん断余裕度 α が 1.0 程度以下でせん断破壊する RC 梁の耐衝撃設計は、最大支点反力あるいは最大重錘衝撃力を動的耐力と考え、その動的耐力を実験より得られる静的耐力と等価、あるいは計算静的耐力の 1.5 倍程度として安全側で評価できるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、せん断補強筋を配筋しない場合の RC 梁のせん断に対する合理的な耐衝撃設計法を確立することを目的として、せん断破壊型 RC 梁を用いた繰り返し載荷実験法による重錘落下衝撃実験を行った。得られた結果を要約すると、

- (1) せん断破壊した RC 梁の重錘衝撃力と支点反力の主波動は正弦半波的な分布を示し、最大値、継続時間ともに大略類似している。
- (2) せん断破壊した RC 梁の載荷時変位波形は重錘衝撃力および支点反力波形と同様な形状を示す。また、衝撃荷重除荷後には変位が残留して応答は終了する。

- (3) 衝撃荷重載荷時の最大支点反力および最大重錘衝撃力と静的耐力との関係は、RC 梁の破壊形態と密接に関連する。

- (4) せん断余裕度が 1.0 程度以下でせん断破壊型となる RC 梁の耐衝撃設計は、実験で得られた静的耐力と等価、計算で得られた静的耐力の 1.5 倍を動的耐力と考えることで可能となる。

今後は、断面寸法が異なる RC 梁やせん断補強筋を有する RC 梁の耐衝撃性についても検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 安藤智啓, 三上 浩, 松岡健一: RC 梁の耐衝撃性に及ぼす断面寸法の影響, 第 4 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, 1998.
- 2) 松岡健一, 岸 徳光, 三上 浩, 安藤智啓: スパン長の異なる RC 梁の重錘落下衝撃実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, 1998.
- 3) 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.